

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



## **MODERNIZACIÓN DE LOS REGULADORES DE TENSIÓN Y VELOCIDAD DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE 48 MW**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:**

**HEBER NEMESIO GARCÍA ALAMO**

**PROMOCIÓN  
1979- 2**

**LIMA – PERÚ  
2010**

**MODERNIZACIÓN DE LOS REGULADORES DE TENSIÓN  
Y VELOCIDAD DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE  
48 MW**

A:

Mi alma mater, la UNI

Mis padres Nemesio y Faustina

Mis hermanos

Mi hija Andrea

## **SUMARIO**

En el presente informe de suficiencia se mostrarán los criterios o consideraciones a tomar en cuenta para llevar a cabo la modernización de una Central Hidroeléctrica con el cambio de los reguladores de tensión y velocidad por los de tipo digitales. Se describirá la modernización realizada en la Central Hidroeléctrica de 48 MW con las adiciones en el alcance de los sistemas de control, como son el cambio total del sistema de protección eléctrica de los generadores y transformadores, así como la instalación de un sistema de supervisión local y remoto, incluyendo la automatización de la puesta en marcha, parada y control de los grupos generadores de la central desde el centro de control ubicado remotamente en la ciudad.

El objetivo principal del presente informe, resultado de la ejecución de la modernización de la central, es mostrar y ayudar al personal de gestión y de ingeniería a la toma de decisiones de la mejor alternativa de modernización a llevar a cabo en una central, con la elaboración de las especificaciones técnicas respectivas. Para ello, se presenta un ejemplo de estas especificaciones técnicas.

Los criterios para llevar adelante la modernización se construirán en base a las razones a que deben responder a esta tarea, las funcionalidades de los sistemas de excitación y de velocidad que deben cumplir, y la selección de la alternativa en cuanto al alcance del cambio de los equipos.

## ÍNDICE

<b>PRÓLOGO</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>GENERALIDADES Y ANTECEDENTES</b>	<b>2</b>
1.1 Objetivo	2
1.2 Alcances	2
1.3 Descripción de la Central Hidroeléctrica de 48 MW	3
1.3.1 Características de la Planta	3
1.3.2 Características de los Grupos Generadores N° 1, 2, 3 y 4	3
1.4 Situación Operativa Anterior a la Modernización de la Central Hidroeléctrica	5
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>MARCO TEÓRICO DE LOS SISTEMAS DE REGULACIÓN DE UNA CENTRAL ELÉCTRICA</b>	<b>8</b>
2.1 Control de Voltaje	8
2.1.1 Sistemas de Excitación	9
2.1.2 Estabilizador de Sistemas de Potencia	17
2.2 Control de Velocidad	20
2.2.1 Regulador Síncrono	21
2.2.2 Regulador con Estatismo Permanente	22
2.2.3 Regulador con Estatismo Transitorio	26
2.2.4 Reguladores PID	28
2.2.5 Sistema Aceite-Dinámico	29
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>CONSIDERACIONES PARA LA MODERNIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE REGULACIÓN Y CONTROL Y LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b>	<b>31</b>
3.1 Modernización de los Sistemas de Excitación. Regulación de Tensión	31
3.1.1 Razones para la Modernización	32

3.1.2	Funciones del Sistema de Excitación	33
3.1.3	Alternativas de Modernización	34
3.1.4	Rendimiento y Conclusiones	38
3.1.5	Especificaciones Básicas del Regulador de Tensión y Normas	39
3.2	Modernización de los Sistemas de Velocidad. Regulación de Frecuencia	42
3.2.1	Situación Existente Típica	42
3.2.2	Objetivos Principales para la Modernización	43
3.2.3	Alternativas de Modernización	43
3.2.4	Especificaciones Básicas del Regulador de Velocidad y Normas	44
3.3	Cómo Aplicar las Recomendaciones	48
3.4	Consideraciones Finales	49
3.5	Ejemplo de Especificaciones Técnicas de los Reguladores de Tensión y Velocidad para una Central Hidroeléctrica de 48 MW	50
3.5.1	Requisitos Mínimos	50
3.5.2	Requisitos Adicionales	51
<b>CAPÍTULO IV</b>		
<b>REPORTE DE RESULTADOS DE PUESTA EN SERVICIO</b>		<b>52</b>
4.1	Contenido de un Informe de Puesta en Servicio de los Reguladores de Tensión y Velocidad	55
4.2	Características y Parámetros de la Instalación de los Reguladores	59
4.2.1	Características Generales del Sistema de Regulación	59
4.2.2	Características de Hardware del Regulador	60
4.2.3	Características de Software del Regulador	61
4.2.4	Componentes del Sistema	61
4.2.5	Sistema de Supervisión	64
4.3	Ajuste de los Reguladores de Tensión y Velocidad	64
4.3.1	Ajuste de la Malla de Control del Regulador de Tensión	64
4.3.2	Ajuste de la Malla de Potencia	67
4.3.3	Ajuste de la Malla de Control de Velocidad	69
4.3.4	Ajuste del Estabilizador de Potencia	70
4.4	Evaluación del Ajuste de los Parámetros en la Puesta en Servicio de los Regulador de Tensión y Velocidad	71
4.4.1	Ensayos en Carga – Regulador de Velocidad	71

4.4.2	Ensayos en Carga – Regulador de Tensión	72
4.5	Costo/Beneficio de la Instalación	73
	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>75</b>
	<b>ANEXO A</b>	
	INFORME DE PRUEBAS DINÁMICAS PARA LA REGULACIÓN DE FRECUENCIA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE 48 MW, ANTES DE LA MODERNIZACIÓN	78
	<b>ANEXO B</b>	
	FORMULARIOS DE DATOS PARA LA ELABORACIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	111
	<b>ANEXO C</b>	
	EJEMPLO DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS SISTEMAS DE REGULACIÓN Y CONTROL DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE 48 MW	123
	<b>ANEXO D</b>	
	ENSAYOS BAJO CARGA Y DE RECHAZO DE CARGA DE LA PUESTA EN SERVICIO DE LOS REGULADORES DE TENSIÓN Y VELOCIDAD	171
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>188</b>

## **PRÓLOGO**

Como sabemos, los dos parámetros a controlar en una central hidroeléctrica son la tensión y la frecuencia, dichos parámetros son controlados por medio de los sistemas de excitación (que controla la corriente de campo para la magnetización del estator) que conforman la regulación de tensión, y los sistemas de regulación de velocidad (que controla la entrada del caudal de agua para la generación de la carga y control de la frecuencia).

En el Capítulo I, se mostrará la necesidad del reemplazo de los reguladores en base al diagnóstico realizado por el Comité de Operaciones del Sistema COES, cuyo reporte se muestra en el Anexo A. Previamente se muestran las condiciones iniciales en que se encuentra la central. En el Capítulo II, se hará el desarrollo temático de las funciones propias de los reguladores de tensión y velocidad, teniendo en cuenta que no se teorizará el funcionamiento de estos equipos, los que se pueden encontrar en los textos de ingeniería, sino mostrar la modelización de los sistemas de regulación digitales, para el propósito de aplicación específica de esta modernización.

En el Capítulo III, se muestra el aspecto principal de este informe, los criterios o las consideraciones técnicas para la definición del proyecto teniendo en cuenta la visión de una modernización operativa de la central en cuestión, y plasmarlos en la elaboración de las especificaciones técnicas por las cuales se definen los alcances de ingeniería de las instalaciones nuevas. Por ello, como extensión importante, se presentará como ejemplo las especificaciones técnicas de los reguladores digitales de tensión y velocidad elaboradas para los fines de la convocatoria a los proveedores del concurso de suministro, cuyo documento se muestra en el Anexo C.

Finalmente en el Capítulo IV se muestra el reporte de resultados de la instalación y ensayos realizados durante la puesta en servicio del Sistema de Regulación de Tensión y Velocidad en la Central Hidroeléctrica de 48 MW, de modo de confirmar el desempeño del equipo en diversas condiciones operativas, lo cual se observa en el Anexo D. Este reporte es sucinto considerando que el tema es motivo de otro informe especializado. Asimismo se muestran como ejemplo los ajustes definitivos de las mallas de control de los reguladores.

# **CAPÍTULO I**

## **GENERALIDADES Y ANTECEDENTES**

### **1.1 Objetivo**

Mostrar la modernización de una Central Hidroeléctrica de 48 MW con el cambio de las instalaciones de los reguladores de tensión y velocidad por los de tipo digitales, describiendo los beneficios y desempeño en la planta y su incidencia directa en la operación en el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional y la consecuente mejora de su producción de la energía eléctrica.

El objetivo principal del presente informe, resultado de la ejecución de la modernización de la central, es ayudar al personal de ingeniería y de gestión, mostrando los criterios o consideraciones técnicas a tomar en cuenta para la toma de decisiones en la selección de la mejor alternativa de modernización a llevar a cabo, con la elaboración de las especificaciones técnicas respectivas. Para ello, se presenta un ejemplo de estas especificaciones técnicas con las que se llevó a cabo la modernización.

### **1.2 Alcances**

Se mostrará la necesidad del reemplazo de los reguladores para el caso particular de esta central de 48 MW realizado en base al diagnóstico ejecutado por el COES. Se hará el desarrollo temático de las funciones propias de los reguladores de tensión y velocidad sólo con la modelización orientado a los sistemas digitales. Se desarrollarán los criterios o las consideraciones para afrontar un proyecto de modernización tomando en cuenta las razones, funcionalidades que deben tener y la selección de alternativas del cambio de equipos o instalaciones. Se hará las especificaciones técnicas de los reguladores digitales integrando las funciones de tensión y velocidad. Aplicación, instalación, pruebas y operación en el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional.

Quedan excluidos de este informe la elaboración de los procedimientos de los ensayos de recepción, los procedimientos específicos de ensayo y las garantías. Sólo se presentan algunos resultados de estos ensayos para conocimiento de su operación correcta y adecuada en el sistema interconectado nacional.

### 1.3 Descripción de la Central Hidroeléctrica de 48 MW

#### 1.3.1 Características de la Planta:

Potencia instalada:	54,4 MW; 68 MVA
Potencia efectiva:	48,02 MW (desde el 21-07-1999)
Grupos:	4 Grupos c/u de 13,6 MW; 17 MVA
Tipo:	Central de regulación, Francis
Recurso hídrico:	Lago Junín, río Mantaro
Ducto:	Túnel a presión 2,22 km
Caudal máximo:	80 m <sup>3</sup> /s
Nivel de toma:	12 715 pies
Nivel de centro de rodete:	12 456 pies
Salto bruto:	259 pies, 78,9 m

#### 1.3.2 Características de los Grupos Generadores N° 1, 2, 3 y 4

##### a) Turbinas:

Fabricante:	Morgan Smith.
Rodete:	Francis 16 alabes, eje vertical.
Distribuidor	18 paletas
Diámetro Ext. Rodete:	6' 9 3/4"
Altura de diseño:	250 pies, 76,5 m
Potencia nominal:	18 600 H.P.
Velocidad Angular:	257 rpm
Descarga:	20 m <sup>3</sup> /s.
Año puesta en marcha:	Grupos 2, 3,4 en 1936, y grupo 1 en 1954

##### b) Generadores:

Fabricante:	General Electric.
Tipo:	Polos salientes
Potencia instalada:	17 000 kVA
Tensión nominal:	6,9 kV
Amperaje:	1 422 A
Factor de potencia:	0,80
Número fases:	3
Frecuencia:	60 Hz.
Número de polos:	28

Tensión de excitación: 250 Voltios DC.  
 Corriente de excitación: 288 Amperios DC.  
 Temperatura de servicio: 60°C  
 Clase de aislamiento: B  
 Refrigeración: Natural.  
 Año de puesta en marcha: Grupos 2, 3, 4 en 1936, y Grupo 1 en 1954

**c) Gobernadores o Reguladores de Velocidad:**

**Grupo N° 1:**

Fabricante: Woodward Governor Co.  
 Año de instalación: 1954  
 Tipo: A  
 Presión aceite mando: 150 psi.  
 Motor regulador: 110 Voltios DC  
 Funcionamiento: Péndulo centrífugo con accionamiento hidráulico por aceite a presión.

**Grupos N° 2, 3 y 4:**

Fabricante: S. Morgan Smith Co.  
 Año de instalación: 1936  
 Presión aceite mando: 150 psi.  
 Motor regulador: 110 Voltios DC  
 Funcionamiento: Péndulo centrífugo con accionamiento hidráulico por aceite a presión.

**d) Regulación de Tensión**

**Excitatriz Principal:**

Fabricante: General Electric  
 Potencia: 72 kW.  
 Tensión: 250 Voltios DC.  
 Amperaje: 288 Amperios DC.  
 Velocidad: 257 r.p.m.  
 Arrollamiento campo: Independiente.  
 Temperatura de servicio: 39°C

**Excitatriz Piloto:**

Fabricante: General Electric

Potencia:	3.5 kW.
Tensión:	250 Voltios DC.
Amperaje:	14 Amperios DC.
Velocidad:	257 r.p.m.
Arrollamiento campo:	Compound.
Temperatura de servicio:	39°C

**Regulador de Voltaje:**

Fabricante:	Westinghouse
Modelo:	BJ-30
Excitación:	125 a 250 Voltios DC.
Frecuencia:	25 – 60 c/s
Tensión:	115 VDC
Reóstato:	a motor.

**e) Transformadores (4 unidades):**

Potencia:	17 MVA
Tensión:	50 000 / 6 900 V
Tensión CC:	8,5 %
Frecuencia:	60 c/s
Temperatura:	65°C
Refrigeración:	ONAN

**f) Tubería de Presión:**

Diámetro exterior:	5,18 – 3,66 – 2,60 m
Pendiente promedio:	0,273%
Longitud:	192,55 m
Espesor:	19 mm.

#### **1.4 Situación Operativa Anterior a la Modernización de la Central Hidroeléctrica**

Como observamos en la sección anterior, la central hidroeléctrica que nos ocupa data su puesta en servicio en el año 1936 con tres unidades de generación y 1954 con una unidad adicional.

En el año 1985, el sistema secundario del centro del país en que operaba esta Central se interconectó al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional. Antes de dicho año, la central de 48 MW que componía dicho sistema, operaba como una central de regulación en su sistema aislado cuya carga de aproximadamente 185 MW era atendido por un

conjunto de centrales hidroeléctricas.

Con la operación en el sistema interconectado las exigencias eran mayores por lo que el Comité de Operaciones del SEIN, COES, en el año 2005 determinó realizar pruebas de operatividad de la regulación de frecuencia primaria de la central. Para ello contrató a un consultor especializado para realizar las actividades siguientes:

1. Determinar las características dinámicas asociadas a la regulación de frecuencia y elaborar el modelo matemático, en términos de función de transferencia y esquema de bloque del sistema de control;
2. Caracterizar el comportamiento de la Regulación Primaria de frecuencia de las unidades conectadas al SEIN.

Luego de las pruebas realizadas, el consultor presentó un informe, el cual se puede ver en detalle en el ANEXO A del presente. En él se arribó a las conclusiones siguientes:

- El desempeño de los reguladores no es satisfactorio. En la fase de rotación en vacío los grupos G2, G3 y G4 presentan oscilaciones de velocidad demasiado anchas (particularmente en el grupo G2), que pueden hacer difícil y retrasar la maniobra de paralelo.
- Con respecto al valor de máximo gradiente de variación de la carga con el grupo conectado a la red, se encuentra un desempeño lento de todos los grupos; este comportamiento lento es particularmente evidente en el grupo G4.
- Los resultados muestran un comportamiento satisfactorio en los reguladores de velocidad de los grupos G1, G2 y G4 con respecto a la regulación primaria de frecuencia con un valor del estatismo permanente del orden del 2-3%. Para el G3 se encuentra una larga insensibilidad que limita fuertemente la contribución de esta máquina a la regulación primaria de frecuencia. No es posible detectar el valor de ajuste del estatismo sobre los reguladores.
- En las pruebas de rechazo de carga los resultados obtenidos muestran que los grupos tienen un desempeño no satisfactorio. Durante la fase de sobrevelocidad la tensión de la máquina se eleva excesivamente, por efecto de la respuesta dinámica demasiado lenta del regulador de voltaje de reóstato motorizado.
- Este problema tiene solución sólo con una sustitución de los actuales reguladores por reguladores más modernos.
- No fue posible determinar el modelo matemático del regulador de turbina. En la planta no estaba disponible alguna documentación técnica y no fue posible efectuar

las pruebas experimentales de identificación en el caso de los reguladores de tipo mecánico.

Ante este informe, se determinó realizar el cambio de los sistemas de regulación de la central preparando los documentos del concurso para el suministro, entre ellos las especificaciones técnicas para llevar a cabo la modernización. El proceso del concurso, contrato, suministro e instalación fue gestionada por la empresa con la administración directa de la Sub Gerencia de Generación (equivalente a la jefatura de centrales). En los capítulos III y IV que siguen se muestra la labor realizada.

Las características de los equipos de regulación existentes susceptibles de reemplazo se muestran en el párrafo anterior 1.3.2, acápite c) y d).

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO DE LOS SISTEMAS DE REGULACIÓN DE UNA CENTRAL ELÉCTRICA**

Si bien el título indica la teorización sobre lo relativo al funcionamiento de la regulación de tensión y velocidad de los generadores y turbinas de las centrales hidroeléctricas, no lo presentaremos de la forma clásica como se presenta la teoría, la cual la podemos encontrar profusa y cómodamente en los textos de ingeniería relativos a estos temas. De modo que el objetivo es más bien presentar cómo se modelan actualmente los sistemas digitales de regulación de acuerdo a las exigencias a las funciones de un sistema eléctrico de potencia.

#### **2.1 Control de Voltaje**

Para el control de la excitación de generadores síncronos se propone como una alternativa la utilización de sistemas de excitación estática. Para la comprensión de este sistema se verán los aspectos de la modelización y se definirán las funciones que un sistema de excitación ejecuta. El modelo se basa en el sistema de excitación estática más común: que el campo es alimentado por la propia barra del generador a través de un transformador y de un puente rectificador. Luego se muestra el estabilizador de sistemas de potencia, ESP, como un elemento integrante del regulador.

Siglas adoptadas:

SE : Sistema de Excitación

SEE : Sistema de Excitación Estática

SED : Sistema de Excitación Digital

RT : Regulador de Voltaje

CCR : Compensador de Corriente Reactiva

LSE : Limitador de Subexcitación

LCC : Limitador de Corriente de Campo

LV/Hz : Limitador Volts/Hertz

ESP : Estabilizador de Sistema de Potencia.

El voltaje en un SE debe tener las características funcionales como sigue.

### **2.1.1 Sistemas de Excitación**

#### **a) Funciones Ejecutadas**

Un SE debe ser capaz de ejecutar las siguientes tareas [10], [11]:

- Mantener el voltaje de salida de la máquina en el valor definido por el operador, o debe ser capaz de mantener una determinada relación entre voltaje y carga reactiva en toda la región de la operación;
- Mantener el voltaje de salida dentro de los límites aceptables de trabajo, asimismo en rechazos de carga plena y otros severos disturbios en el sistema de potencia (se considera como una excepción los instantes inmediatamente posteriores al disturbio, debido a la imposibilidad de obtener una respuesta instantánea del SE);
- Ser capaz de propiciar una excitación rápida en el arranque del grupo sin sobre elevación del voltaje de salida;
- Ser capaz de responder con desempeño adecuado, a los comandos del operador o sincronizador automático en el momento de la sincronización de la unidad con el sistema;
- Poseer elevada velocidad de respuesta de manera que sea posible corregir las variaciones de voltaje impuestas por variación de carga, generación o por maniobras de interruptores en el sistema;
- Poder sostener valores de voltaje de campo superiores al valor nominal de la plena carga, ante un cortocircuito trifásico en la barra de alto voltaje de la unidad;
- Ser capaz de aplicar tensiones positivas y negativas al campo, en valores realmente superiores al valor básico de excitación, buscando influenciar el torque de aceleración de manera que se mantenga la máquina en sincronismo con el sistema de potencia, inclusive, frente a severos disturbios en el mismo;
- En el caso de paralelo de unidades en la barra de alto voltaje, el SE debe ser capaz de compensar parte de la caída de voltaje en la reactancia del transformador elevador, o se deberá proveer de una característica adecuada del voltaje en función de la carga reactiva, a fin de propiciar el paralelo de otros generadores en la propia barra de salida;
- Ser capaz de limitar dinámicamente la corriente de excitación, de acuerdo con la característica de capacidad del propio campo, independientemente de la eventual necesidad de aumento de excitación que la malla de control del voltaje de salida imponga;

- Ser capaz de limitar dinámicamente la operación de la máquina en regiones próximas al límite de estabilidad, independientemente de la necesidad de decrecimiento de la excitación que la malla de control del voltaje de salida imponga;
- Ser capaz de contribuir de manera efectiva a la amortiguación de oscilaciones electromecánicas que aparezcan en el sistema de potencia o en la propia unidad;
- Ser capaz de limitar dinámicamente la operación de la máquina en condiciones de sobreflujo, limitando la relación Volts/Hertz;
- Opcionalmente ser capaz de limitar la corriente de armadura, referente a la carga reactiva, independientemente de la necesidad de aumento o decrecimiento de excitación que el control de voltaje imponga;
- Aún más, como requisito opcional, se puede exigir que el SE sea capaz de mantener el voltaje en la barra de alto voltaje dentro de una faja especificada, ofreciendo además, una división equitativa de la carga reactiva de las unidades en paralelo.

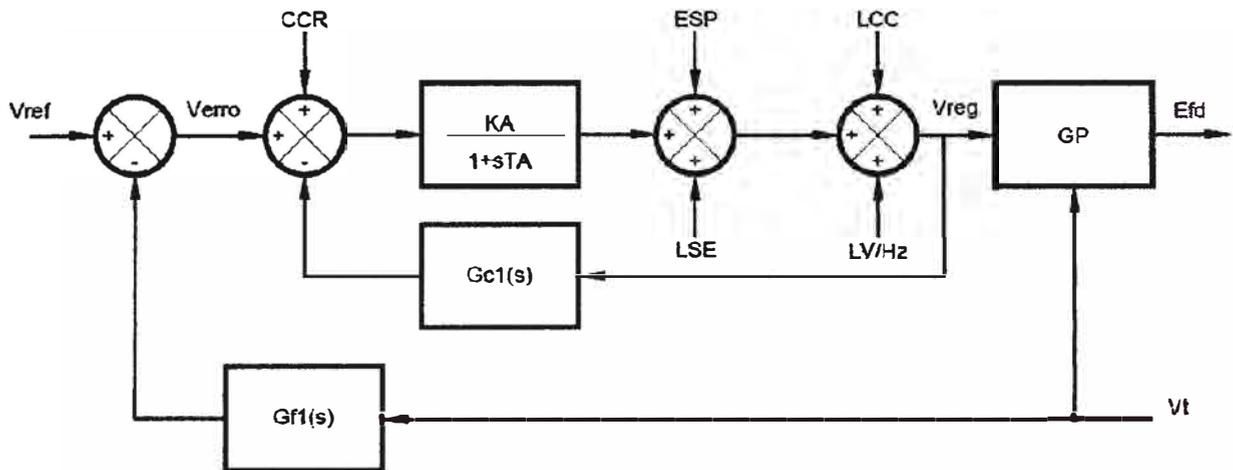
Estas funciones son las más importantes. Otras funciones con las cuales el SE debe ser dotado, como protección, alarma y señalización se considerarán en la elaboración de las especificaciones técnicas. Estas últimas funciones son requerimientos adicionales que formarán parte de la modernización integral de la central.

## **b) Modelización**

Para ejecutar las tareas mencionadas anteriormente, el SE posee un conjunto de funciones. En los sistemas de excitación analógicos tales funciones son en realidad, sintetizadas por dispositivos electro-mecánicos. En los sistemas de excitación digitales, SED, las funciones son ejecutadas en "software". A continuación, se describirán sucintamente las funciones del SE, así como por su importancia la del Estabilizador de Sistema de Potencia, ESP.

### **i) Malla principal de control de voltaje**

La Fig. 2.1 presenta la malla principal de control de voltaje. Se define "Vref" como el voltaje de referencia comandada por el operador o sincronizador automático; "Error" representa la diferencia entre la referencia y la medida del voltaje de salida; "Vreg" representa el voltaje de regulación que comandará el puente rectificador;  $Gf(s)$  representa la función de transferencia del transductor de voltaje;  $Gcl(s)$  representa el compensador de la malla de control, y  $Gp$  representa la función de transferencia del puente rectificador controlado. La ganancia de la malla de regulación de voltaje es ajustable en KA.



**Fig. 2.1 Malla principal de control de voltaje**

Para que el regulador de voltaje (RT) presente una buena regulación estática de voltaje, es necesario que tenga una ganancia elevada en el canal directo, permitiendo que el error de regulación sea mínimo. La velocidad de respuesta elevada se obtiene con el bloque de potencia Gp, del tipo estático y el transductor de voltaje con una banda de pase ancha. Los otros dispositivos que intervienen sobre el diagrama de bloques son:

ESP : Estabilizador de Sistemas de Potencia;

LSE : Limitador de Subexcitación;

LCC : Limitador de Corriente de Campo;

LV/Hz : Limitador de la relación Volts/Hertz;

CCR : Compensador de Corriente Reactiva.

### **i-1) Puente rectificador controlado**

El puente rectificador controlado constituye el bloque de potencia del SEE. Suponiendo un sistema trifásico, del tipo "bus-fed", con polarización cosenoidal a seis pulsos, se puede escribir que:

$$E_{fa} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} k_1 V_t \cos(\alpha) \quad (2.1)$$

Donde ( $K_1 V_t$ ) es el voltaje del secundario del transformador de rectificación y  $\alpha$  es el ángulo de atraso de conducción de los tiristores.

El ángulo de atraso de conducción  $\alpha$ , se establece por la comparación entre el voltaje de regulación Vreg, y un voltaje alternado, ( $k_2 V_t$ ), obtenido del voltaje del secundario del transformador de rectificación y filtrada. Tal voltaje CA guarda una relación de fase específica con el voltaje secundario del transformador de rectificación de tal forma que se obtiene la siguiente relación para el ángulo  $\alpha$ :

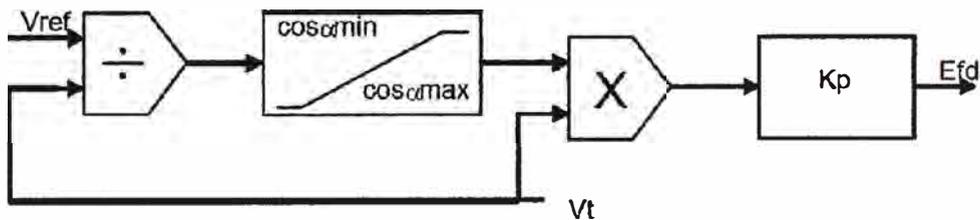
$$V_{reg} - (k_2 V_t) \cos(\alpha) = 0 \quad (2.2)$$

$$O, \quad \alpha = \cos^{-1}[V_{reg} / (k_2 V_t)] \quad (2.3)$$

El ángulo presenta límites superior e inferior establecidos por los tiempos de disparo ("turn-on") y corte ("turn-off") de los tiristores.

Colocando las ecuaciones (2.1) y (2.3) en la forma de diagrama de bloques resulta la Fig. 2.2 en que la ganancia  $K_p$  se da por:

$$K_p = \frac{k_1}{k_2} \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \quad (2.4)$$



**Fig. 2.2 Diagrama de bloque del puente rectificador controlado**

Para señales de regulación tales que los límites de disparo y corte no sean alcanzados, el puente es lineal e insensible a las variaciones de  $V_t$ .

Llamando de  $V_{regb}$  el cociente  $E_{fd}/K_p$ , se obtiene el valor base de voltaje de regulación y el puente pasa a presentar una ganancia de 1 pu/pu.

Los límites de voltaje se obtienen por las relaciones:

$$V_{\max} = \frac{V_{reg}(\alpha_{ton})}{V_{regb}} = \frac{k_2 V_{tb} \cos(\alpha_{ton})}{V_{regb}} \quad (2.5)$$

$$V_{\min} = \frac{V_{reg}(\alpha_{toff})}{V_{regb}} = \frac{k_2 V_{tb} \cos(\alpha_{toff})}{V_{regb}}$$

Donde  $V_{tb}$  representa el voltaje nominal del generador,  $\alpha_{ton}$  representa el ángulo a mínimo de atraso de conducción,  $\alpha_{toff}$  representa el ángulo máximo de atraso de conducción y  $V_{reg}(\alpha_{ti})$  representa el voltaje de regulación necesaria para provocar  $\alpha_{ti}$ . Como  $t_{on} < t_{off}$ , el límite negativo, en valor absoluto es inferior al límite positivo. El análisis vale para tensiones positivas y negativas con la corriente siempre positiva.

## **i-2) Transductor de voltaje**

Por lo general, el voltaje de salida se obtiene por la rectificación del voltaje de los transformadores de potencial con posterior filtrado. Para que las constantes de tiempo del filtro no influyeran de manera intensa el desempeño transitorio del SE, es común que la rectificación sea tomada de varias fases. De esta forma, como la primera armónica es de

frecuencia elevada (360, 720Hz), se pueden utilizar filtros con elevada frecuencia de corte (80 rad/s). Se utilizan, por lo general, filtros de segundo o tercer orden.

En valores en el sistema pu, la ganancia del transductor de voltaje se considera unitario, lo que significa que el voltaje básico en el sumador de RT es la de la salida del filtro cuando la máquina se encuentra en el voltaje nominal.

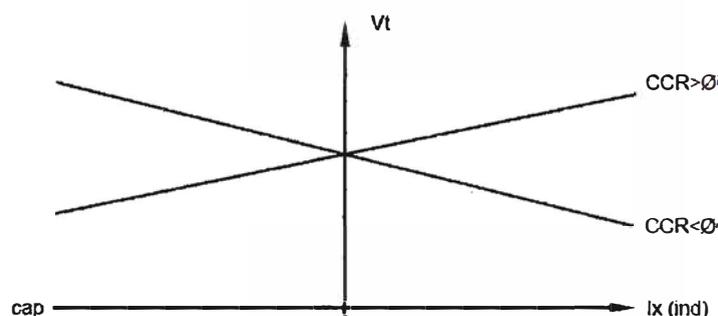
### i-3) Compensador de la malla principal

El compensador utilizado en la malla principal de control de voltaje va desde un simple proporcional hasta un compensador del tipo avance-atraso.

Compensadores del tipo PID también se utilizan, entendidos, aquí, como un caso en particular de avance-atraso. El compensador presentado en la figura 2.1 es del tipo derivativo en la realimentación, que, combinado con una ganancia  $K_A$  elevada, presenta una característica similar a la de un compensador de atraso. Los valores base necesarios para la conversión de la ganancia del compensador al sistema pu son el voltaje básico del filtro,  $V_{fb}$ , y el voltaje básico de regulación,  $V_{regb}$

### ii) Compensador de corriente reactiva

Para que sea posible el paralelo de varias unidades generadoras en la barra de bajo voltaje del transformador elevador, o para que se pueda compensar la caída de voltaje en el mismo, en el caso de plantas con paralelo en alto voltaje, en el SE se debe dotar de un compensador de corriente. El compensador puede ser derivado de la corriente activa y reactiva, a pesar de que lo usual es que se utilice sólo la corriente reactiva. El compensador de corriente reactiva (CCR) consiste, básicamente, en un transductor de corriente reactiva que llega a influenciar la referencia del regulador de voltaje de manera substractiva (paralelo en bajo voltaje) o aditiva (paralelo en alto voltaje). La Fig. 2.3 presenta la característica estática de un sistema de excitación dotado de CCR (positivo o negativo).



**Fig. 2.3 Característica estática suministrada por el CCR**

El CCR está constituido, usualmente, de un transductor lineal independiente, cuya salida se filtre y se sume (o substraer) en el sumador de RT, o de un dispositivo trifásico que,

a través de potenciómetros y transformadores de corriente auxiliares, se adicione al voltaje de los transformadores de potencial normalmente en cuadratura, o sea: el voltaje entre las fases 3 y 1 se suma a la corriente de la fase 2.

La Fig. 2.4 presenta un modelo para el CCR, en el que  $I_X$  es la corriente reactiva,  $V_C$  es la salida del compensador,  $G_{f2}(s)$  es la función de transferencia del filtro del transductor y  $K_C$  es la ganancia del dispositivo.



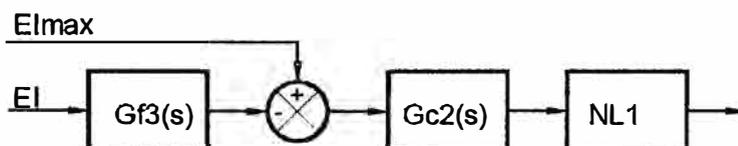
**Fig. 2.4 Diagrama de bloques del CCR**

La ganancia  $K_C$  tiene por base, en el sistema pu, la corriente nominal de la máquina y el voltaje básico de la salida del filtro del transductor de voltaje. Así, si por ejemplo, el transductor de voltaje suministra 10V en el voltaje nominal y el CCR suministra 0,5V en la corriente nominal, siendo ésta puramente reactiva, tenemos:

$$K_c = \frac{0,5}{1,0} \frac{1,0}{10,0} = 0,05 pu \quad (2.6)$$

### iii) Limitador de corriente de campo

El limitador de corriente de campo (LCC) se construye, usualmente, a través de un regulador no lineal de corriente. Tal regulador consiste, básicamente, de un transductor de corriente, de un comparador lineal de la corriente con la referencia de máxima corriente, de un dispositivo no lineal que amplifica sólo señales de error de comparación negativas, de una etapa de compensación y de un sumador con la señal de regulación. La Fig. 2.5 presenta el diagrama de bloques del LCC. La función  $G_{f3}(s)$  representa la dinámica del transductor de corriente, siendo  $G_{c2}(s)$  la función de transferencia del compensador utilizado para estabilizar la malla y NL1, un bloque de característica no lineal que amplifica sólo señales negativas. La referencia de máxima corriente puede ser del tipo tiempo inverso, permitiendo ultrapasajes transitorios de la corriente máxima de campo en régimen permanente.



**Fig. 2.5 Diagrama de bloques del LCC**

El LCC actúa en oposición a la señal de regulación, con una ganancia mucho mayor que el propio canal de regulación de forma tal que se pueda trabajar con un bajo error de limitación.

Los valores base para conversión de la malla de excitación al sistema pu son la corriente de excitación para el voltaje nominal en vacío en la línea del entrehierro,  $EI_0$ , y el voltaje de regulación básica.

#### iv) Limitador de subexcitación

El limitador de subexcitación (LSE) se construye, usualmente, de la mezcla ponderada de las señales de tres transductores: de voltaje terminal, corriente reactiva y corriente activa. La variante resultante de la suma se filtra, y estimula un bloque no lineal que amplifica sólo señales positivas. La señal resultante pasa por un compensador y actúa para aumentar el voltaje, siendo sumada a la referencia de RT.

La Fig. 2.6 presenta una curva de capacidad ilustrando la línea de actuación del dispositivo. La Fig. 2.7 presenta el diagrama de bloques del LSE.

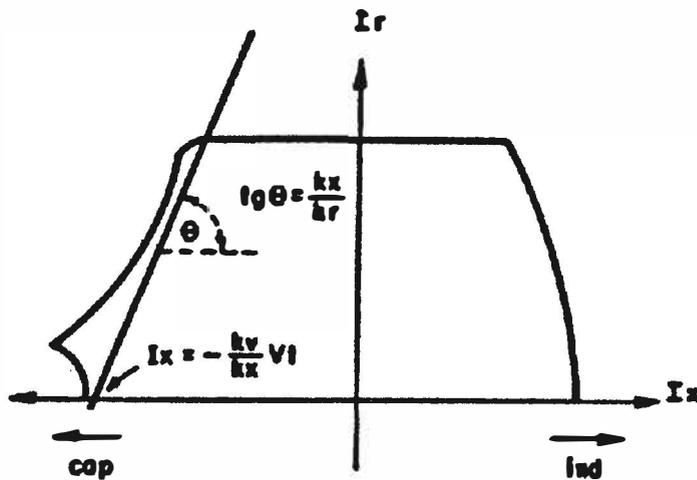


Fig. 2.6 Curva de capacidad mostrando la línea de actuación del LSE

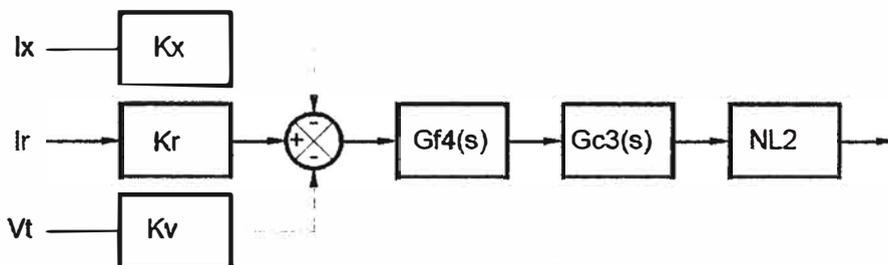


Fig. 2.7 Diagrama de bloques del LSE

La función  $Gf4(s)$  representa la dinámica de los transductores de corriente activa, reactiva y voltaje, siendo  $Gc3(s)$  la función de transferencia del compensador utilizado para la estabilización de la malla y  $NL2$ , un bloque de característica no lineal que amplifica sólo señales positivas. Aquí se utiliza un filtro único para los tres transductores, usualmente de segundo orden.

Por el diagrama presentado se puede concluir que el LSE estará activo para:

$$-k_v V_t - k_x I_x + k_r I_r \geq 0 \quad (2.7)$$

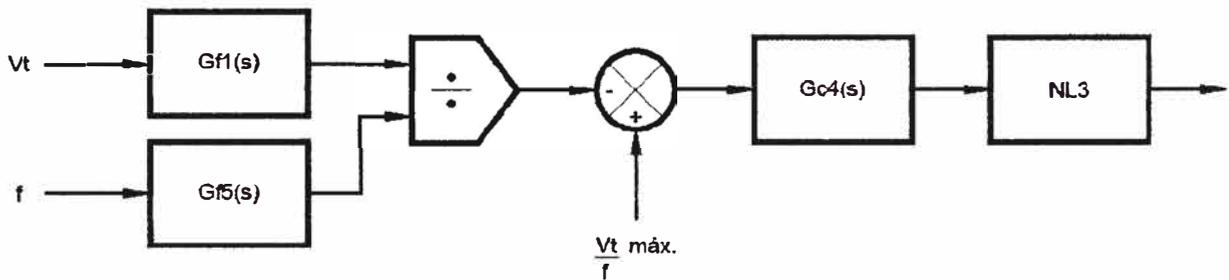
Para un determinado voltaje de salida, se puede construir una función  $I_r = f(I_x)$  que defina la línea inicial de actuación del dispositivo, de acuerdo a la Fig. 2.6.

Por el ajuste adecuado de los coeficientes  $k$ ,  $k_x$  y  $k_r$  se puede situar tal línea de tal manera que evite la operación del generador próxima al límite de estabilidad y, eventualmente, evitar también la operación con la armadura en sobrecarga.

Para definir los valores de las ganancias del LSE en el sistema pu se utiliza como base el voltaje y corriente nominales del generador, el voltaje básico de salida del filtro de transducción de voltaje,  $V_{fb}$ , y un voltaje intermedio en el sumador de los transductores, que puede ser cualquier valor de fácil manipulación.

#### v) Limitador Volts/Hertz

El limitador V/Hz (LV/Hz) se construye, usualmente, a través de un regulador no lineal del cociente voltaje por frecuencia. Tal regulador consiste, básicamente, de transductores de voltaje y frecuencia, de un dispositivo que divide el voltaje entre la frecuencia, de un comparador lineal de esta variable con una referencia de valor máximo, de un dispositivo no lineal que amplifica sólo señales de error de comparación negativas, de una etapa de compensación y de un sumador con la señal de regulación. La Fig. 2.8 presenta el diagrama del LV/Hz.



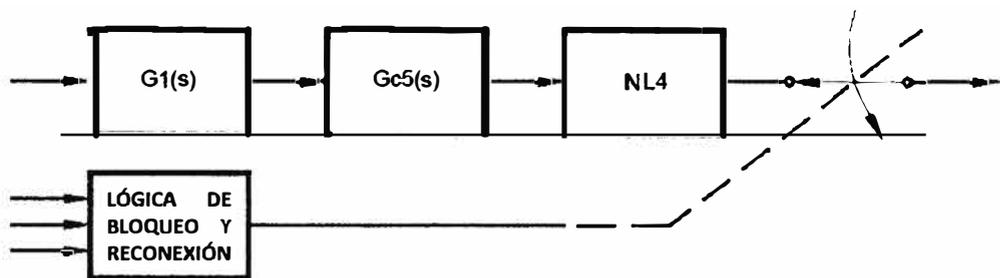
**Fig. 2.8 Diagrama de bloques de LV/Hz**

La función  $Gf5(s)$  representa la dinámica del transductor de frecuencia, siendo  $Gc4(s)$  la función de transferencia del compensador utilizado para estabilizar la malla, y  $NL3$ , un bloque de característica no lineal que amplifica sólo señales negativas. El LV/Hz actúa en oposición a la señal de regulación, con una ganancia mucho mayor que la del propio canal de regulación de forma que se pueda trabajar con un bajo error de limitación.

Los valores base para la conversión de la malla de excitación al sistema pu son: el voltaje nominal, la frecuencia nominal y el voltaje de regulación básica. Los filtros utilizados en las transducciones son, normalmente de segundo orden, estando incorporados a los propios transductores.

## vi) Estabilizador de Sistema de Potencia

Otro dispositivo que actúa sobre el SE es el estabilizador de sistema de potencia (ESP). Para la aplicación de tal dispositivo se utiliza una medida eléctrica que sea asociada a la parte mecánica del conjunto generador-turbina, usualmente  $P_e$ ,  $\Delta f$ ,  $\Delta w$ ,  $P_a$ ,  $\delta$  o bien una combinación de estas señales. La señal se procesa por un compensador de característica derivativa y sumada a la referencia de RT, modulando el voltaje de salida con la intención de provocar torque eléctrico en fase con el desvío de velocidad, en una determinada faja de frecuencias. El torque en fase con el desvío de velocidad es un torque de amortiguación. De esta forma se garantiza la amortiguación de oscilaciones electromecánicas. La salida del estabilizador se limita para evitar una sobre modulación del voltaje de salida, utilizando un esquema de bloqueo y reconexión para evitar la actuación del dispositivo en ciertas condiciones operacionales. La Fig. 2.9 presenta el diagrama básico del ESP.



**Fig. 2.9 Diagrama de bloques del ESP**

La función  $G_1(s)$  representa la síntesis de la señal utilizada para la estabilización, incluyendo los filtros de los transductores. La función  $G_{c5}(s)$  representa la función de transferencia del compensador utilizado para la estabilización de la malla y  $NL4$  el limitador de salida. También se prevé para el dispositivo una lógica de bloqueo y reconexión automáticos. En la sección siguiente el ESP se expone con más detalles.

### 2.1.2 Estabilizador de Sistemas de Potencia

El uso de los reguladores de voltaje en vez de los reguladores de velocidad para amortiguar oscilaciones en los sistemas interconectados es la base de este sistema, bajo el concepto de variar el voltaje de salida en fase con los desvíos de frecuencia. Hay diferentes tipos de estabilizadores en función de la variable de entrada [12]; luego se desarrolló el ESP basado en la potencia acelerante siendo ésta la derivada de la potencia eléctrica y velocidad (o frecuencia). Posteriormente se introdujo el concepto de filtro rastreador de rampa.

El ESP derivado de la potencia acelerante es mundialmente aceptado como la estructura capaz de propiciar amortiguación en una ancha faja de frecuencias sin provocar efectos colaterales como los ESPs derivados de la potencia o frecuencia.

### a) Estructura

La potencia acelerante se obtiene de la combinación dinámica de la potencia eléctrica y de la velocidad (o frecuencia). Partiendo de la ecuación básica:

$$\Delta_w = \frac{1}{2H_s}(P_m - P_e) \quad (2.8)$$

Resolviendo para la potencia mecánica tenemos:

$$\frac{1}{2H_s}P_m = \frac{1}{2H_s}P_e + \Delta\omega \quad (2.9)$$

Como la función integración provocaría "overflow" en el cálculo de la expresión, se multiplican los dos miembros de la ecuación por una función de tipo "reset".

$$\frac{T_1}{2H(1+sT_1)}P_m = \frac{T_1}{2H(1+sT_1)}P_e + \frac{sT_1}{(1+sT_1)}\Delta\omega \quad (2.10)$$

Restringiendo la banda frecuencial por la inclusión de un filtro pasa-baja con capacidad de rastreamiento de rampas, tenemos:

$$\left(\frac{T_1}{2H(1+sT_1)}P_m\right)F_1(s) = \left(\frac{T_1}{2H(1+sT_1)}P_e + \frac{sT_1}{(1+sT_1)}\Delta\omega\right)F_1(s) \quad (2.11)$$

$$G_f(s) = \frac{(1+s4T_{rr})}{(1+sT_{rr})^4}$$

El término a la izquierda se puede entender como la integral de la potencia mecánica dividida entre  $2H$  y limitada frecuencialmente por un filtro pasa-alto (el "reset") y un pasa-bajo ( $F_1(s)$ ). Así, si de esta señal se subtrae la integral de la potencia eléctrica también dividida entre  $2H$  y limitada frecuencialmente por el mismo "reset", se tendrá una señal proporcional a la integral de la potencia acelerante. Como la potencia mecánica ya posee una limitación natural en alta frecuencia, el hecho de agregarse un filtro pasa-baja a este canal no modificará substancialmente la información. El diagrama de bloques de la Fig. 2.10 presenta la derivación de la señal. Están incluidos, en la figura 2.10, las funciones de transferencia de los transductores de frecuencia(o velocidad) y potencia.

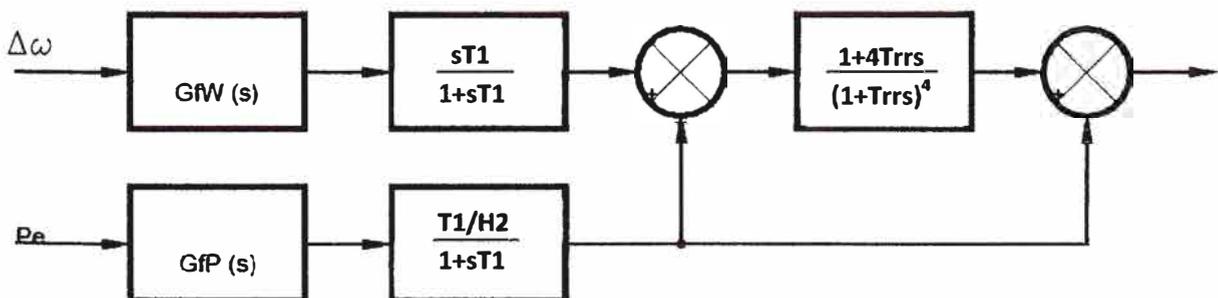
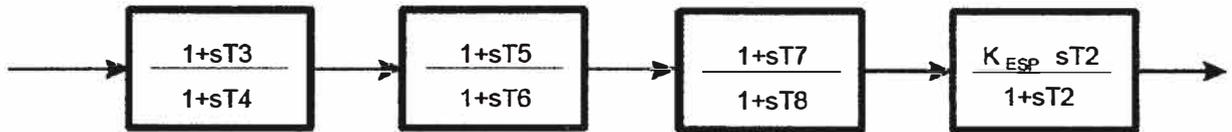


Fig. 2.10 Derivación de la señal para ESP.

**b) Características Lineales**

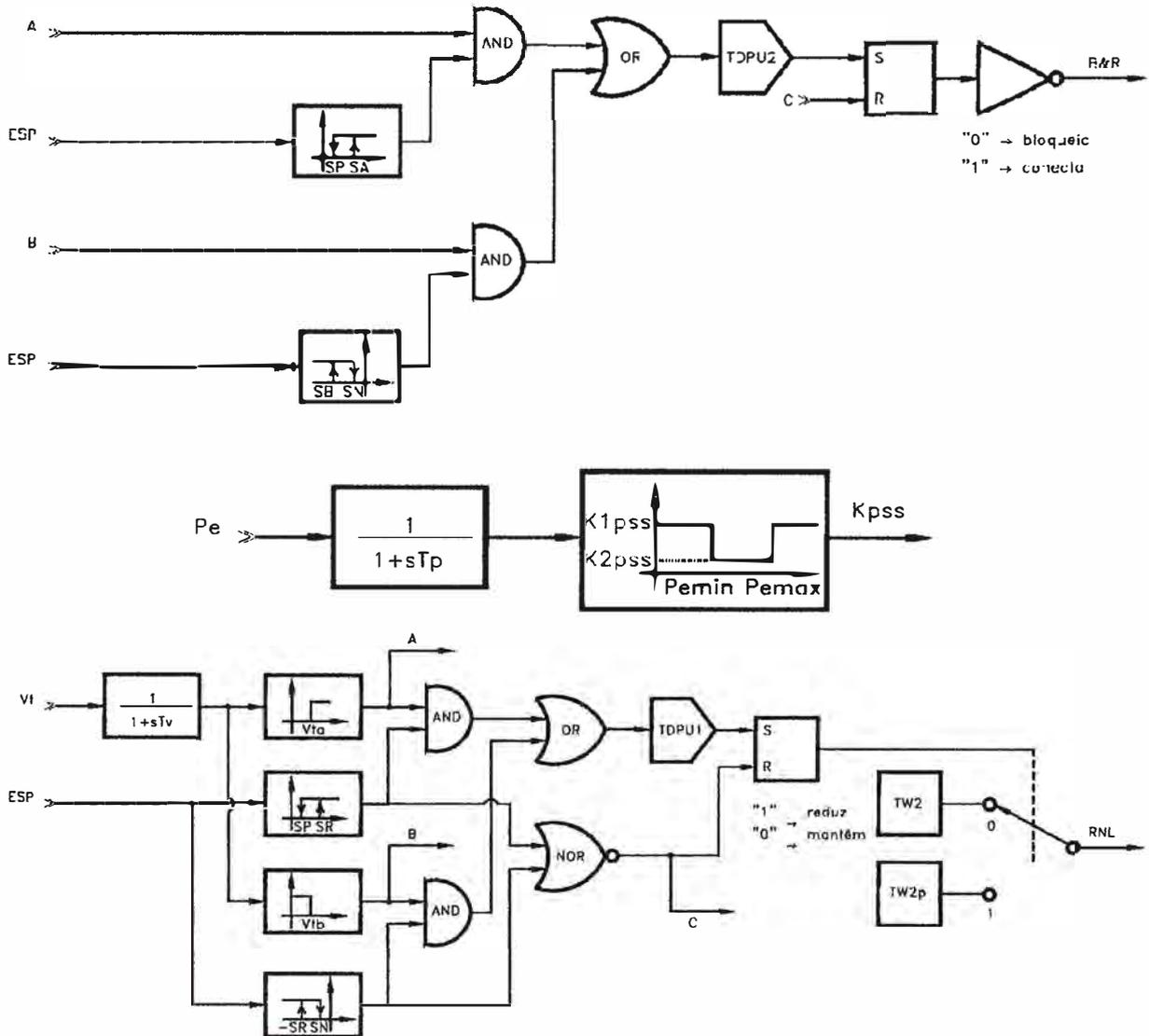
La Fig. 2.11 presenta el diagrama de bloques de la parte lineal del ESP, que procesa la información de la integral de la potencia acelerante. La estructura es bastante simple y consiste en dos filtros del tipo avance, uno del tipo atraso, una función de "reset" y una ganancia ajustable.



**Fig. 2.11 Compensadores del ESP**

**c) Características no Lineales**

La Fig. 2.12 presenta las estructuras no lineales presentes en el ESP: el bloqueo y reconexión automáticos, conmutación de ganancia por nivel de potencia y "reset" no lineal.



**Fig. 2.12 Bloques no lineales: bloqueo y reconexión; conmutación de ganancia y "reset" no lineal**

La salida del estabilizador aún tiene un limitador para evitar excursiones excesivas del voltaje de salida.

## 2.2 Control de Velocidad

En esta sección se trata de algunas estructuras de reguladores de velocidad, como reguladores síncronos, con estatismo permanente y transitorio, con canal independiente para toma de carga, etc., y las razones del uso de estas estructuras.

Sea una unidad generadora alimentando una carga separada, según muestra la figura de abajo:

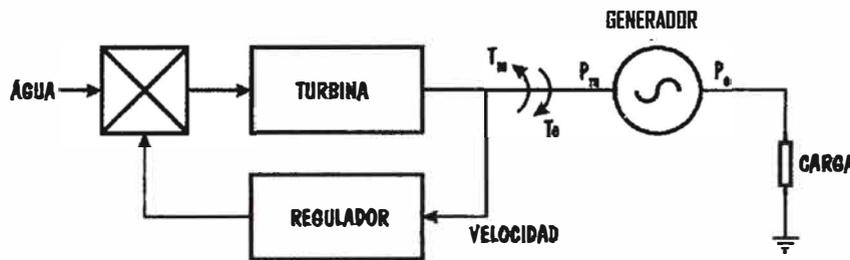


Fig. 2.13 Generador alimentando una carga aislada

Una variación de carga causa un desequilibrio entre los torques mecánico y eléctrico, y consecuente variación de velocidad.

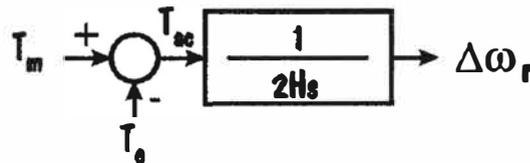


Fig. 2.14 Torques mecánico y eléctrico

En función de variación de potencia:

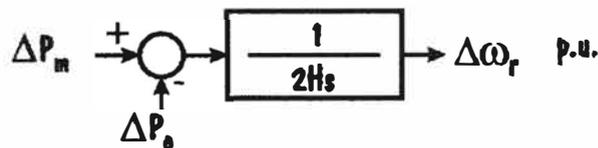


Fig. 2.15 En función de variación de potencia

La carga de un sistema eléctrico de potencia es compuesta de dispositivos como motores, bombas, etc. En el caso de cargas resistivas la potencia eléctrica es independiente de la frecuencia. Para los motores, la potencia eléctrica varía con la frecuencia en función de la variación de la velocidad de estos motores. La característica de dependencia con la frecuencia de una carga compuesta por diversos dispositivos puede ser escrita como:

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D\Delta\omega_r \quad (2.12)$$

Donde:

$\Delta P_L$  = variación de carga no dependiente de la frecuencia.

$D\Delta\omega_r$  = variación de la carga dependiente de la frecuencia.

$D$  = factor de amortiguamiento de la carga.

$D$  es definido como el porcentaje de variación de la carga para un porcentaje de variación en la frecuencia. Por ejemplo, siendo  $D=2$  y ocurriendo una variación del 1% en la frecuencia, la carga varía 2%.

El diagrama de bloques incluyendo el efecto de la amortiguación de la carga se muestra abajo.

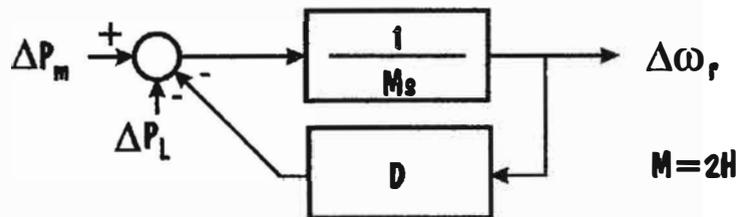


Fig. 2.16 Diagrama de bloques incluyendo amortiguación

O

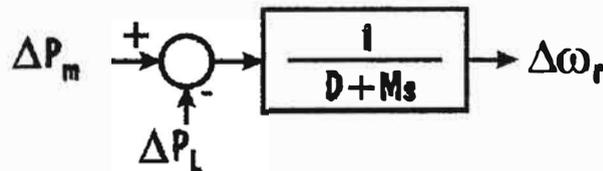


Fig. 2.17 Diagrama de bloques incluyendo amortiguación

### 2.2.1 Regulador Síncrono

La palabra síncrono significa velocidad constante. La figura siguiente muestra un esquema simplificado de un regulador de velocidad síncrono.

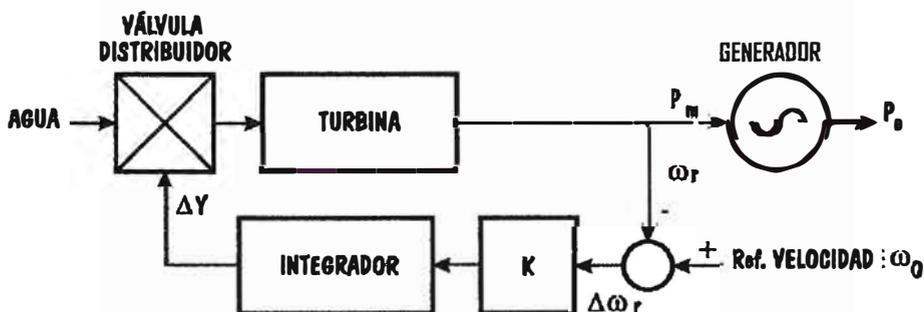


Fig. 2.18 Diagrama de un regulador isócrono

$Y$  = posición de abertura del distribuidor

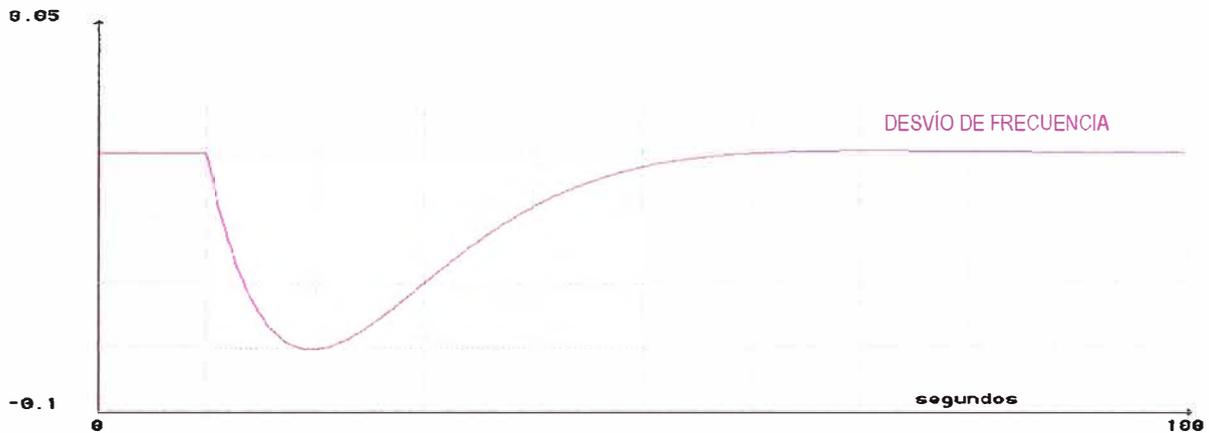
$\omega_r$  = velocidad del rotor

$P_m$  = potencia mecánica

$P_e$  = potencia eléctrica

Debido a la presencia del integrador, el sistema sólo alcanzará el régimen permanente cuando el error de velocidad  $\Delta\omega_r$  sea cero.

La respuesta a un incremento de carga de un sistema con un regulador síncrono se muestra en la figura siguiente.



**Fig. 2.19 Respuesta a una variación de carga para un regulador síncrono**

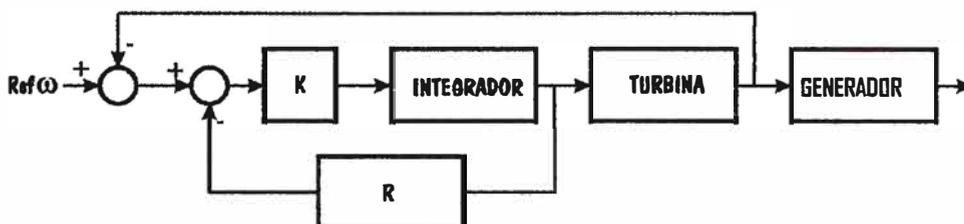
El aumento de la carga  $P_e$  hace bajar la frecuencia con una tasa definida por la inercia de la máquina. Al bajar la frecuencia, por acción del regulador hay un aumento de la potencia mecánica. Esto causa una disminución en la tasa de reducción de la frecuencia y su posterior aumento hasta el restablecimiento de su valor anterior. La potencia mecánica alcanzará el régimen permanente aumentado del valor equivalente al aumento de la carga.

Los reguladores síncronos serían satisfactorios si el generador operase solo en un sistema aislado. Para permitir la división de carga con otros generadores en un sistema multi-máquinas, los reguladores de velocidad deben tener una característica de "caída de velocidad" o estatismo permanente.

### 2.2.2 Regulador con Estatismo Permanente

Para una división de carga estable entre unidades generadoras operando en paralelo, los reguladores de velocidad deben tener una característica de caída de velocidad con el aumento de la carga. Esta característica la denominamos estatismo permanente.

La figura siguiente muestra este tipo de regulador.



**Fig. 2.20 Regulador de velocidad con estatismo permanente**

Representando los bloques por su función de transferencia tenemos el diagrama de abajo.

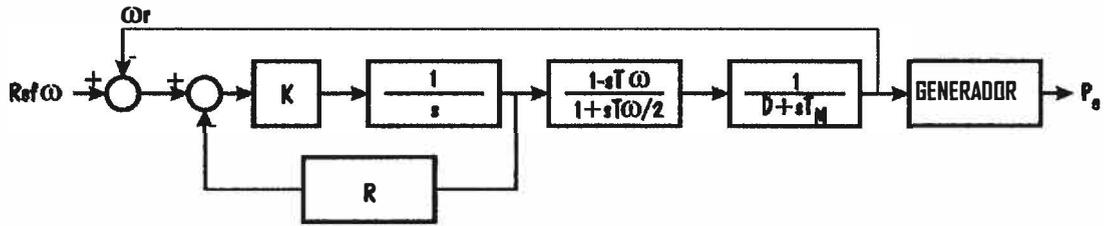


Fig. 2.21 Regulador de velocidad con estatismo permanente

Representando solamente los bloques del regulador y rearreglando:

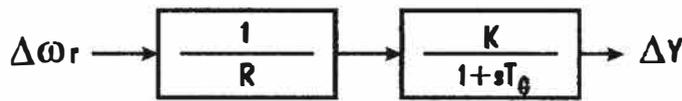


Fig. 2.22 Regulador de velocidad con estatismo permanente

Este regulador es proporcional con ganancia de 1/R.

El valor de R define la característica velocidad x carga en régimen permanente. La relación desvío en velocidad (r) o frecuencia (f) por variación en la abertura del distribuidor (Y) o de potencia (P) es igual a la R, conforme la figura de abajo.

$$\%R = \frac{\%velocidad}{\%potencia} \times 100 \tag{2.13}$$

$$\%R = \left( \frac{\omega_{NL} - \omega_{FL}}{\omega_0} \right) \times 100 \tag{2.14}$$

Donde:

$\omega_{NL}$  = Velocidad en régimen permanente en vacío.

$\omega_{FL}$  = Velocidad en régimen permanente a plena carga.

$\omega_0$  = Velocidad nominal.

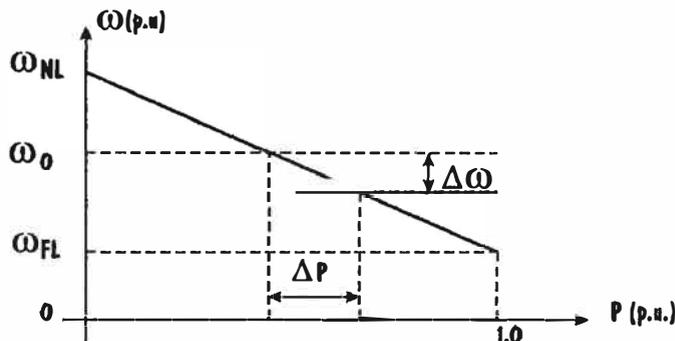


Fig. 2.23 Característica de caída de velocidad de un regulador de velocidad

Un valor bastante usual de R es 5%. Esto significa que al ocurrir una variación del

100% de carga, habrá una variación de 5 % de frecuencia.

Estando dos o más generadores, con reguladores de velocidad con estatismo permanente, conectados a un sistema eléctrico de potencia, ellos tendrán la misma frecuencia. Al ocurrir una variación de carga, ésta será compartida entre ellos.

Sean dos grupos generadores con características de caída de velocidad x potencia indicada en la figura siguiente.

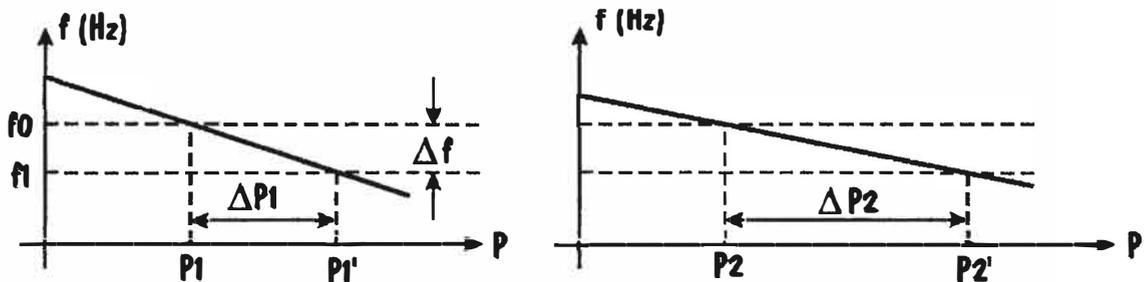


Fig. 2.24 Caídas de velocidad x potencia de dos grupos

Inicialmente los dos grupos están operando con la frecuencia  $f_0$  y suministrando las potencias  $P_1$  (grupo 1) y  $P_2$  (grupo 2). Al ocurrir entonces un aumento de carga  $\Delta P_L$ , habrá una disminución en la frecuencia. Los reguladores de velocidad actuarán para que los grupos suministren esta carga adicional, y la frecuencia se estabilizará en un valor  $f'$ . La cantidad de carga que cada grupo va a suministrar depende de su característica de caída de velocidad x potencia (de su valor de estatismo).

$$\Delta P_1 = P_1' - P_1 = \frac{\Delta f}{R_1} \quad (2.15)$$

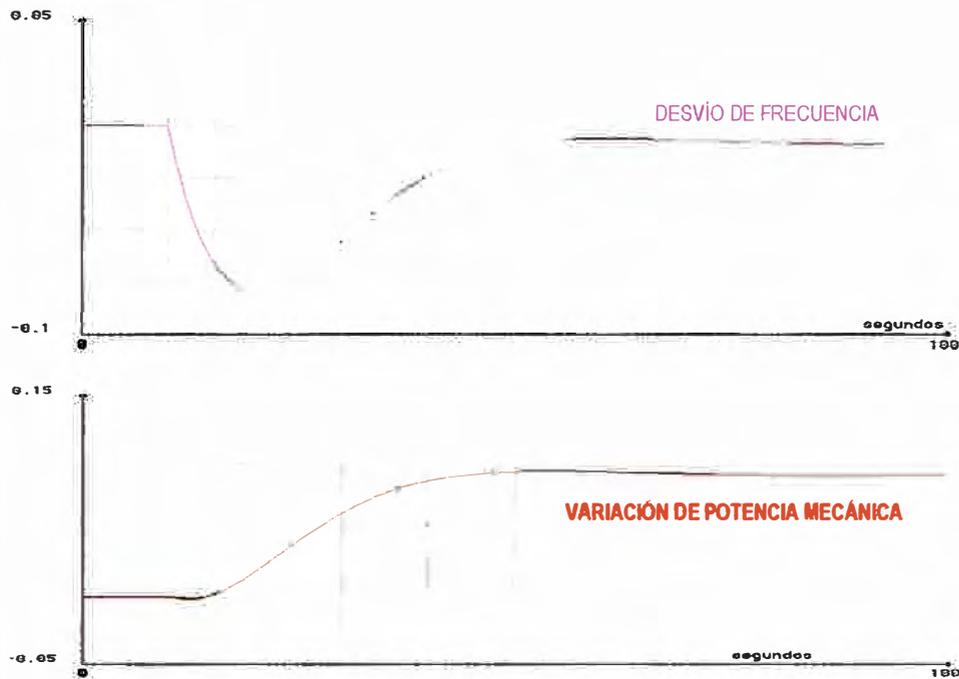
$$\Delta P_2 = P_2' - P_2 = \frac{\Delta f}{R_2} \quad (2.16)$$

De estas ecuaciones se logra:

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (2.17)$$

Como los valores están en p.u. o %, y, si el estatismo es igual, habrá una distribución de potencia entre las 2 máquinas de igual valor en % de sus potencias nominales. No es el caso de la figura anterior, en que el grupo 2 por tener estatismo menor pasará a suministrar más potencia, considerando valores en %.

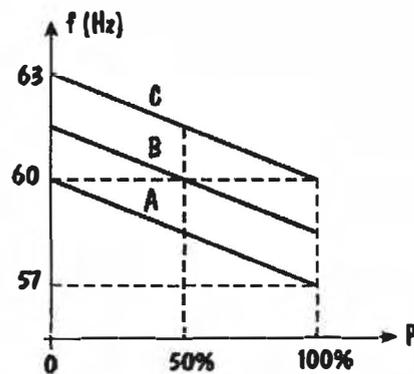
La evolución de la frecuencia y de la potencia a lo largo del tiempo para una unidad generadora con regulador de velocidad con estatismo permanente, después de un aumento de carga, se muestra en la siguiente figura. Debido al estatismo permanente, en régimen permanente hay una desviación de velocidad  $\Delta\omega_{SS}$  con relación a la velocidad inicial.



**Fig. 2.25 Respuesta a una variación de la carga. Regulador con estatismo permanente**

La característica de caída de velocidad x potencia se puede ajustar a través de una entrada denominada "referencia de carga", según se muestra en la figura a continuación.

El efecto de la variación de esta referencia de carga es hacer operar la unidad bajo una nueva característica de caída de velocidad x potencia paralela a la anterior. Se tiene entonces una familia de características de caída de velocidad x potencia en función del valor de la referencia de carga.



**Fig. 2.26 Caída de velocidad x potencia**

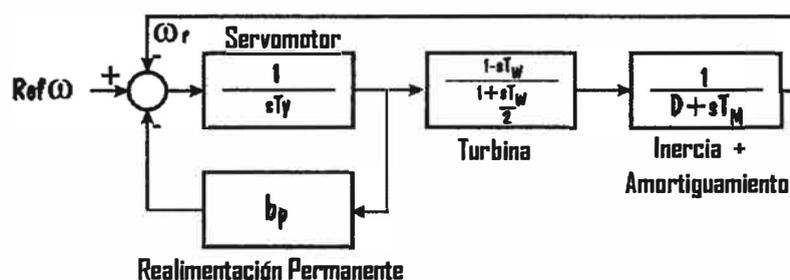
En 60 Hz la característica A resulta a 0% de potencia, la B a 50% y a C a 100%. Así, la potencia de una unidad generadora, a una frecuencia, puede ser ajustada para cualquier valor, mediante el ajuste de la referencia de potencia.

Cuando el generador está alimentando una carga aislada, el ajuste de la referencia de velocidad varía la velocidad de la máquina. Si el generador está conectado a un sistema

interconectado, una variación en la referencia de velocidad (o carga) altera la carga de la máquina, y tiene un efecto menor en la frecuencia del sistema, dependiendo del tamaño relativo de la máquina con el restante de generación del sistema.

### 2.2.3 Regulador con Estatismo Transitorio

No siempre un regulador simple, con sólo una realimentación permanente (conforme figura abajo) es satisfactorio bajo el punto de vista del desempeño dinámico. De hecho, dependiendo de los parámetros de la máquina y de la característica de la carga, podemos tener un sistema inestable para determinados valores del estatismo permanente.

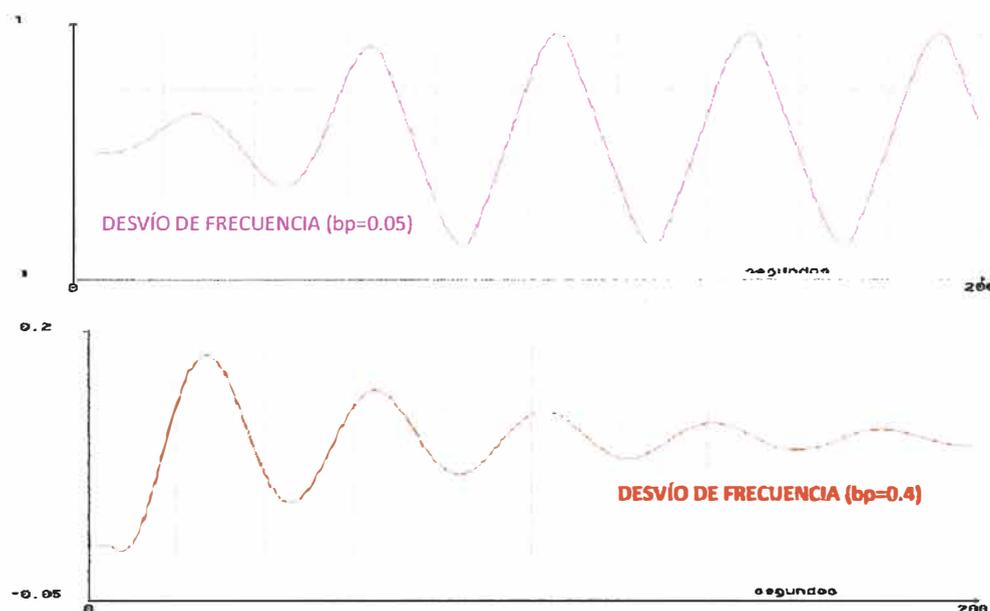


**Fig. 2.27 Regulador simplificado con realimentación permanente**

Así, por ejemplo, sea un sistema con los siguientes parámetros:

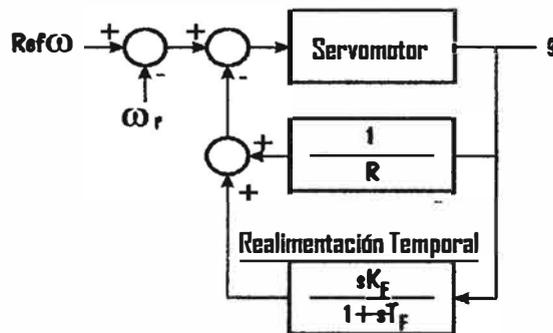
$$T_w = 2s \quad T_M = 10s \quad D = 1 \quad T_y = 0.3$$

Un análisis matemático podrá mostrar que un estatismo de 5 % (o ganancia de 20) resulta el sistema inestable. La figura a continuación muestra la respuesta en el tiempo para un escalón en la referencia del regulador, para diferentes valores de  $b_p$ , donde se observa la cuestión de la inestabilidad con  $b_p$  debajo de determinado valor.



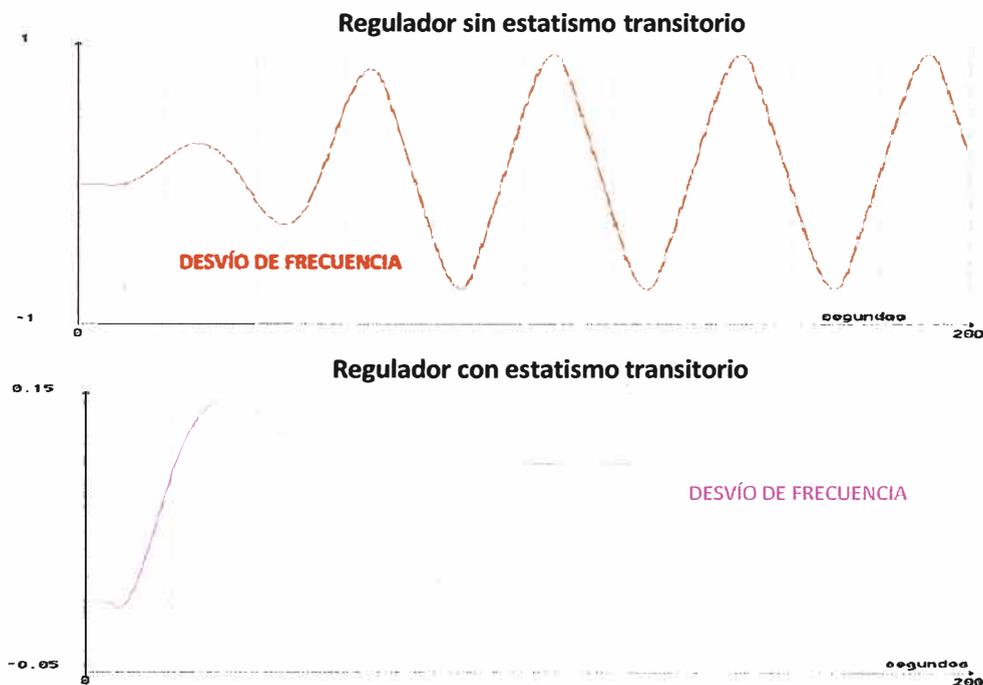
**Fig. 2.28 Respuesta a un escalón en la referencia del regulador sólo con realimentación permanente.**

Para garantizar una operación estable, una característica de caída grande y transitoria, con un largo tiempo de reset debe ser incorporado. Esto puede ser hecho introduciéndose una realimentación según muestra la figura a continuación. Esta realimentación promueve una reducción transitoria de la ganancia (aumento del estatismo) del regulador. Esto hace con que el regulador presente una ganancia baja durante transitorios rápidos de la velocidad y una ganancia alta en régimen permanente. Esta realimentación transitoria es comúnmente denominada de estatismo temporal.



**Fig. 2.29 Diagrama de bloques del regulador con realimentación permanente y transitoria.**

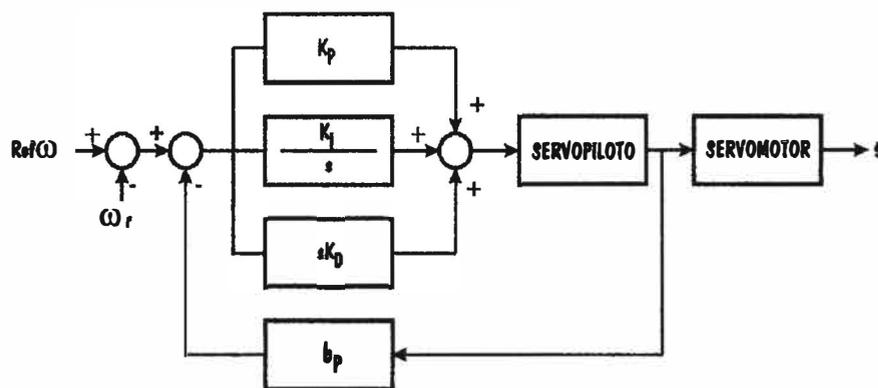
Para el mismo sistema visto anteriormente, sólo con realimentación permanente, en el cual un estatismo del 5% (ganancia= 20) causaba inestabilidad, la introducción de la realimentación transitoria proporciona un desempeño estable, según se puede ver en la próxima figura.



**Fig. 2.30 Respuesta a un escalón en la referencia del regulador con realimentación permanente y transitoria.**

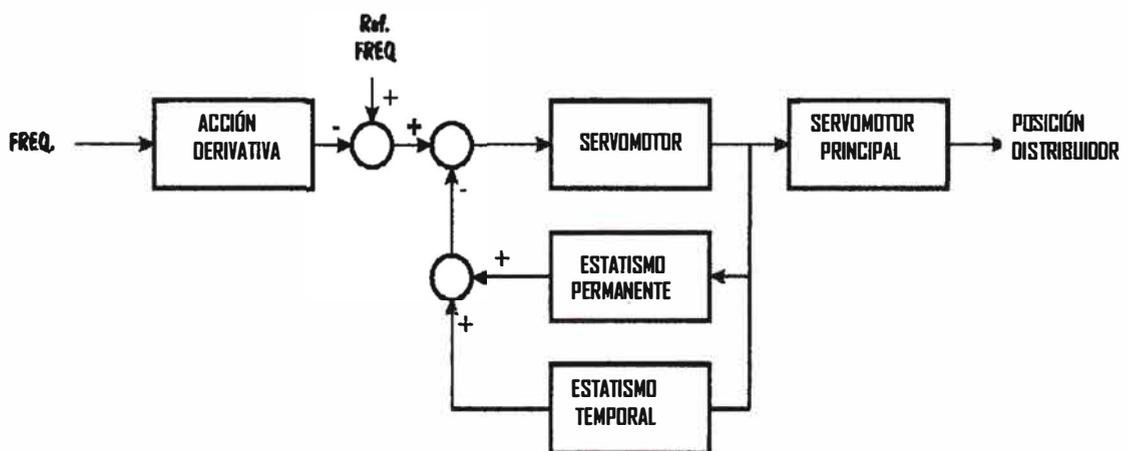
### 2.2.4 Reguladores PID

Muchos reguladores de velocidad son de acción PID (proporcional, integral, derivativo) como muestra la figura 2.31. Permiten que se tenga una respuesta rápida y también reducción de ganancia transitoria y aumento de la ganancia en régimen permanente. La acción derivativa (aumento de ganancia transitoria) en general no se usa ( $K_D = 0$ ) pues muchas veces causa oscilación excesiva en la señal de control y en los primeros componentes del actuador. En el caso de operación aislada (o con máquina en vacío), el uso de la acción derivada resulta un mejor desempeño, principalmente en operación aislada.



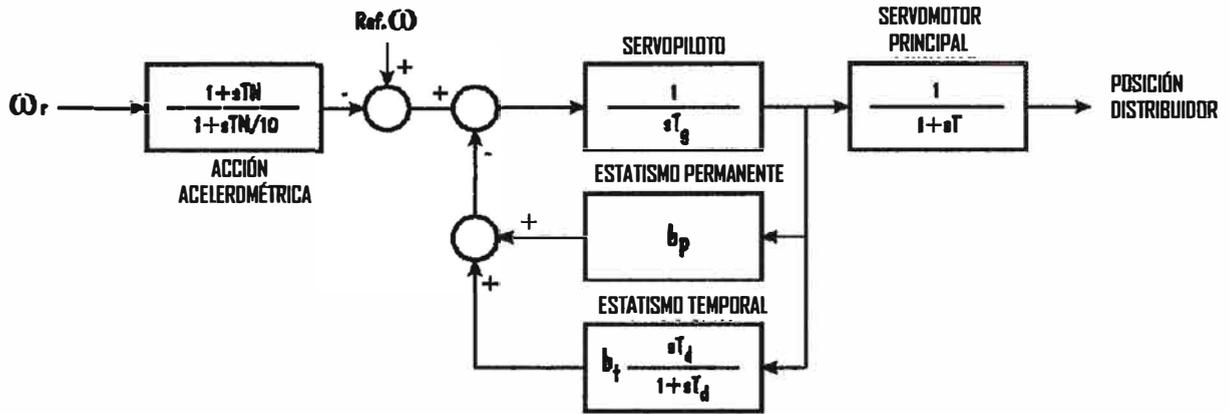
**Fig. 2.31 Regulador PID**

Con la ganancia derivativa igual a cero, el regulador es un controlador PI. Existen otras formas de realizar un regulador PID o PI, además de la presentada en la figura anterior. Una de las comúnmente utilizadas es la de la figura a continuación.



**Fig. 2.32 Regulador de velocidad PID realizado con estatismo temporal y bloque acelerométrico**

Expresando los bloques del diagrama de la figura anterior como función de transferencia, tenemos el siguiente diagrama de la Fig. 2.33.



**Fig. 2.33 Diagrama de bloques de regulador de velocidad de acción ID realizado con estatismo transitorio y acción acelerométrico**

Podemos relacionar las ganancias PID de la forma clásica con las del diagrama de arriba a través de las siguientes relaciones:

$$K_p = \frac{T_d + T_n}{T_d} \cdot \frac{1}{b_t} \tag{2.19}$$

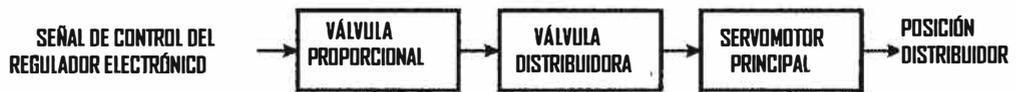
$$K_I = \frac{1}{b_t T_d} \tag{2.20}$$

$$K_D = \frac{T_n}{b_t} \tag{2.21}$$

### 2.2.5 Sistema Aceite-Dinámico

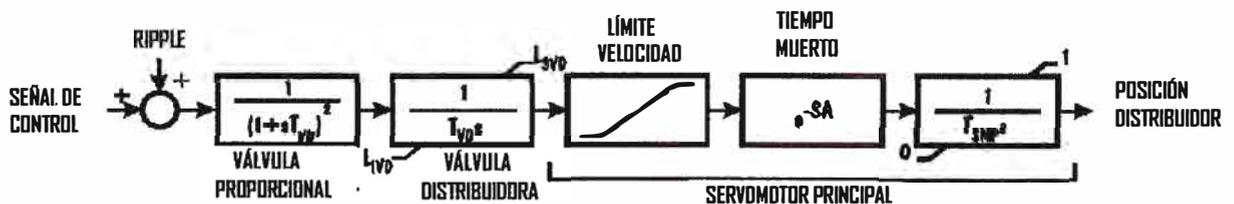
El sistema aceite-dinámico comprende básicamente el actuador electro-hidráulico y el servomotor del distribuidor (y de las palas en el caso de turbinas Kaplan).

El esquema del actuador varía conforme el fabricante, aunque todos tengan una válvula transductora electro-hidráulica (o válvula proporcional) y una válvula distribuidora. Un esquema que hemos utilizado se muestra bajo la forma de diagrama de bloques en la siguiente figura.



**Fig. 2.34 Esquema de un actuador**

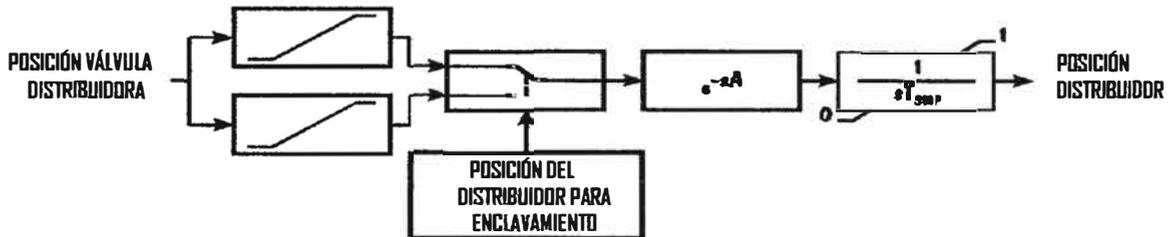
Detallando el diagrama anterior, considerando la función de transferencia, tenemos el siguiente:



**Fig. 2.35 Diagrama de bloques del sistema aceite dinámico**

En el diagrama de arriba, "ripple" (o dither) es una tensión CA aplicada a la válvula proporcional para minimizar el efecto de la zona muerta y evitar problemas de trabamiento de las partes mecánicas.

En el diagrama arriba no fueron consideradas algunas no linealidades como histéresis en el servomotor principal y la reducción de velocidad en el movimiento final de cierre (cushioning). Para contemplar esta reducción de velocidad tendríamos que alterar el bloque de límite de velocidad del servomotor en función de la posición del mismo.



**Fig. 2.36 Diagrama de bloques para el servomotor principal**

## **CAPÍTULO III**

### **CONSIDERACIONES PARA LA MODERNIZACIÓN DE LOS SISTEMAS DE REGULACIÓN Y CONTROL Y LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS**

Luego del conocimiento del reporte del consultor contratado por el COES recomendando el cambio de los reguladores de tensión y velocidad de la central hidroeléctrica, la jefatura a cargo de las centrales tomó la iniciativa y puso en marcha la tarea del reemplazo asumiendo la responsabilidad técnica de su ejecución. Previamente se tuvo que tomar en cuenta las consideraciones técnicas para la definición del proyecto teniendo la visión previa de una modernización operativa de la central en cuestión, a fin de plasmarlo en la elaboración de las especificaciones técnicas en las cuales se definen los alcances de ingeniería de las instalaciones nuevas. En este capítulo se muestran dichas consideraciones para la modernización.

Esta central debido a sus características dentro del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional se desempeña como una de las centrales de regulación primaria de frecuencia, siendo el tipo de instalación que estamos tratando la de una central de potencia de punta, el cual cuenta con un gran reservorio de almacenamiento de agua precisamente para la regulación de la generación.

A continuación se muestran los aspectos básicos que se requieren para modernizar una central hidroeléctrica tanto en los sistemas de regulación de tensión como los de velocidad.

Como sabemos, los dos parámetros a controlar en una central hidroeléctrica son la tensión y la frecuencia, dichos parámetros son controlados por medio de los sistemas de excitación (campo) que conforman la regulación de tensión y los sistemas de regulación de velocidad (entrada del caudal de agua). Analizaremos cada uno de estos aspectos.

#### **3.1 Modernización de los Sistemas de Excitación. Regulación de Tensión**

La modernización de los Sistemas de Excitación es una opción importante para las centrales del país, pues la mayoría de ellas son de construcción antigua operando en un sistema con mayores exigencias de eficiencia y confiabilidad.

Un sistema de excitación analógico está conformado por:

- El regulador de tensión propiamente dicho, el cual es un mecanismo electromecánico complejo para las regulaciones manual y automática apoyadas por un conjunto de reóstatos los cuales son accionados por motores eléctricos de rangos grandes y pequeños. Asimismo, se considera como parte del regulador de tensión la excitatriz auxiliar quien amplifica las señales de regulación y proporciona la excitación a la excitatriz principal rotativa.
- La excitatriz rotativa impulsada ya sea por un motor primo independiente de corriente alterna o accionada por una turbina hidráulica, o acoplada al eje del generador para su impulsión.

El asunto fundamental en la modernización del sistema de excitación de una máquina síncrona es tomar la decisión sobre mantener o cambiar la excitatriz rotativa, teniendo en cuenta que la solución pasa necesariamente por el cambio del regulador de tensión, como lo veremos a continuación.

Las razones para la modernización, alternativas y especificaciones técnicas básicas se muestran a continuación.

### **3.1.1 Razones para la Modernización**

Se puede considerar hasta cuatro razones básicas que nos conduzcan a una propuesta de modernización de un sistema de excitación:

#### **a) Por el lado de los equipos, problemas de mantenimiento:**

En los equipos del sistema de excitación pueden ocurrir los problemas siguientes:

- La obsolescencia de los componentes;
- Indisponibilidad de repuestos;
- El aumento natural de la actividad de mantenimiento correctivo.

Que conducen a que el sistema se encuentre inoperativo debido a las fallas frecuentes e intermitentes causados por los problemas de desgaste y descalibración frecuente de los elementos electromecánicos del regulador de tensión, como en el caso de la planta que nos convoca, el regulador tipo BJ-30, cuyo fabricante discontinuó hace mucho tiempo el suministro de repuestos para este dispositivo así como de los diferentes tipos de reóstatos y los interruptores de campo. Asimismo, pueden existir problemas en la excitatriz rotativa, como el desgaste del conmutador, fallas de aislamiento y la necesidad de un rebobinado.

#### **b) Exigencias del sistema eléctrico:**

- El crecimiento del sistema eléctrico y el nivel de exigencias en cuanto al desempeño de los reguladores, pueden no garantizar las estabilidades dinámica y transitoria;
  - El comportamiento inadecuado del sostenimiento de la tensión en el área de influencia;
  - Las unidades generadoras requieren señales adicionales para la aplicación de la función de "estabilizador de sistemas de potencia", y de aplicación de limitadores que garanticen la continuidad operativa de la unidad dentro de su curva de capacidad.
- c) La seguridad de los equipos, de las personas y del sistema:**
- El riesgo de operación de las unidades, cuya causa, normalmente, es la operación degradada, con pérdidas de funcionalidades.
- d) Por el entorno tecnológico actual, tenemos:**
- El uso de tecnologías más modernas, con recursos de apoyo al mantenimiento y mejoría de performance, que implican para la central en ganancias de utilidades económicas y retorno de la inversión en plazos más cortos;
  - El uso de tecnología digital, con los recursos poderosos de conectividad, permitiendo que datos vitales de operación y mantenimiento sean generados y enviados a las oficinas de centro de control o de gestión en tiempo real, lo cual es un atractivo evidente para la modernización con la operación desasistida.

### **3.1.2 Funciones del Sistema de Excitación**

La modernización de un sistema de excitación debe llevarse a cabo para el cumplimiento de las funciones siguientes:

- Regular el voltaje o la relación entre voltaje y carga reactiva en todo el rango de la región de operación;
- Regular el voltaje de salida dentro de los límites aceptables de trabajo, en condiciones de disturbios severos en el sistema de potencia;
- Propiciar una excitación rápida en el arranque del grupo sin sobre elevación del voltaje de salida;
- Responder adecuadamente a los comandos del operador o al sincronizador automático en vacío;
- Poseer elevada velocidad de respuesta para corregir las variaciones impuestas por variación de carga, generación o por maniobras en el sistema;

- Mantener valores aceptables de voltaje de campo ante la ocurrencia de un cortocircuito trifásico en las barras de alta tensión de la unidad;
- Dar soporte de torque sincronizante al sistema ante condiciones de disturbios severos;
- Compensar parte de la caída de voltaje en la reactancia del transformador elevador o proveer una característica adecuada de voltaje en función de la carga reactiva a fin de propiciar el paralelo de otros generadores en la propia barra de salida;
- Limitar dinámicamente la corriente de excitación de acuerdo con la característica de capacidad del propio campo, independientemente de la eventual necesidad de aumento de excitación que la malla de control del voltaje de salida imponga;
- Limitar dinámicamente la operación de la máquina en regiones próximas al límite de estabilidad, independientemente de la necesidad de disminución de la excitación que la malla de control de voltaje de salida imponga;
- Contribuir de manera efectiva para la amortiguación de oscilaciones electromecánicas que aparezcan en el sistema de potencia o en la propia unidad;
- Limitar dinámicamente la operación de la máquina en condiciones de sobreflujo, limitando la relación Volts/Hertz;
- Limitar la corriente de armadura, referente a la carga reactiva, independientemente de la necesidad de aumento o disminución de excitación que el control de voltaje imponga;
- Se puede exigir que el Sistema de Excitación sea capaz de mantener el voltaje en la barra de alto voltaje dentro de una faja especificada, ofreciendo, aún, una división equitativa de la carga reactiva de las unidades en paralelo (control conjunto).

### **3.1.3 Alternativas de Modernización**

Dependiendo de las razones y objetivos de la modernización, se puede adoptar la alternativa adecuada teniendo en cuenta los dos casos originados por los problemas de mantenimiento del sistema de excitación: a) debido a los problemas en el regulador de tensión, y b) debido a los problemas en la excitatriz rotativa:

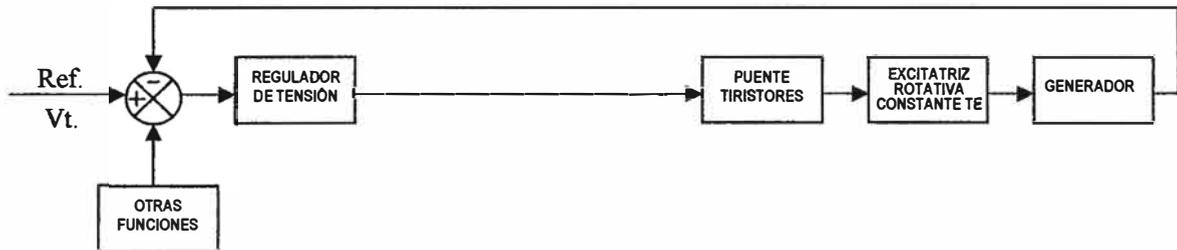
#### **a) Debido a problemas en el regulador**

Si existen problemas localizados sólo en el regulador de tensión, se tendrían tres alternativas:

##### **i) Modernización Parcial:**

Reemplazar solamente el regulador de tensión.

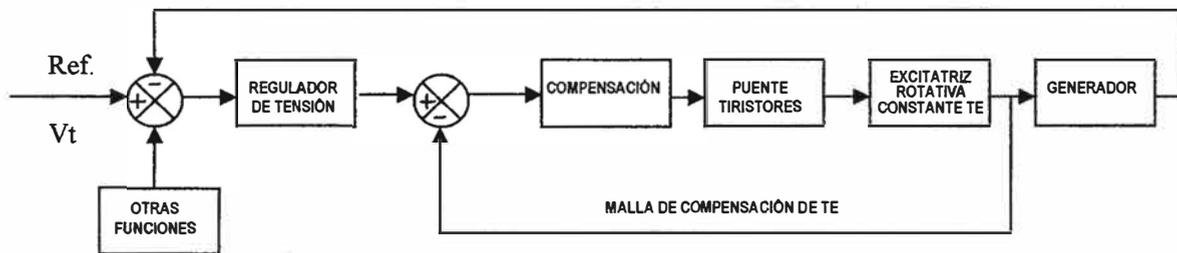
La Fig.3.1 muestra un diagrama de bloques de un regulador electrónico controlando una excitatriz rotativa, para el caso de una modernización parcial, en el que permanece el retardo referente a la constante de tiempo  $T_E$  de la excitación rotativa.



**Fig. 3.1 Modernización parcial: regulador electrónico controlando una excitatriz rotativa.**

### ii) Modernización Parcial con Compensación:

Se puede mantener una excitatriz rotativa y aplicar una compensación de retardo introducida a la constante de tiempo  $T_E$  de la excitatriz rotativa, como se muestra en la Fig. 3.2.



**Fig. 3.2 Modernización parcial: regulador electrónico controlando una excitatriz rotativa con compensación de la constante de tiempo  $T_E$ .**

### iii) Modernización Total:

Considerando los futuros costos de mantenimiento de la excitatriz rotativa, puede ser ventajoso hacer el cambio de este equipo.

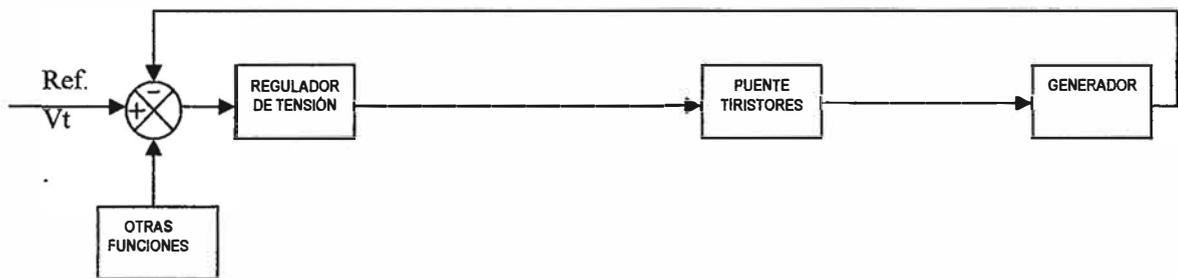
#### b) Debido a problemas en la excitatriz rotativa

Cuando los problemas están visiblemente localizados en la excitatriz rotativa, la alternativa natural sería sólo:

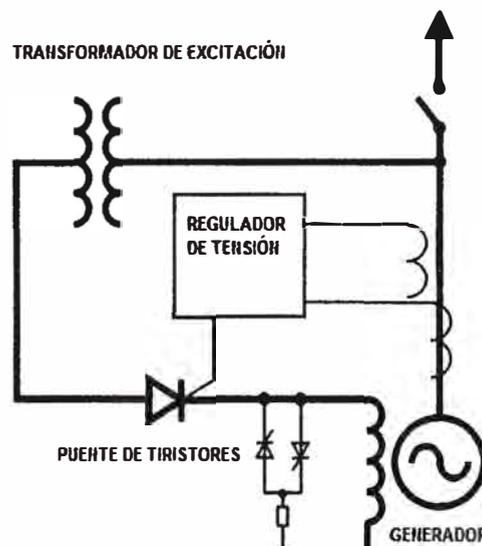
#### i) Modernización Total:

En la modernización total se cambia el regulador de voltaje con un nuevo regulador con tecnología moderna, y se cambia la excitatriz rotativa por un conjunto previsto de un transformador de excitación y el puente de tiristores, dimensionados para atender las especificaciones de desempeño y contribuir a la estabilidad dinámica y transitoria de la máquina en el sistema eléctrico.

La Fig.3.3 muestra un diagrama de bloques de un regulador electrónico con una excitatriz estática, en el caso de la modernización total, en que es eliminada la constante de tiempo TE de la excitatriz rotativa.



**Fig. 3.3 Modernización total: regulador electrónico con excitatriz estática.**



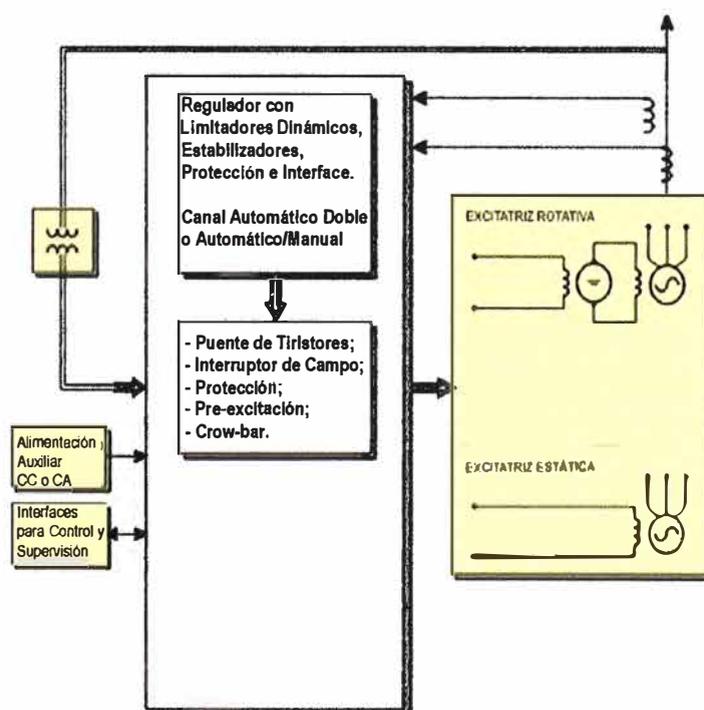
**Fig. 3.5 Esquema básico de un sistema de excitación estática.**

Es claro que, mantener la excitatriz rotativa, aun considerando la compensación de retardo de la constante de tiempo, torna el suministro más económico inicialmente. Sin embargo, con el tiempo los gastos fijos de la empresa pueden aumentar con respecto a la modernización total (con excitación estática) y el rendimiento de la máquina se degrada en su conjunto. Las razones son las siguientes:

- La necesidad periódica de cambio de escobillas es un costo adicional, no sólo por el valor del juego de escobillas sino también por la indisponibilidad que genera, principalmente en centrales de factor de planta alto;
- La degradación del aislamiento de la excitatriz que necesita de forma periódica limpieza y en un horizonte de tiempo más largo, rebobinado con los costos asociados que ello implica;

- La necesidad de rectificar periódicamente el colector de la excitatriz generando costos e indisponibilidades;
- La degradación del aislamiento de los polos del generador, causado por el polvo de las escobillas con el flujo del aire de refrigeración, que tiende a depositarse en la zona entre polos cerca del anillo magnético, y con el tiempo, esta acumulación puede provocar pérdidas a tierra;
- Si la máquina posee algún tipo de fuga de aceite bajo la forma de vapor (por ejemplo de los cojinetes), la combinación de aceite con polvo de escobillas aumentará significativamente la intervención de los equipos de mantenimiento;
- El costo asociado a la limpieza de los polos es bastante alto y genera indisponibilidad también;

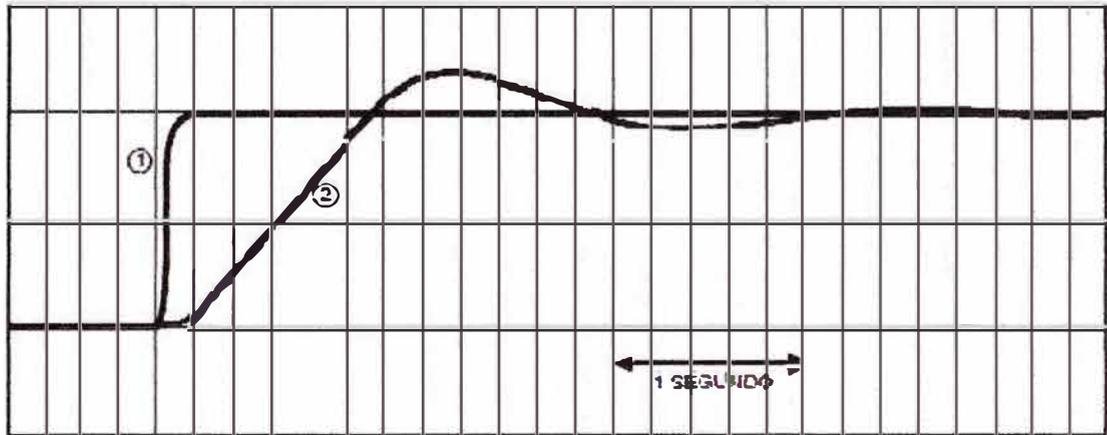
En suma, se puede adoptar la alternativa de mantener, o no, la excitatriz rotativa existente. En ambos casos el regulador de tensión debería ser digital, basado en microprocesadores. Para mejorar la confiabilidad de los equipos puede tener dos canales independientes de regulación, uno principal automático y otro de respaldo que trabajaría en caso el principal presente alguna falla y el cual operaría también de forma automática, con transferencia de información entre los dos canales.



**Fig. 3.4 Diagrama de bloques con soluciones de modernización parcial y total de los sistemas de excitación.**

### 3.1.4 Rendimiento y Conclusiones

En términos de rendimiento, la Fig. 3.6 compara las respuestas en vacío de un generador típico con una excitatriz estática (curva 1) y una excitatriz rotativa (curva 2), ambas controladas por un regulador electrónico, con una estructura de control clásico de tipo PID.

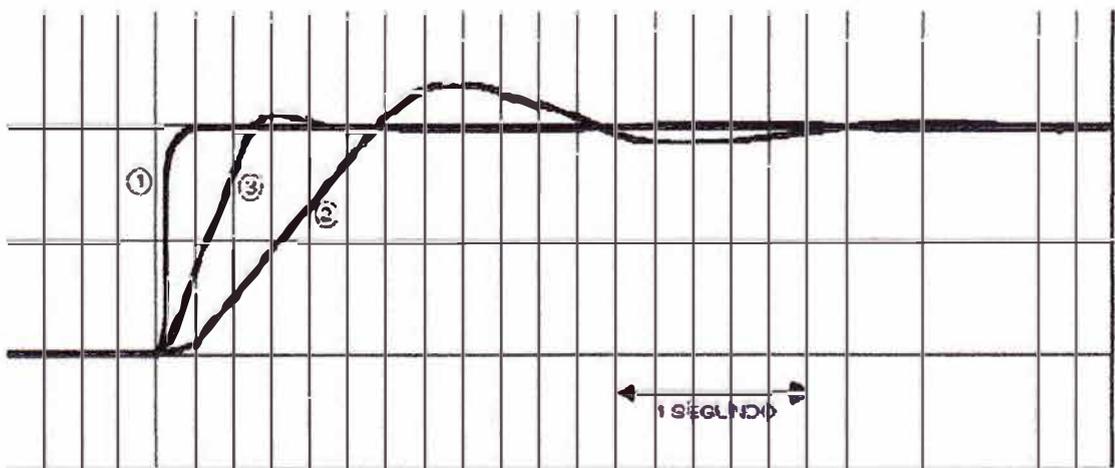


**Fig. 3.6** Respuesta típica a un escalón en vacío.

**Curva 1:** respuesta de una excitatriz estática

**Curva 2:** respuesta de una excitatriz rotativa

La solución de la modernización parcial con compensación de la constante de tiempo cuando no se reemplaza la excitatriz rotativa, como se muestra en la Fig. 3.2, proporciona una respuesta para señales pequeñas, mucho más rápida y estable como se muestra en la curva 3 de la Fig. 3.7, en donde para la comparación de las respuestas se repiten las curvas 1 y 2.



**Fig. 3.7** Respuesta típica a un escalón en vacío.

**Curva 1:** respuesta de una excitatriz estática

**Curva 2:** respuesta de una excitatriz rotativa

**Curva 3:** respuesta de una excitatriz rotativa con compensación de la constante de tiempo.

Finalmente, teniendo en cuenta las exigencias del sistema eléctrico se puede llegar a las conclusiones siguientes, respecto a las alternativas de modernización:

- Cuando la razón de la modernización es un requisito impuesto por las necesidades del sistema eléctrico, se requiere un rendimiento mejor que el que se muestra en la curva 2, la modernización parcial.
- Dependiendo del nivel de exigencias formuladas por el sistema eléctrico, es indispensable un cambio de la excitatriz rotativa, incluso si ella no presenta problemas de mantenimiento para obtener un rendimiento similar a la curva 1.
- Con la modernización total se proporciona una contribución significativa a la estabilidad transitoria o mejorar el perfil de tensión en determinadas zonas o aumentar la contribución de torques amortiguadores. En cambio, al mantener la excitatriz rotativa es necesario estar consciente que la amortiguación de oscilaciones electromecánicas de frecuencia más elevada no será semejante a aquel logrado con la utilización de excitatriz estática;
- Un conjunto excitatriz estática y el transformador de excitación de tamaño adecuado son capaces de cumplir con los requisitos y obtener respuestas como se muestra en la curva 1.

### **3.1.5 Especificaciones Básicas del Regulador de Tensión y Normas**

Para realizar el cambio de los reguladores de tensión existentes, en una central hidroeléctrica por reguladores de tensión estáticos, básicamente necesitamos tener en consideración algunos datos de la central a modernizar; por ello se presenta a continuación los datos necesarios, funcionalidades de un regulador de tensión y especificaciones del mismo; así como también del transformador de excitación.

#### **a) Datos Necesarios**

El regulador de tensión deberá controlar un puente de tiristores estático y un transformador de excitación con potencia compatible con la corriente de campo de la excitatriz.

Las informaciones necesarias para dimensionar el puente y el transformador son:

- Corriente máxima del campo de la excitatriz: Acc
- Corriente en vacío del campo de la excitatriz: Acc
- Tensión máxima del campo de la excitatriz: Vcc
- Resistencia del campo de la excitatriz:  $\Omega$
- Tensión nominal del generador: V

## **b) Funciones del Regulador de Tensión**

Las funciones básicas que realiza o debe realizar un nuevo regulador de tensión son las siguientes:

- Tecnología digital basada en microprocesador.
- Regulación automática de tensión, con doble canal redundante e independiente.
- Compensación de potencia reactiva.
- Limitador de máxima excitación.
- Limitador de mínima excitación.
- Limitador de Volts/Hz.
- Excitación inicial ajustable.

Funciones Opcionales:

- Medición de temperatura del campo del generador.
- Protección de falla para tierra en el rotor.
- Estabilizador de sistemas de potencia, de potencia acelerante.
- Comunicación en serie.
- Software de programación del regulador.

## **c) Especificación Básica del Regulador**

- Algoritmo de control PID o equivalente.
- Regulación de tensión con error menor que 0,5%
- Banda de regulación ajustable del 80% a 120%
- Tecnología del regulador: electrónica digital (con microprocesador)
- Doble canal de regulación automática con canales independientes, rastreo automático entre los canales y circuitos de transferencia entre ellos.
- Alteración de ajustes realizados aún con la máquina en operación.
- Construcción: tarjetas electrónicas moduladas del tipo de encaje (plug-in) alojadas en un rack industrial.
- Suministro del rack de las tarjetas electrónicas y equipos en cubículo industrial.

## **d) Especificación del Transformador de Excitación:**

- Transformador seco en epóxi con blindaje electrostático, conexión estrella/triángulo difiriendo la conexión dependiendo de la central a modernizar.
- Tensión primaria igual a la tensión del generador
- Tensión secundaria y potencia serán función de la tensión y corriente máxima

suministrada por el puente de tiristores.

- Protecciones con cortacircuitos en el lado de alta o relés de sobrecorriente.

El transformador puede ser instalado fuera del cubículo del sistema de excitación, junto al generador.

#### e) **Especificación del Puente de Tiristores**

- Trifásica de onda completa, con fusibles de acción ultra-rápida en la entrada, y protección contra sobrecorriente.
- Fusibles del puente con señalización de quemado.

Para alimentar el campo del generador, el puente puede ser doble, de modo que al fallar un puente, el otro continúe alimentando normalmente. Esto es muy importante pues con un doble puente se garantiza, la continuidad del servicio de la máquina, sin necesidad de que la unidad generadora realice una parada para cambio del puente quemado. El colocar un doble puente es más costoso, pero dependiendo de la carga que alimenta la unidad generadora y para mantener la continuidad del servicio, el costo se justificaría.

#### f) **Circuitos de Comando y Supervisión**

Se debe tomar en consideración para los circuitos de comando y supervisión lo siguiente:

- Llaves aumenta-disminuye.
- Llaves excita-desexcita.
- Indicadores de tensión del campo.
- Indicadores de corriente del campo.
- Circuito de protección y desconexión.
- Interfaces para comando y supervisión remota. En la central hidroeléctrica, en muchos casos se tiene el panel de control de alarmas las cuales pueden ser integradas al sistema de excitación; sólo es necesario saber qué alarmas y/o señales se desea visualizar en el panel del sistema de excitación.

#### g) **Interruptor de Campo**

Tenemos que tomar también en consideración información del interruptor de campo:

- Conocer si existe y si está en el circuito del campo de la excitatriz o del generador.
- Observar si existe resistor de descarga del campo.
- Analizar si se puede mantener, o si se tiene que suministrar una alarma.

**h) Informaciones Adicionales Necesarias:**

- Tensión del banco de baterías y capacidad (CC)
- Tensión del servicio auxiliar (AC)
- Tensión y relación de los TPs del generador. Cantidad y tipo de conexión (trifásico, delta abierto, etc.)
- Corriente y relación de los TCs del generador. Cantidad.
- Relación del shunt existente.

Datos del Generador:

- Potencia del Generador
- Tensión de Salida
- Frecuencia
- Factor de Potencia
- Tensión de Campo Nominal
- Corriente de Campo Nominal

**i) Normas Técnicas Básicas**

Las normas básicas adoptadas para el suministro de Sistemas de Excitación son:

IEC - International Electrotechnical Commission, que tratan de requisitos de aislamiento, programabilidad, compatibilidad electromagnética;

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers, que tratan, principalmente de aspectos de los modelos y funcionalidades.

**3.2 Modernización de los Sistemas de Velocidad. Regulación de Frecuencia****3.2.1 Situación Existente Típica**

Generalmente los reguladores de velocidad son mecánico-hidráulicos o electrohidráulicos con dispositivos mecánicos y eléctricos antiguos, desgastados y obsoletos.

Presentan las siguientes características básicas:

- Presión de aceite de trabajo baja;
- Sensor de velocidad por péndulo mecánico centrífugo;
- Accionamiento de bombas y del péndulo por medio de correas (u otro);
- Varias fases de amplificación hidráulica;
- Realimentaciones mecánicas por astas o cables de acero;
- Comandos por volantes o motores;

- Arranque y parada manual con intervención del operador;
- Indicadores mecánicos;  
Presentan los siguientes problemas:
- Desajustes causados por paradas, desgaste de las partes mecánicas y trabamientos;
- Proceso de partida con retardo;
- Desempeño malo en vacío y atrasos en la sincronización de la unidad generadora;
- Desempeño malo en operación aislada con grandes variaciones y oscilaciones de frecuencia;
- Dificultades de definición e implementación de ajustes;
- Falta de recursos para automatización, comando y supervisión remota;
- Escasez y/o falta de componentes eléctricos y mecánicos de reserva;
- Costo excesivo de mantenimiento;
- Aumento significativo del tiempo de indisponibilidad de la unidad generadora;

### **3.2.2 Objetivos Principales para la Modernización**

Las alternativas de modernización, pueden tener los siguientes objetivos:

- Eliminación de realimentaciones mecánicas;
- Eliminación de correas de accionamiento;
- Eliminación del péndulo centrífugo;
- Reducir costos de mantenimiento, los tiempos de indisponibilidad de operación y el índice de fallas;
- Restablecer la confiabilidad operativa y mejorar el desempeño de la regulación;
- Automatizar el control y/o hacer la operación desasistida (sin operador).

### **3.2.3 Alternativas de Modernización**

Similar a los sistemas de regulación de tensión, se puede hacer una modernización parcial o total del sistema de regulación.

#### **a) Modernización Total**

En el caso de una central pequeña, se puede recomendar una modernización total, cuya característica principal consiste en elevar la presión del sistema de aceite a valores como 60, 120 kgf/cm<sup>2</sup>, lo que tornaría los equipos mecánicos más compactos.

En este caso es necesario cambiar:

- Todo el sistema de aceite presurizado, como bombas, tanques de aceite, etc.;
- El servomotor principal;

- Las válvulas distribuidoras y de comando del servomotor principal;
- Todo el regulador mecánico, con péndulo, válvulas, astas y realimentaciones mecánicas.

Juntamente con la modernización total sería necesario colocar:

- Un actuador electro-hidráulico que transforma la salida electrónica del regulador en comandos hidráulicos, formado por filtros de aceite de control, válvula electro-hidráulica de acción proporcional con capacidad de comandar el servomotor principal;
- Un nuevo servomotor compatible con la potencia requerida para accionar los alabes o paletas según el tipo de turbina de la central hidroeléctrica;
- Una unidad hidráulica formada por tanque de presión, reservorio de aceite, bombas de aceite, dispositivos de comando, supervisión y protección, etc.

#### **b) Modernización Parcial**

Dependiendo del porte de la unidad generadora, y principalmente de las dimensiones y capacidad del sistema de aceite, y con el objetivo de reducir los costos de la modernización, se puede adoptar por una alternativa parcial, cuya característica principal consiste en mantener todo el sistema de aceite existente, manteniéndose la misma presión, e introduciéndose mejoras, a criterio del usuario.

En este caso:

- Se mantiene el servomotor principal existente;
- Se mantiene el sistema de aceite existente, pudiéndose cambiar las bombas accionadas por correas por moto-bombas, si fuese necesario;
- Cambiar el regulador mecánico por un nuevo actuador electro-hidráulico para controlar directamente el servomotor principal existente o la válvula distribuidora principal que controla el referido servomotor.
- La válvula distribuidora de comando de los servomotores es un equipo muy robusto, y usualmente se aprovecha y se mantiene. En este caso, una nueva válvula proporcional, con un proyecto adecuado, puede accionarla, garantizando buen desempeño, confiabilidad y a costos reducidos.
- Se eliminan también las realimentaciones mecánicas, correas de accionamiento y se introducen instrumentos nuevos para control y supervisión.

#### **3.2.4 Especificaciones Básicas del Regulador de Velocidad y Normas**

Para ambas alternativas de modernización, el sistema regulador de velocidad deberá

ser suministrado completo, con todos los componentes y equipos necesarios para su operación.

La tecnología del regulador que se utiliza es una tecnología basada en microprocesadores, con acción de control efectuada numéricamente, a través de algoritmos residentes, con doble canal automático de regulación (redundante: principal y respaldo), con regulación manual para ensayos y mantenimiento. El algoritmo para regulación de velocidad deberá realizar la acción Proporcional-Integral-Derivativa (PID) o equivalente. Cada sistema deberá ser suministrado completo, para que atienda los requisitos de control de las turbinas, dentro de las características de capacidad, calidad, funcionalidad y desempeño especificadas.

La ventaja de tener dos canales automáticos, cada cual con los recursos para regulación manual para fines de ensayos y mantenimiento, es una redundancia que garantiza una confiabilidad operativa significativamente mayor.

Si se especifica un canal automático (principal), y otro canal manual (respaldo), es importante que el canal manual sea independiente del canal automático, para así tener mayor confiabilidad operativa.

El regulador debe proporcionar una regulación de potencia de modo que las tomas de carga, en la operación interconectada, sean realizadas con tasas de variación ajustable e independiente de los ajustes adoptados para la regulación de frecuencia en operación aislada.

**a) Parte Eléctrica / Electrónica**

El tablero del regulador digital deberá ser provisto por lo menos con los siguientes recursos para control:

- Ajuste de carga/velocidad;
- Ajuste del estatismo permanente (Ganancia en régimen);
- Ajuste del estatismo transitorio (Ganancia Proporcional-Integral);
- Señal acelerométrica (Ganancia derivativa);
- Limitación electrónica de apertura;
- Realimentación electrónica de apertura del distribuidor con respectivo transductor;
- Realimentación de potencia con respectivo transductor;
- Sensor de velocidad (Por señal de TP o de rueda dentada acoplada al eje);
- Supervisión de la rotación y relés de velocidad;
- Comandos locales y remotos;

- Cambio automático de los ajustes de regulación (ajustes en vacío para ajustes en carga después de la sincronización, y viceversa).
- Desempeño automático de las funciones requeridas por las secuencias de control automático de partida y parada de la unidad;
- Señalización de eventos y fallas;
- Indicadores locales y salidas separadas para indicadores remotos por lo menos de las señales de rotación y posición del distribuidor;
- Llaves de selección de control Local / Remoto y selección del regulador (principal/respaldo);
- Conmutación automática en caso de falla del regulador (del principal para respaldo).
- Posibilidad de cambio de tarjetas electrónicas con la unidad en operación y cambio de la CPU con el recurso de ésta para asumir automáticamente todos los ajustes de la CPU en operación.

**b) Otras funciones:**

- Parada parcial sin rechazo de carga;
- Supervisión de parada total;
- Ley de conjugación en función del nivel del reservorio;
- Control de nivel del reservorio;
- Oscilografía con el registro de las principales variables de la máquina;
- Adquisición automática de ocurrencias y transferencia vía línea telefónica para centros remotos de despacho;
- Telemandos y supervisión remota.
- Interfaz hombre-máquina IHM gráfica para substituir la interfaz convencional, garantizando realizar todo el control, supervisión y ajustes del sistema de regulación.

**c) Parte Mecánica**

En el caso de modernización parcial, se debe definir si el nuevo actuador electro-hidráulico va a controlar directamente el servomotor existente o si va a controlar la Válvula Distribuidora principal de control del servomotor existente.

Si se mantiene la Válvula Distribuidora Principal, lo que es más económico y recomendado en el caso de sistemas de aceite de gran capacidad, es necesario conocer el

volumen de su cámara de control, o sea el desplazamiento de su cilindro (carrera) y su diámetro interno.

Si se controla directamente el servomotor se debe conocer su volumen interno para dimensionamiento del nuevo actuador electro-hidráulico.

**d) Actuador Electro-hidráulico:**

Debe ser especificado para que, por lo menos:

- Tenga capacidad para controlar la Válvula Distribuidora Principal existente o directamente el servomotor principal, con un tiempo muerto 0.2, según especificado en norma;
- Tenga recursos para ajuste de las velocidades de apertura y cierre del servomotor principal;
- Tenga filtraje de aceite de control, con filtro doble y dispositivo que permita el cambio del elemento filtrante con la unidad en operación y tenga indicación de filtrador sucio;
- El nuevo actuador electro-hidráulico tenga recursos para mover manualmente el servomotor principal del distribuidor, con la máquina parada, para fines de trabajos de mantenimiento en el regulador o en la turbina;
- Tenga una válvula eléctrica de arranque / parada o de emergencia.

**e) Unidad de Potencia Hidráulica**

En el caso de una modernización total, se debe suministrar un nuevo sistema de aceite con la presión y con la capacidad definida conforme la norma, conteniendo por lo menos:

- Tanque acumulador de aceite;
- Tanques presurizados;
- Bombas de aceite;
- Instrumentos de supervisión y control tales como medición de nivel, manómetros, presostatos;
- Automatización y redundancia a criterio del usuario.

**f) Informaciones Básicas para Dimensionamiento:**

- Tipo de turbina
- Potencia de la Turbina
- Caída nominal

- Presión del aceite
- Carrera de los servomotores
- Volumen de los servomotores
- Volumen de la válvula distribuidora
- Rotación

#### **g) Normas Técnicas Principales**

Las normas básicas adoptadas para el suministro de los Sistemas de Regulación de turbinas son:

IEC – 308 International Electrotechnical Commission, que trata de requisitos de ensayos y desempeño.

IEC – 255 que trata de aislamiento, programabilidad y compatibilidad electromagnética;

IEEE - 125 Institute of Electrical and Electronics Engineers, que trata, principalmente de aspectos de dimensionamiento y definiciones.

CEI 60308, referente a los sistemas de regulación de las turbinas hidráulicas.

CEI-IEC – 61362-1998 – Guía para la especificación de los sistemas de regulación de las turbinas hidráulicas.

### **3.3 Cómo Aplicar las Recomendaciones**

Finalmente, hacemos una transcripción del Capítulo 5 de la Norma Internacional CEI-IEC-61362 “Guía para la especificación de los sistemas de regulación de las turbinas hidráulicas”, que también lo consideramos importante y contribuye grandemente a las consideraciones planteadas en este Capítulo, lo que sigue a continuación.

“Para las aplicaciones prácticas, se debe realizar una elección apropiada de las exigencias y propiedades mencionadas en los capítulos 3 y 4 en función del tipo de instalación de que se trate.

Para ello, es necesario distinguir entre:

- centrales de potencia de punta;
- centrales de potencia de base;
- centrales con alternadores asíncronos.

En los casos sencillos directos, no se deben imponer exigencias severas innecesarias. Por esta razón, para cada uno de los tres tipos de instalación mencionados, se pueden distinguir dos tipos de requisitos:

- requisitos mínimos;

- requisitos adicionales.

Los requisitos mínimos se deben satisfacer en todos los casos. Estos requisitos son normalmente suficientes en el caso de centrales que deben ser explotadas con una vigilancia y automatización limitadas. Pueden resultar requisitos adicionales por ejemplo de la integración de la central en una red o en un conjunto de centrales. Pueden igualmente resultar de requisitos relacionados con la navegación, etc.

Conviene también dar recomendaciones para el ajuste de los parámetros de los reguladores para cada categoría de central.

Se han establecido los siguientes formularios de datos, que se deben rellenar, para facilitar la redacción de las especificaciones. Los datos que deben ser recogidos por el comprador o por el suministrador durante la fase de petición de ofertas, están señalados por dos líneas verticales en el margen izquierdo. Los demás datos no son necesarios más que durante la negociación del contrato o en el curso de su ejecución.”

Los formularios de la Norma Internacional CEI-IEC-61362 “Guía para la especificación de los sistemas de regulación de las turbinas hidráulicas”, se presentan en el **ANEXO B** del presente informe.

### **3.4 Consideraciones Finales**

El resultado de un nuevo conjunto formado por el regulador digital y parte mecánica debe garantizar la estabilidad de regulación, cualesquiera que sean las características de la turbina y del conducto forzado (aducción del agua) o cualquiera que sea la naturaleza de las cargas y de la red eléctrica a la cual la unidad generadora está conectada.

#### **a) Estabilidad:**

El regulador deberá ser estable y permitir ajustes adecuados de ganancia y de fase, en la presencia de eventualidades no lineales, como tiempo muerto, banda muerta y saturación, cuando la unidad opere en vacío, en red aislada o en paralelo con las demás unidades del sistema eléctrico.

#### **b) Rechazo de Carga:**

El regulador deberá ser capaz de mantener la unidad estable después del rechazo de carga, sin sobrepasar los límites de presión admisible en el conducto y de rotación máxima del generador.

#### **c) Desempeño Dinámico:**

Los valores teóricos recomendados para todos los ajustes de los parámetros del

regulador, deberán ser confirmados por pruebas, de acuerdo con el diagrama de bloques de las funciones de transferencia suministrado por el fabricante.

### **3.5 Ejemplo de Especificaciones Técnicas de los Reguladores de Tensión y Velocidad para una Central Hidroeléctrica de 48 MW**

Para la elaboración de las especificaciones técnicas, teniendo en cuenta las consideraciones planteadas, se tomaron las decisiones técnicas básicas como siguen a continuación. Los requisitos a cumplir estarían orientados para una central de potencia de punta, la que se tomará en cuenta en los ajustes respectivos.

#### **3.5.1 Requisitos Mínimos**

##### **a) En el sistema de excitación:**

- La tecnología a adoptar para las funcionalidades de la regulación de tensión sería la digital, con un conjunto de hardware y software que reemplazarían al regulador analógico electromecánico existente tipo BJ-30, al conjunto de reóstatos motorizados y a la excitatriz auxiliar.
- La excitatriz principal rotativa acoplada al eje del generador, que es la que genera la fuente de la corriente de campo, sería reemplazada por un conjunto de puentes de tiristores, los cuales serían alimentados por un transformador de excitación tipo seco que tomaría su energía desde las barras de salida del generador.

##### **b) En el sistema de velocidad:**

- La tecnología a adoptar para las funcionalidades de la regulación de velocidad sería la digital, con un conjunto de hardware y software que reemplazarían a los reguladores electromecánicos existentes Woodward y Morgan Smith.
- El reemplazo total del conjunto de la potencia hidráulica existente por uno de operación a presión mucho mayor.
- El reemplazo de los servomotores de los distribuidores de las turbinas acorde a la nueva presión hidráulica.
- Arranque de la central en “black start” o sea el arranque de la central aislada del sistema con cero de energía externa o del sistema.

##### **c) Funciones de regulación integradas:**

Otra decisión importante tomada fue que las funcionalidades de regulación de tensión y velocidad sean integradas en un solo conjunto del hardware y software, cuya tecnología ya se encontraba disponible en el mercado, permitiendo una economía importante. A este conjunto se le denomina ‘regulación de tensión y velocidad integrada’.

Esta decisión fue tomada luego de la presentación de las propuestas de suministro de los ofertantes.

**d) Doble canal de procesamiento:**

Asimismo, los reguladores de tensión y velocidad deberían ser de doble canal de procesamiento, uno principal y otro de respaldo, con transferencia automática entre ellos, a fin de darle confiabilidad a una central de punta o regulación de frecuencia primaria.

**e) Estabilizador de sistemas de potencia, de potencia acelerante:**

Tendría una mejor funcionalidad esta opción en un sistema integrado de tensión y velocidad.

### **3.5.2 Requisitos Adicionales**

**f) Sincronización automática:**

El arranque, la puesta en paralelo y parada de las unidades de generación serían automáticos, considerando también que en el arranque se operen automáticamente también las válvulas principales de entrada de agua a las turbinas.

**g) Modernización del sistema de protección de los generadores y transformadores de potencia de salida:**

Lo cual es una adición a todo el conjunto de control de la central, con lo cual englobaría completamente la modernización de la central.

**h) Sistema de supervisión y control remoto:**

Se previó el suministro de un sistema de supervisión para la concentración de las funciones de control de los reguladores de tensión y velocidad de las cuatro unidades de generación de la central, para su operación automática local de la central y la operación remota desde un Centro de Control de la empresa, cuyas señales fueron transportadas a través de las RTU e integradas al sistema Scada del centro de control de la empresa. Además tendría disponibilidad para la aplicación de la función AGC o la administración de la operación de los generadores en paralelo, así como la disponibilidad para la supervisión de otros controles de la central como el nivel del reservorio, presión de la tubería de presión, temperaturas de los generadores y transformadores.

Las especificaciones elaboradas bajo estos criterios técnicos adoptados se pueden ver en el **ANEXO C** del presente informe.

## **CAPÍTULO IV**

### **REPORTE DE RESULTADOS DE PUESTA EN SERVICIO**

En este capítulo se muestran los resultados de la instalación y algunos ensayos realizados durante la puesta en servicio del Sistema de Regulación de Tensión y Velocidad en la Central Hidroeléctrica de 48 MW, de modo de confirmar el desempeño del equipo en diversas condiciones operativas.

La ejecución de los ensayos está basada en otros documentos como son el Manual de Pruebas y Puesta en Servicio, además de los Diagramas Eléctricos, los cuales serían objetos de presentación de otro informe como un conjunto del comisionamiento, lo cual no es el objetivo presente.

En primer lugar presentaremos las características y parámetros de las instalaciones de los reguladores de tensión y velocidad llevados cabo en las cuatro unidades de generación de la central hidroeléctrica de 48 MW. Luego la definición de los ajustes de estos reguladores, y por último presentar una evaluación de estos ajustes, referenciándolos con los resultados del **ANEXO D** en la que se encuentran por lo extenso del reporte, sólo algunos ensayos para la puesta en servicio, como lo realizado en los ajustes de la malla de potencia bajo carga, los rechazos de carga y la operación del estabilizador de sistemas de potencia, de una de las unidades de generación en el Sistema Eléctrico Interconectado Nacional, a fin de observar el desempeño final de los reguladores digitales instalados.

El reporte completo de la puesta en servicio consta además, el ajuste y ensayos de los equipos sin la carga de agua en la turbina, los ensayos dinámicos en vacío y ensayos dinámicos bajo carga correspondientes a las cuatro unidades generadoras que integran la planta.

La instalación de los reguladores se realizó normalmente de acuerdo al cronograma previsto, el cual se ejecutó entre los meses de julio y octubre de 2006. Se paró cada unidad generadora dos semanas para el cambio de estos equipos con un intervalo de una semana para el inicio de la unidad siguiente. El periodo de instalación incluía las pruebas de la puesta en servicio de la unidad generadora en el sistema interconectado.



**Fig. 4.1** Antes de la modernización. Paneles de control de las unidades de generación.



**Fig. 4.2** Antes de la modernización. Vista del gobernador.



**Fig. 4.3 Después de la modernización. Reguladores Integrados de Tensión y Velocidad (RTV) y paneles de control.**



**Fig. 4.4 Unidad de Potencia Hidráulica del RV**

La instalación del sistema de supervisión y del sistema remoto a operar desde el centro de control de la empresa se realizó y completó en el mes de enero de 2007. Al sistema de supervisión para el control del operador de la central, se integró además de las funciones de los reguladores de tensión y velocidad, la modernización del sistema de protección de las turbinas y generadores, el control de las válvulas principales de ingreso de agua a las turbinas, las cuales se modernizaron en el año 2004 con el cambio a válvulas mariposa de 2,10 m de diámetro, integrándoles a las funciones de los reguladores en la etapa de arranque automático de las turbinas, asimismo, el telecomando de apertura y cierre de los interruptores de las líneas de transmisión, la información del estado de los seccionadores asociados a cada grupo generador y del patio de llaves, la implementación del sincronismo vía GPS, la información del caudal y presión del conducto y de la medición del nivel de agua de la presa de carga, finalmente la programación del RTU y el Scada del Centro de Control de la empresa para el telecomando del arranque, regulación de la carga y parada de la central desde este lugar.

Luego el COES designó a la central como reguladora de frecuencia primaria en la zona centro del SEIN.

#### **4.1 Contenido de un Informe de Puesta en Servicio de los Reguladores de Tensión y Velocidad**

El comisionamiento o las actividades realizadas para las pruebas y puesta en servicio del conjunto de los equipos de los reguladores de tensión y velocidad, se basan o son guiadas por un protocolo o manual de pruebas y puesta en servicio, lo cual deberá ser presentado anticipadamente por el fabricante para el análisis y aprobación del cliente.

La puesta en servicio o puesta en operación de los reguladores de un generador y/o turbina, trata de toda la parametrización de las mallas de control y del sistema de potencia encontrados en los sistemas de regulación.

La puesta en servicio debe obedecer normas de seguridad, procedimientos y precauciones. La ejecución de estos procedimientos aliado a la seguridad, cautela y la responsabilidad en la toma de decisiones son fundamentales para evitar daños a los equipos.

Durante la puesta en servicio se deben obtener datos, tablas, registros, ajustes, fotos, diseños, informaciones diversas que serán utilizadas en el Informe de Puesta en Servicio y confirmar el desempeño del equipamiento en las diversas condiciones operativas.

Un elemento indispensable para la puesta en servicio es el diagrama eléctrico impreso del proyecto aplicativo, el cual es el complemento del Manual del Equipamiento y los manuales de los diversos componentes que constan los reguladores.

Un Informe de Puesta en Servicio de los Reguladores de Tensión y Velocidad puede tener la estructura o contenido que como ejemplo se muestra a continuación, de las cuales en el ANEXO D sólo se muestran los puntos 7 y 8:

## **1 INTRODUCCIÓN**

### 1.1 PERSONAL PARTICIPANTE EN LA PUESTA EN SERVICIO

### 1.2 INFORMACIONES GENERALES SOBRE LOS EQUIPOS

#### 1.2.1 Informaciones Generales - Sistema de Regulación

#### 1.2.2 Informaciones Generales – Generador

#### 1.2.3 Información General - Valores Base adoptados

#### 1.2.4 Ajustes de los Limitadores – Regulador de Tensión

## **2 INSPECCIÓN Y VERIFICACIONES INICIALES**

### 2.1 INSPECCIÓN DEL EQUIPO Y DE LA INSTALACIÓN DEL MISMO

### 2.2 REAPRIETE DE COMPONENTES

### 2.3 VERIFICACIÓN DE LAS ALIMENTACIONES

#### 2.3.1 Alimentación Panel - VCC

#### 2.3.2 Alimentación Panel - VCA

#### 2.3.3 Alimentación de los Transductores Externos

#### 2.3.4 Alimentación Pre-Excitación

#### 2.3.5 Alimentación de las Tarjetas Electrónicas - RACK

## **3 ENSAYOS EN AGUA MUERTA – REGULADOR DE VELOCIDAD**

### 3.1 TABLA PATRÓN DE COLORES DE LAS SEÑALES ADQUIRIDAS

### 3.2 AJUSTE DE LOS INDICADORES DE LA UNIDAD HIDRÁULICA

### 3.3 AJUSTES DE LOS TIEMPOS DE APERTURA Y CIERRE DE LOS ACTUADORES ELECTRO-HIDRÁULICOS

#### 3.3.1 Apertura y Cierre en máxima velocidad del Distribuidor

### 3.4 AJUSTES DE LA DINÁMICA DE LOS ACTUADORES ELECTRO-HIDRÁULICOS

#### 3.4.1 Dinámica del Distribuidor – Aplicación de Escalones

## **4 ENSAYOS EN AGUA MUERTA – REGULADOR DE TENSIÓN**

### 4.1 CONFIRMACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS ELEMENTOS DE

## POTENCIA

- 4.1.1 Disparo del Puente con Alimentación Externa
- 4.1.2 Verificación de Polaridad de la Pre-Excitación
- 4.2 AJUSTE DE LOS RELÉS DE PROTECCIONES
- 4.2.1 Ajustes de Set Point del Relé Temperatura del Puente.
- 4.2.2 Ajustes del Relé Tierra-Rotor (64R)
- 4.2.3 Ajustes de los Relés de Temperatura en el Trafo de Excitación
- 4.2.4 SEG – Relé de Protección de Sobrecorriente del Trafode Excitación
- 4.3 PRUEBAS CON LOS RELÉS DE PROTECCIONES
- 4.3.1 Prueba de la Protección de Sobrecorriente del Trafo de Excitación - MT
- 4.3.2 Prueba de la Protección de Sobrecorriente del Trafo de Excitación - Bt
- 4.4 PRUEBAS CON CIRCUITO DE MT DEL TRAFOD DE EXCITACIÓN
- 4.4.1 Valor Ohmico del Trafo de Excitación
- 4.4.2 Valor Ohmico del Cable de MT del Trafo de Excitación

## **5 ENSAYOS DINÁMICOS EN VACÍO – REGULADOR DE VELOCIDAD**

- 5.1 ARRANQUE AUTOMÁTICO
- 5.2 AJUSTE DE LA MALLA DE REGULACIÓN DE VELOCIDAD – ESCALÓN EN LA REFERENCIA
- 5.3 MÁQUINA EN RÉGIMEN - ESTABILIDAD DEL CONTROL AL VACÍO

## **6 ENSAYOS DINÁMICOS EN VACÍO – REGULADOR DE TENSIÓN**

- 6.1 TABLA PATRÓN DE COLORES DE LAS SEÑALES ADQUIRIDAS
- 6.2 EXCITACIÓN AUTOMÁTICA
- 6.2.1 Excitación por Corriente de Campo (Manual) por Pre-Excitación CA
- 6.2.2 Excitación por Corriente de Campo (Manual) por Pre-Excitación CC.
- 6.2.3 Excitación por Tensión Terminal (Automática) por Pre-Excitación CA.
- 6.2.4 Excitación por Tensión Terminal (Automática) por Pre-Excitación CC
- 6.3 DESEXCITACIÓN NORMAL (FORZAMIENTO NEGATIVO)
- 6.3.1 Desexcitación por Tensión Terminal (Automática)
- 6.3.2 Desexcitación por Corriente de Campo (Manual)
- 6.4 PARADA DE LA UNIDAD CON EXCITACIÓN
- 6.4.1 Desexcitación por Tensión Terminal (Automática)
- 6.5 AJUSTE DE LA MALLA DE REGULACIÓN DE TENSIÓN EN VACÍO
- 6.5.1 Dinámica del Control de Tensión (Automático) - Respuesta al Escalón

- 6.5.2 Dinámica del Control de Corriente (Manual) - Respuesta al Escalón
- 6.6 AJUSTE DEL LIMITADOR DE MÁXIMA CORRIENTE DE CAMPO
  - 6.6.1 Actuación del Limitador
- 6.7 AJUSTE DEL LIMITADOR VOLTIOS/HERTZ
  - 6.7.1 Actuación del Limitador – en Control de Tensión Terminal
- 6.8 VERIFICACIÓN DE REDUNDANCIAS DEL REGULADOR
  - 6.8.1 Conmutación entre canal principal y respaldo
  - 6.8.2 Conmutación entre regulación tensión para regulación de corriente
- 7 ENSAYOS EN CARGA – REGULADOR DE VELOCIDAD**
  - 7.1 AJUSTES DE LA MALLA DE POTENCIA
    - 7.1.1 Dinámica del Control de Potencia – Respuesta al Escalón
    - 7.1.2 Dinámica del Control de Potencia – Toma de Carga
    - 7.1.3 Dinámica del Control de Potencia – Retiro de Carga
  - 7.2 RECHAZOS DE CARGA
    - 7.2.1 Rechazo de Carga – 25% de Potencia Mecánica
    - 7.2.2 Rechazo de Carga – 50% de Potencia Mecánica
    - 7.2.3 Rechazo de Carga – 75% de Potencia Mecánica
    - 7.2.4 Rechazo de Carga – 90% del Servo-Motor
    - 7.2.5 Rechazo de Carga – 100% del Servo-Motor
- 8 ENSAYOS EN CARGA – REGULADOR DE TENSIÓN**
  - 8.1 AJUSTES DE LA MALLA DE TENSIÓN EN CARGA
    - 8.1.1 Dinámica del Control de Tensión en carga - Respuesta al Escalón
    - 8.1.2 Dinámica del Control de Corriente en carga - Respuesta al Escalón
  - 8.2 LIMITADOR DE MÁXIMA CORRIENTE DE CAMPO EN CARGA
    - 8.2.1 Actuación del Limitador
  - 8.3 LIMITADOR DE MÁXIMA CORRIENTE DEL ESTATOR
    - 8.3.1 Actuación del Limitador de Sub-excitación
  - 8.4 LIMITADOR DE MÍNIMA EXCITACIÓN
    - 8.4.1 Actuación del Limitador
  - 8.5 ESTABILIZADOR DE SISTEMAS DE POTENCIA
    - 8.5.1 Escalón en la referencia de tensión ESP (P=10,2MW)
- 9 PLANILLA DE PARÁMETROS – REGULADOR DE VELOCIDAD**
- 10 PLANILLA DE PARÁMETROS REGULADOR DE TENSIÓN**

## 4.2 Características y Parámetros de la Instalación de los Reguladores

Modelo	: RTVX100
Tipo	: Regulador integrado de tensión y velocidad
Tecnología	: Digital
Configuración	: Doble canal
Operación	: Vacío, red aislada y conectada a la red
Secuencia de arranque y paro	: Automático y manual
Control	: Interface hombre-máquina, sistema de supervisión

### 4.2.1 Características Generales del Sistema de Regulación

#### a) Regulación de tensión

Modos de control	: Automático de tensión y manual por corriente de campo.
Limitadores dinámicos	: Sobre y sub excitación; máxima corriente estatórica; Voltios/Hertz

Estabilizador de sistemas de potencia

Sincronización automática del generador a la red eléctrica.

Velocidad de actuación de señal

de control	: 10 ms
Tiempo de respuesta	: 100 ms
Precisión	: 0,5%
Banda de regulación automática	: 70 a 120%
Banda de regulación manual	: 0 a 120%

#### b) Regulación de velocidad y potencia

Modos de regulación	: Potencia y frecuencia con ajustes independientes, limitación de apertura y toma de carga.
Modos de arranque	: Servicios auxiliares y “black start”
Tasa de actualización de señal	
de control	: 10 ms
Estatismo permanente	: 0 a 10%
Estatismo transitorio	: 0 a 150%
Ganancia integral Ki	: 0 a 10 s <sup>-1</sup>

Ganancia derivativa $K_d$	: 0 a 10 s
Ganancia proporcional $K_p$	: 0 a 20
Constante de tiempo integral $T_i$	: 0 a 30 s
Constante de tiempo derivativa $T_d$	: 0 a 5 s
Banda muerta	: < 0,01%
Tiempo muerto	: < 0,2 s
Índice de estabilidad de velocidad	: < 0,3% (a 5% droop de velocidad)
Índice de estabilidad de potencia	: < 0,4% (a 5% droop de velocidad)
Banda de regulación de velocidad	: 90 a 110%
Banda de regulación de potencia	: 0 a 120%

#### 4.2.2 Características de Hardware del Regulador

Estructura de control	: PID (Proporcional Integral Derivativo)
Operación de la CPU	: Digital 32 bits (padrón industrial)
Disponibilidad de entradas/salidas	: 48 entradas/salidas digitales (expansibles) 16 entradas/salidas analógicas (expansibles)
Resolución de entradas/salidas analógicas	: 14 bits para entradas analógicas 13 bits para salidas analógicas
Tensión de salida de terminales de prueba	: 0 a 10 Vcc
Modos de operación	: Automática: regulación por tensión del generador Manual: regulación por corriente de campo
Montaje mecánico	: Encaje en rack padrón industrial IMS 19"
Montaje de las tarjetas electrónicas	: Slots individuales
Interconexión de las tarjetas	: Conexiones wire-wrap en la parte posterior
Puertas de comunicación	: 01 Puerta serial RS-232 (PC) 01 Puerta serial RS-485 (SDSC – SCADA)
Conexión entre rack y dispositivos	: Bornera de interfaz B
Señales de entrada TPs	: < 150 V, 10 VA
Señales de entrada TCs	: 0 a 5 A, 2 VA
Alimentación	: 110 a 250 Vcc, 400 VA
Mandos lógicos externos	: < 250 Vcc

Aislamiento	: 2 kAca, 1 min
Señales de salida	: 0 a 5 mAcc, 4 a 20 mAcc, 0 a 20 mAcc 0 a 10 Vcc, -10 a 10 Vcc

Contactos para mando y señalización	: Capacidad de ruptura de 1 A, 125 Vcc
Nivel de ruido	: < 65 dB
Temperatura de operación	: -5 a 50 °C
Humedad relativa	: < 95%

Salidas por contactos para interfaz con circuitos de mando, alarma y protección.

Entradas para mandos remotos por contactos externos.

Cambio de modos de control sin golpes.

Sincronización automática de red.

#### 4.2.3 Características de Software del Regulador

##### a) Características Funcionales

Operación en Tiempo Real.

Circuito de watchdog responsable por la supervisión de funcionamiento de la CPU de control.

Programas almacenados en memoria no volátil.

Posibilidad de comunicación con sistema digital de supervisión y control externo.

Programación de estructura del regulador y entradas y salidas, incluso lógicas.

Autodiagnóstico permanente de hardware y software.

##### b) Características Técnicas

Sistema operacional	: Tiempo Real (RTOS) de 32 bits
---------------------	---------------------------------

Tiempo de servicio de interrupciones	: 5 $\mu$ s
---	-------------

Tiempo de conmutación entre tareas	: 3 $\mu$ s
------------------------------------	-------------

Lenguaje	: C/C++
----------	---------

IHM amigable	: Gráfica
--------------	-----------

Almacenamiento de programas	: Memoria no volátil
-----------------------------	----------------------

Protocolo de comunicación	: MODBUS RTU
---------------------------	--------------

Padrón de programación	: IEC 1131-3
------------------------	--------------

#### 4.2.4 Componentes del Sistema

##### a) Panel de control

Dimensiones	600 x 800 x 2200 mm
Rack de control (Principal y respaldo)	Tarjeta CPU de procesamiento Tarjeta Fuente de alimentación Tarjeta acoplador óptico Entradas digitales Tarjeta acoplador óptico Salidas digitales Tarjeta TRF10 Tarjeta DP14 Tarjeta DB30 Tarjeta Comunicación RS-232/RS-485 Tarjeta para señal Frecuencia/Velocidad
Interfaz Hombre – Máquina	Pantalla Principal Pantalla de Operación Pantallas de Ensayos Pantalla de Alarmas Pantalla de Gráficos Pantalla de Configuración
Otros componentes	Relés auxiliares y disyuntores de protección Fuentes de alimentación del Panel Fuente de alimentación de las servo- válvulas CT's y PT's auxiliares Borneras de conexión
<b>b) Panel de potencia</b>	
Dimensiones	1200 x 800 x 2200 mm
<b>i) Puente de Tiristores</b>	
Corriente nominal	350 A
V <sub>rrm</sub>	1200 V
Máxima temperatura	110 °C
Supervisión de temperatura	Disparo a 85 °C
<b>ii) Interruptor de Campo</b>	
Tipo de instalación	CA
Tensión nominal	500 V <sub>ca</sub>

	Corriente nominal	: 250 Aca
	Tensión de mando	: 125 Vcc
<b>iii)</b>	<b>Otros componentes</b>	
	Resistor de descarga.	
	Circuito Crowbar.	
	Sistema de Pre-excitación.	
<b>c)</b>	<b>Transformador de excitación</b>	
	Marca	: INDUSUL
	Tipo	: TTFI
	Código	: 1511.103
	Fases	: 3
	Potencia	: 150 kVA
	Relación de transformación	: 6900 / 340 V
	Clase de aislamiento	: 7,2 / 1,2 kV
	BIL	: 60 kV
	Frecuencia	: 60 Hz
	Grupo de conexión	: Yd1
	Impedancia	: 4.3% (115 °C)
	Grado de protección	: IP-21
	Peso	: 850 kg
	Mes/Año	: 06/06
<b>d)</b>	<b>Unidad hidráulica</b>	
<b>i)</b>	<b>Reservorio</b>	
	Capacidad	: 250 L
<b>ii)</b>	<b>Bombas</b>	
	Cantidad	: 2 AC y 2 DC
	Tipo	: Motobomba
	Capacidad	: 14 L/min y 7,5 CV
	Presión nominal	: 120 bar
	Presión mínima	: 80 bar
<b>iii)</b>	<b>Acumulador</b>	
	Cantidad	: 2
	Tipo	: Vejiga

Capacidad	100 L
Volumen de aceite	20 L
Gas	Nitrógeno

#### **4.2.5 Sistema de Supervisión**

##### **a) Características Funcionales**

El Sistema de Supervisión permite el intercambio de datos, supervisión y control de los reguladores integrados de tensión y velocidad desde estaciones de trabajo a través de una red de fibra óptica.

Se dispone de comandos manuales de subir y bajar la tensión y potencia activa desde el Centro de Control en La Oroya a través de la Unidad Terminal Remota, la cual esta interconectada al Sistema de Supervisión mediante una red RS 485.

##### **b) Características de las microcomputadoras del Sistema de Supervisión**

Sistema: Redundante a través de dos microcomputadoras, conectadas a la red.

Procesador: Pentium IV 2.4GHZ / Cooler Box

Memoria RAM de 256Mb DDR

Placa Asus P4S8X-MX

Disco rígido 40Gb

Unidad CD-R 56x

Teclado PS2 Negro

Mouse PS2 Negro

Gabinete 4 Bahías Negro con USB frontal

Pantalla LCD 19" LG

##### **CARACTERÍSTICA DEL SOFTWARE**

Sistema operacional Microsoft Windows XP Home OEM en Inglés

Software de Supervisión Elipse Scada MMI Master Full

Componentes utilizados en la red: Trendnet TE100-S81FX – Switch con convertidor fibra óptica – Ethernet, Convertidor RS-232 / RS-485 ICP COM – 7520 Advantech ADAM 6541 A Convertidor Ethernet - Fibra Óptica

#### **4.3 Ajuste de los Reguladores de Tensión y Velocidad**

##### **4.3.1 Ajuste de la Malla de Control del Regulador de Tensión**

La referencia para este ajuste ver la Fig. 4.5 siguiente.

## MALLA DE CONTROL DE TENSION Y CORRIENTE

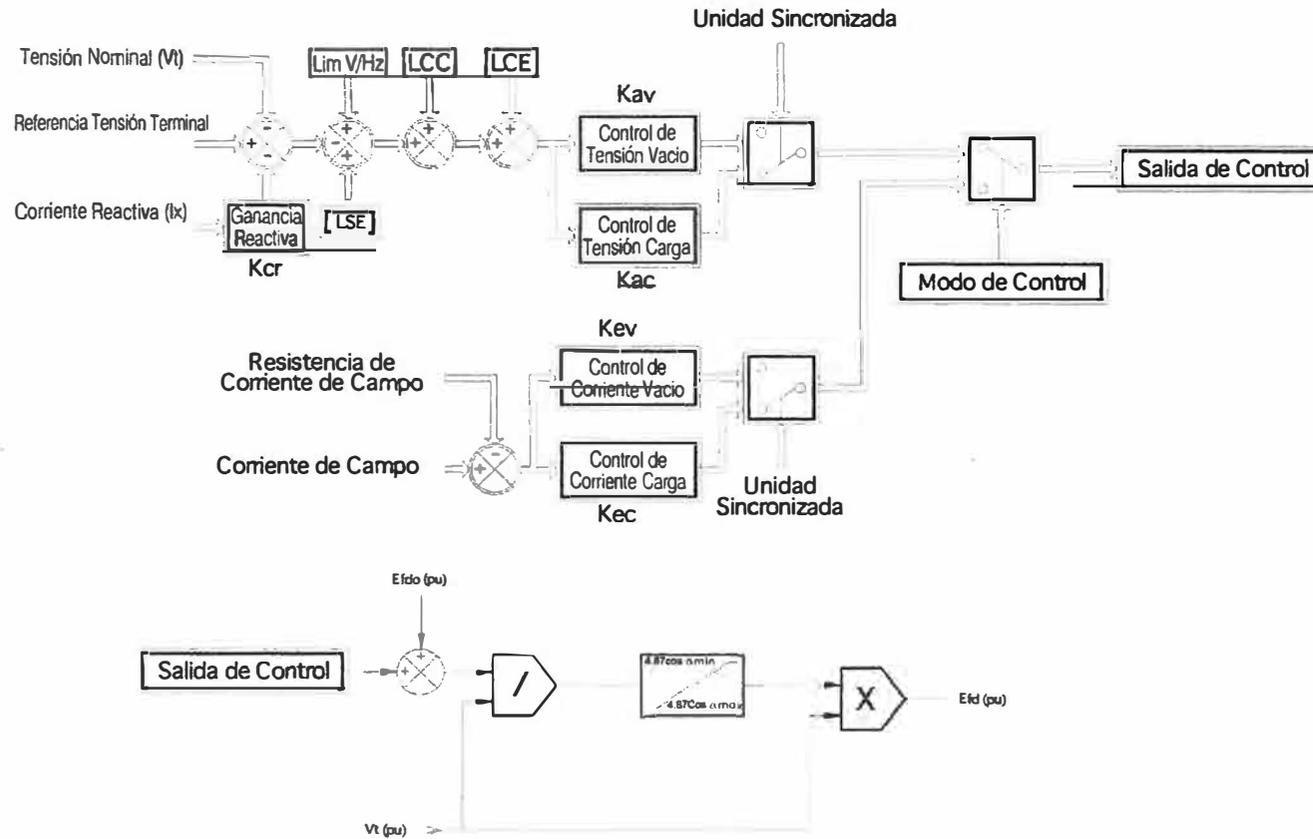


Fig. 4.5 Malla de control de tensión y corriente para el ajuste del regulador de tensión.

**a) Ajustes de Malla de Control del Regulador de Tensión – Generador N° 1**

i) Ganancia de Compensación Reactiva

$$K_{cr} = 0.00$$

ii) Control de Tensión en Vacío

$$K_{av} \frac{1 + sT_{1v}}{1 + sT_{2v}} \quad \text{Donde: } K_{av} = 200.0; T_{1v} = 2.30s; T_{2v} = 10.00s$$

iii) Control de Tensión en Carga

$$K_{ac} \frac{1 + sT_{1c}}{1 + sT_{2c}} \quad \text{Donde: } K_{ac} = 200.0; T_{1c} = 2.50s; T_{2c} = 6.00s$$

iv) Control de Corriente en Vacío

$$K_{ev} \frac{1 + sT_{3v}}{1 + sT_{4v}} \quad \text{Donde: } K_{ev} = 200.0; T_{3v} = 1.00s; T_{4v} = 10.00s$$

v) Control de Corriente en Carga

$$K_{ec} \frac{1 + sT_{3c}}{1 + sT_{4c}} \quad \text{Donde: } K_{ec} = 200.0; T_{3c} = 1.00s; T_{4c} = 15.00s$$

vi) Señal de Salida de Malla de Control

$$\text{Angulo de disparo máximo} = 150.0 \text{ grados}$$

$$\text{Angulo de disparo mínimo} = 10.0 \text{ grados}$$

**b) Ajustes de Malla de Control del RT – Generadores N° 2, 3 y 4**

i) Ganancia de Compensación Reactiva

$$K_{cr} = 0.00$$

ii) Control de Tensión en Vacío

$$K_{av} \frac{1 + sT_{1v}}{1 + sT_{2v}} \quad \text{Donde: } K_{av} = 200.0; T_{1v} = 2.30s; T_{2v} = 10.00s$$

iii) Control de Tensión en Carga

$$K_{ac} \frac{1 + sT_{1c}}{1 + sT_{2c}} \quad \text{Donde: } K_{ac} = 200.0; T_{1c} = 2.50s; T_{2c} = 6.00s$$

iv) Control de Corriente en Vacío

$$K_{ev} \frac{1 + sT_{3v}}{1 + sT_{4v}} \quad \text{Donde: } K_{ev} = 200.0; T_{3v} = 1.00s; T_{4v} = 20.00s$$

v) Control de Corriente en Carga

$$K_{ec} \frac{1 + sT_{3c}}{1 + sT_{4c}} \quad \text{Donde: } K_{ec} = 200.0; T_{3c} = 1.00s; T_{4c} = 15.00s$$

vi) Señal de Salida de Malla de Control

$$\text{Angulo de disparo máximo} = 150.0 \text{ grados}$$

Angulo de disparo mínimo = 10.0 grados

#### 4.3.2 Ajuste de la Malla de Potencia

La referencia para este ajuste ver la Fig. 4.6 siguiente.

##### a) Ajuste de la Malla de Control de Potencia – Generador N° 1

i) Ganancia de Emulador Servomotor

$$K_w = 150.00$$

ii) Estatismo Transitorio en Carga

$$B_{t,c} \frac{sT_{d,c}}{1 + sT_{d,c}} \quad \text{Donde: } B_{t,c} = 0.25; T_{d,c} = 10.00s$$

iii) Acelerómetro en Carga

$$\frac{1 + sT_{n,c}}{1 + sT_{n,c}/10} \quad \text{Donde: } T_{n,c} = 1.00s$$

iv) Estatismo Permanente

$$\text{ep Aislado} = 0.000 \quad \text{ep Interligada} = 0.050$$

v) Constante de Tiempo en la Medición de Potencia

$$\frac{s}{1 + sT_f} \quad \text{Donde: } T_f = 3s$$

$$\frac{s}{1 + sT_g} \quad \text{Donde: } T_g = 1s$$

vi) Ganancia Rampeador de Potencia

$$K_r = 1.00$$

##### b) Ajuste de la Malla de Control de Potencia – Generadores N° 2, 3 y 4

i) Ganancia de Emulador Servomotor

$$K_w = 150.00$$

ii) Estatismo Transitorio en Carga

$$B_{t,c} \frac{sT_{d,c}}{1 + sT_{d,c}} \quad \text{Donde: } B_{t,c} = 0.25; T_{d,c} = 8.00s$$

iii) Acelerómetro en Carga

$$\frac{1 + sT_{n,c}}{1 + sT_{n,c}/10} \quad \text{Donde: } T_{n,c} = 1.00s$$

iv) Estatismo Permanente

$$\text{ep Aislado} = 0.000 \quad \text{ep Interligada} = 0.050$$

v) Constante de Tiempo en la Medición de Potencia

$$\frac{s}{1 + sT_f} \quad \text{Donde: } T_f = 3s$$

### MALLA DE CONTROL DE POTENCIA

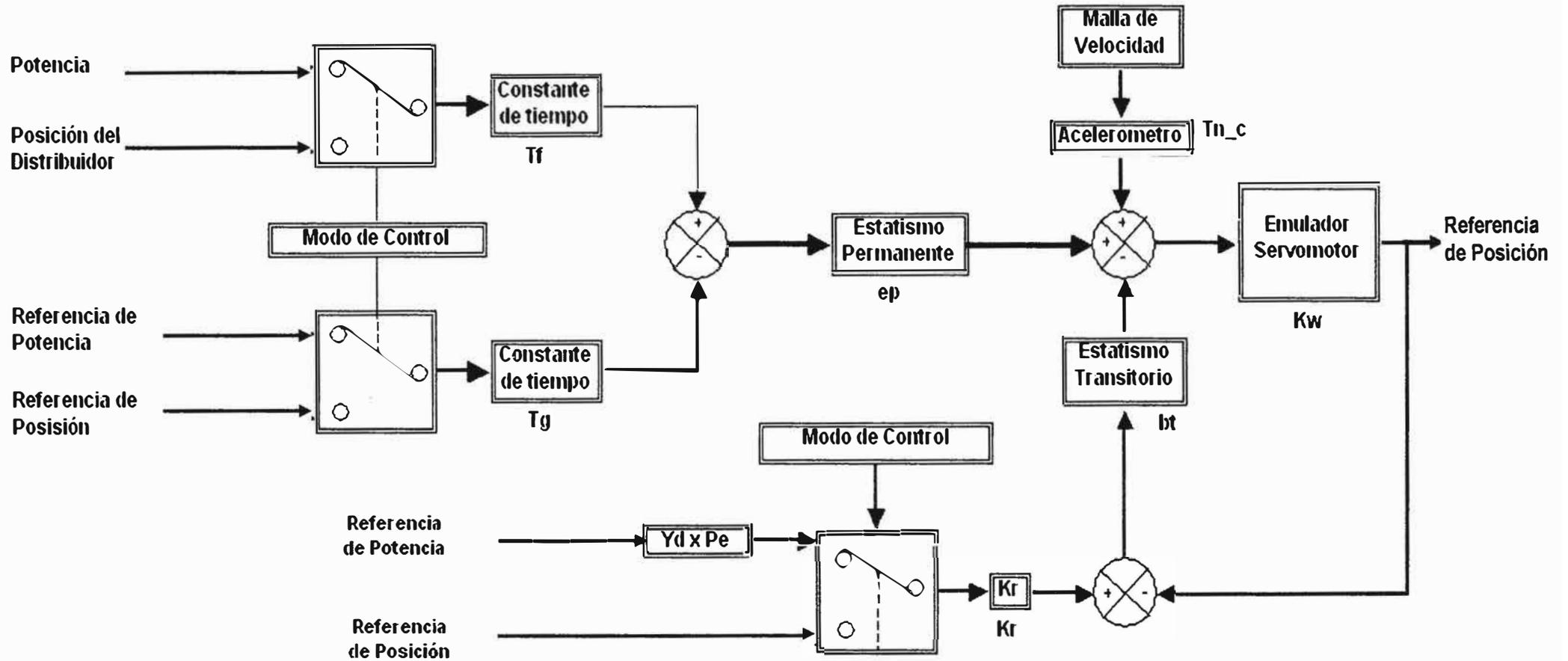


Fig. 4.6 Malla de control de potencia para el ajuste del regulador de velocidad.

$$\frac{s}{1 + sT_g} \quad \text{Donde: } T_g = 1s$$

vi) Ganancia Rampeador de Potencia

$$K_r = 1.00$$

### 4.3.3 Ajuste de la Malla de Control de Velocidad

#### MALLA DE CONTROL DE VELOCIDAD

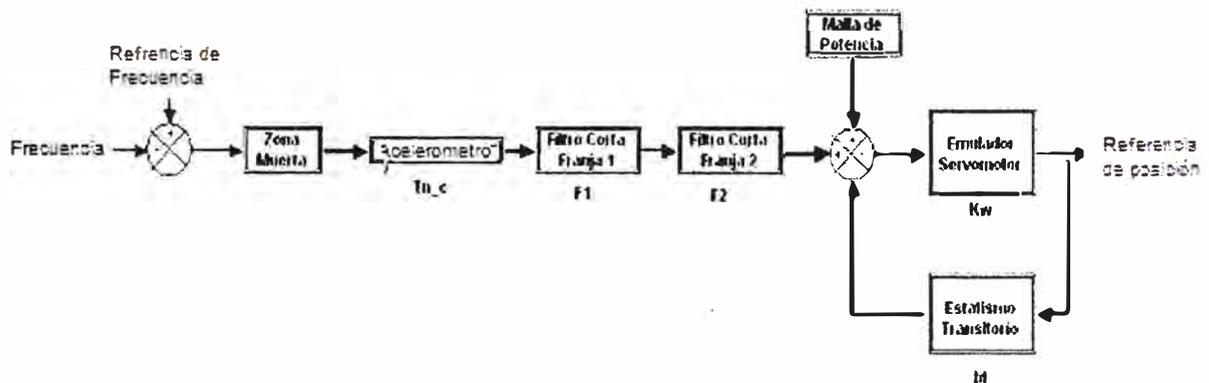


Fig. 4.7 Malla de control de velocidad para el ajuste del regulador

#### a) Ajuste de la Malla de Control de Velocidad – Generador N° 1

i) Ganancia de Emulador Servomotor

$$K_w = 150.00$$

ii) Estadismo Transitorio en Vacío

$$B_{t,c} \frac{sT_{d,c}}{1 + sT_{d,c}} \quad \text{Donde: } B_{t,c} = 0.25; T_{d,c} = 10.00s$$

iii) Acelerómetro en Carga

$$\frac{1 + sT_{n,c}}{1 + sT_{n,c}/10} \quad \text{Donde: } T_{n,c} = 1.00s$$

iv) Corta Franja

$$F1 = 60.0 \text{ Hz} \quad F2 = 120.0 \text{ Hz}$$

#### b) Ajuste de la Malla de Control de Velocidad – Generadores N° 2, 3 y 4

i) Ganancia de Emulador Servomotor

$$K_w = 120.00$$

ii) Estadismo Transitorio en Vacío

$$B_{t,c} \frac{sT_{d,c}}{1 + sT_{d,c}} \quad \text{Donde: } B_{t,c} = 0.25; T_{d,c} = 8.00s$$

iii) Acelerómetro en Carga

$$\frac{1 + sT_{n_c}}{1 + sT_{n_c}/10} \quad \text{Donde: } T_{n_c} = 1.00s$$

iv) Corta Franja

F1 = 60.0 Hz

F2 = 120.0 Hz

#### 4.3.4 Ajuste del Estabilizador de Potencia

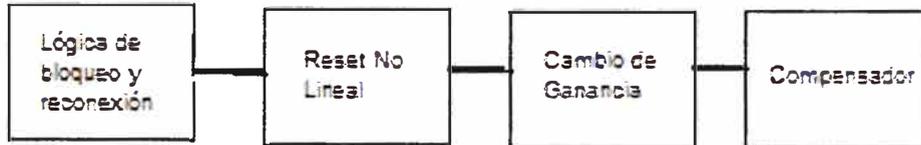


Fig. 4.8 Malla del estabilizador de potencia para el ajuste.

a) Ajuste de los Generadores N° 1, 2, 3 y 4

i) Lógica de Bloqueo y Reconexión

$V_{tAlta} = 1.05pu$ ,  $V_{tAlta-Reset} = 1.03pu$ ,  $V_{tSobre} = 0.05pu$ , Retardo On = 2s

$V_{tBaja} = 0.95pu$ ,  $V_{tBaja-Reset} = 0.97pu$ ,  $V_{tSub} = -0.05pu$ , Retardo Off = 0.1s

Salida Negativa = -0.02pu, Salida Positiva = 0.02pu

ii) Reset No Lineal

Salida Reset Positiva = 0.05pu, Retardo Reset = 0.5s

Reset T2 = 3s, Reset T2 No Lineal = 0.5s

iii) Cambio de Ganancia

$P_{eMáximo} = 0.3pu$ ,  $P_{eMínimo} = 0.0pu$ ,  $K_{reducido} = 4.0$ ,  $K = 6.0$

$P_{eMáximo\ Negativo} = 0.0pu$ ,  $P_{eMínimo\ Negativo} = 0.0pu$ ,  $K_{reducido\ negativo} = 0.0$ ,  $K_{negativo} = 0.0$

iv) Compensador

Constante Inercia 2H = 7.5s

$X_q = 0.65$

Reset Tw1-T1 = 3.0s,

Filtro Rastreador de Rampa  $T_r = 0.1s$

Compensador Avance1 T3 = 0.1s,

Compensador Atraso1 T4 = 0.03s, Compensador Avance2 T5 = 0.1s,

Compensador Atraso2 T6 = 0.03s, Compensador Avance3 T7 = 0.01s,

Compensador Atraso3 T8 = 0.01s

Límite Superior = 0.05pu,

Límite Inferior = -0.049pu

#### **4.4 Evaluación del Ajuste de los Parámetros de la Puesta en Servicio en los Ensayos Bajo Carga de los Reguladores de Tensión y Velocidad**

Sin perder de vista que el objetivo principal del presente informe es mostrar los criterios o consideraciones técnicas a tener en cuenta para llevar a cabo una modernización de los sistemas de excitación de una planta como lo expuesto en el capítulo anterior, en este punto realizaremos una evaluación sucinta del funcionamiento de los reguladores de tensión y velocidad instalados, verificando que los ajustes paramétricos realizados en la puesta en servicio, tal como se mostraron en la sección anterior, son los adecuados, desempeñándose en situaciones de operación bajo carga e interconectada a la red del sistema eléctrico interconectado nacional.

Las pruebas decisivas del desempeño de los reguladores se dan, como dijimos, en operación en carga o bajo carga y en situaciones de rechazo de carga en las que se observará el desempeño de la velocidad y la tensión.

En el ANEXO D replicamos parte del contenido del Informe de la Puesta en Servicio referido a las pruebas en carga.

##### **4.4.1 Ensayos en Carga – Regulador de Velocidad**

a) Para proceder con las pruebas de rechazo de carga, previamente se tienen que calibrar o ajustar los parámetros de la malla de potencia que se muestra en la Fig. 4.6 del capítulo presente. Dichos parámetros ajustados se indican en el acápite 4.3.2. Con dichos ajustes a la malla de control de potencia se realizaron pruebas de dinámica para verificar las respuestas ante la inyección de un escalón de excitación, verificando sus respuestas de potencia y su dinámica ante la toma de carga y retiro de carga (aumento y disminución de carga).

En el Anexo D, acápite 7.1.1; 7.1.2 y 7.1.3 se muestran los gráficos de respuesta y los comentarios: “Se tiene una respuesta al escalón sin overshoot y con tiempo de estabilización de 3 segundos”; “Toma de carga con tasa de referencia de potencia en 1%/s”, y, “Retiro de carga con tasa de referencia de potencia en 1%/s”.

b) Con la malla de potencia ajustada adecuadamente, se procedió a las pruebas de rechazo de carga para verificar el desempeño general del funcionamiento del regulador de velocidad, los cuales se pueden observar en el Anexo D, acápite 7.2.1 al 7.2.5 en las que se observan los resultados de los rechazos de carga al 25%, 50%, 75% y 100% de carga conectada al sistema eléctrico interconectado del sistema nacional. Se pueden ver los comentarios: “El regulador se muestra eficiente en todos los aspectos del rechazo”; y, “El

registro demuestra la eficacia en la acción del regulador en el momento del rechazo de carga, cuando comanda el cierre del distribuidor en máxima velocidad, de manera a atenuar la sobrevelocidad a valores inferiores al límite de disparo, sin sobrepresión de la caja espiral causada por el cierre brusco del distribuidor”.

Con esta prueba decisiva se puede afirmar también que los parámetros de ajuste de la malla de velocidad indicados en el acápite 4.3.3 son los adecuados.

#### **4.4.2 Ensayos en Carga – Regulador de Tensión**

a) Previamente con los ensayos en vacío o sea sin carga se definieron los ajustes de los parámetros de la malla de control en vacío tanto de tensión como de corriente (ver Fig. 4.5 y acápite 4.3.1). Con el grupo de generación sincronizado al sistema interconectado se procedió al ajuste de la malla de control de tensión en carga y de corriente en carga, cuyos resultados se pueden observar en el Anexo D, acápites 8.1.1 y 8.1.2, y los comentarios: “Las curvas demuestran la respuesta al estímulo, sin sobreseñal en la señal de tensión de salida”; y, “Se observa una respuesta rápida y estable de la corriente de campo con señal de tensión de salida también estable”.

b) Viendo la misma Fig. 4.5, a los parámetros de la malla de control de tensión y corriente del regulador de tensión, se adiciona a esta malla las funciones complementarias como son: 1. El limitador de máxima corriente de campo, 2. El limitador de máxima corriente del estator, y 3. El limitador de mínima excitación.

En el Anexo D, acápites 8.2, 8.3 y 8.4 se pueden observar los ensayos y ajustes realizados, y los comentarios correspondientes.

c) Finalmente, una función importante del sistema de excitación es la adición al regulador de tensión del Estabilizador de Sistemas de Potencia, cuya función es amortiguar oscilaciones electromecánicas.

Para el ajuste del Estabilizador de Sistemas de Potencia, se aplica un escalón en la referencia de tensión del regulador vigilando el comportamiento del transitorio causado en la potencia eléctrica del generador. Se actúa sobre los compensadores de avance y ganancia, para alinear los desvíos de tensión con los desvíos de frecuencia, de manera que genere amortiguamiento de las oscilaciones electromecánicas.

Como resultado de la calibración se tienen los parámetros indicados en el acápite 4.3.4 del capítulo presente.

En los registros que se muestran en el Anexo D, acápite 8.5 se observa el resultado del ajuste final. Se aplicó un escalón en la referencia del regulador de tensión con el

estabilizador, seguido de otro escalón sin el estabilizador para fines de comparación. El comentario que se indica es como sigue: “En el primer instante, con escalón aplicado y desaplicado, se puede observar la actuación del estabilizador de potencia en la tensión de campo, lo cual compensa la oscilación electromecánica a través de la tensión de salida. En el segundo instante, con escalón aplicado y desaplicado, se puede observar la estabilidad de todas las señales del regulador de tensión cuando la malla del estabilizador de potencia no es utilizada, y de las oscilaciones de potencia eléctrica cuando es sometida al escalón de tensión de salida. La oscilación de la señal de potencia eléctrica compensada por el Estabilizador fue alrededor de 1,67Hz, como se indica en la figura de arriba, que caracteriza oscilaciones entre máquinas de una misma central.”

#### 4.5 Costo/Beneficio de la Instalación

Para el caso particular de la central hidroeléctrica de 48 MW objeto de la modernización, la decisión del cambio de reguladores se realizó considerando primordialmente el criterio de la seguridad de los equipos generadores y de las personas, dado el grado de antigüedad y obsolescencia de los reguladores, además de la opinión del COES recomendando el reemplazo, quien previamente encargó realizar las pruebas de operatividad las cuales se reporta por medio del informe del Anexo A. Sin embargo, una evaluación económica era pertinente realizar dada la inversión a involucrar.

En la Tabla N° 4.2 se presenta el flujo de fondos en el cual se detalla la inversión involucrada y los resultados de la evaluación son como sigue:

Inversión:	US\$	1 724 000
VAN:	US\$	219 907
TIR:		14,3 %

En esta evaluación, consideramos los ingresos como una compensación del COES por el servicio de regulación primaria de frecuencia para el sistema eléctrico interconectado nacional, que en detalle sería como se muestra en la Tabla N° 4.1.

TABLA N° 4.1

Mes	Nº de meses	Compensación mes	Total mes US\$
Nov – Mar	5	10 000	50 000
Abr – Jun	3	35 000	105 000
Jul – Ago	2	60 000	120 000
Set - Oct	2	35 000	70 000
<b>Total año</b>	<b>12</b>		<b>345 000</b>

**TABLA N° 4.2**

**MODERNIZACIÓN DE REGULADORES DE TENSIÓN Y VELOCIDAD**

**EVALUACIÓN ECONÓMICA**  
(En US\$)

TASA DE DESCUENTO : 12%

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
FLUJO DE FONDOS	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>INGRESOS</b>		345 000	345 000	345 000	345 000	345 000	345 000	345 000	345 000	345 000	345 000	345 000	345 000	345 000	345 000	345 000
		345 000	345 000	345 000	345 000	345 000	345 000	345 000	345 000	345 000	345 000	345 000	345 000	345 000	345 000	345 000
<b>EGRESOS</b>		(114 933)	(114 933)	(114 933)	(114 933)	(114 933)	(114 933)	(114 933)	(114 933)	(114 933)	(114 933)	(114 933)	(114 933)	(114 933)	(114 933)	(114 933)
Equipos y Materiales	1 300 000															
Mano de Obra y Servicio de Terceros	263 000															
Aduana	161 000															
Cargas de gestión																
Depreciación		(114 933)	(114 933)	(114 933)	(114 933)	(114 933)	(114 933)	(114 933)	(114 933)	(114 933)	(114 933)	(114 933)	(114 933)	(114 933)	(114 933)	(114 933)
<b>UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS</b>		230 067	230 067	230 067	230 067	230 067	230 067	230 067	230 067	230 067	230 067	230 067	230 067	230 067	230 067	230 067
Impuestos (IR,PT)		(59 587)	(59 587)	(59 587)	(59 587)	(59 587)	(59 587)	(59 587)	(59 587)	(59 587)	(59 587)	(59 587)	(59 587)	(59 587)	(59 587)	(59 587)
<b>UTILIDAD NETA</b>		170 479	170 479	170 479	170 479	170 479	170 479	170 479	170 479	170 479	170 479	170 479	170 479	170 479	170 479	170 479
<b>FLUJO DE FONDOS NETO</b>	<b>(1 724 000)</b>	285 413	285 413	285 413	285 413	285 413	285 413	285 413	285 413	285 413	285 413	285 413	285 413	285 413	285 413	285 413

VALOR ACTUAL NETO (VAN) \$ 219 907

TASA INTERNA DE RETORNO (TIR) 14,3%

PERÍODO RECUP.CAPITAL (PRC) 6 Años

## CONCLUSIONES

1. Con el presente informe, se trata de contribuir a que los gestores de una empresa de generación de energía eléctrica y el ingeniero responsable de la operación de una central hidroeléctrica, puedan manejar los criterios o consideraciones técnicas para la toma de decisiones en vista a la modernización de los sistemas de control.
2. El objetivo final según este informe es facilitar el trabajo de elaboración de las especificaciones técnicas respectivas, y por ende viabilizar la convocatoria del concurso o licitación para el suministro e instalación de los equipos.
3. Los criterios de modernización a considerar para la toma de decisiones se basan en razones y alternativas de modernización de los sistemas de excitación y velocidad para el cumplimiento de las funciones a que deben responder los reguladores.

Las razones básicas a considerar son:

- Problemas de mantenimiento del equipamiento, caracterizados en la obsolescencia de los componentes, la indisponibilidad de repuestos y en el aumento de los mantenimientos correctivos que conducen a pérdidas económicas por indisponibilidad de los generadores. Estos problemas pueden estar localizados en los reguladores propiamente dichos y/o en los equipos complementarios o auxiliares. En el caso del sistema de excitación, pueden haber problemas en el regulador de tensión y/o en la excitatriz rotativa. En el sistema de velocidad, los problemas pueden estar en el regulador de velocidad y/o en la unidad de potencia hidráulica del sistema.
- Exigencias del sistema eléctrico de potencia, debido al crecimiento y desarrollo del sistema eléctrico interconectado nacional que requieren un mayor desempeño de la regulación de la central, para garantizar el sostenimiento adecuado de la tensión en el área de influencia de la central y las estabilidades transitoria y dinámica.
- Seguridad al equipo y a las personas, que debido a la operación degradada de los equipos implican un riesgo potencial de seguridad de la central y su personal con

pérdidas económicas grandes.

- Entorno tecnológico actual, con el uso de sistemas digitales que proporcionan mayores recursos de apoyo al mantenimiento y una mejoría del rendimiento de la central que implican en ganancia de utilidades económicas y retorno de la inversión en plazos más cortos.

Identificadas las razones, se pueden considerar las alternativas de modernización siguientes:

- Modernización parcial, que para el caso de problemas en el sistema de excitación, consiste necesariamente en el cambio del regulador de tensión propiamente dicho el cual incluye a la excitatriz auxiliar en un sistema analógico, manteniendo en funcionamiento la excitatriz rotativa. Para mejorar el desempeño se puede realizar esta modernización parcial adicionando una compensación a la constante de tiempo de la excitatriz rotativa.

Para el caso de problemas en el sistema de regulación de velocidad, la modernización parcial consiste en reemplazar el regulador de velocidad manteniendo el sistema hidráulico y los servomotores con la misma presión de aceite, realizando adecuaciones en la válvula distribuidora.

- Modernización total. En el sistema de excitación, además del regulador de velocidad es el cambio por un sistema estático que reemplaza a la excitatriz rotativa, consistente en un puente de tiristores y un transformador de excitación del tamaño de la potencia de campo del generador.

En el sistema de velocidad, además del cambio del regulador de velocidad, la característica principal consiste en elevar la presión del sistema de aceite lo cual hace que los equipos mecánico-hidráulicos sean más compactos, concentrados en una unidad de potencia hidráulica, que implican asimismo el cambio de los servomotores y el actuador electro-hidráulico.

4. Mantener la excitatriz rotativa, aun considerando la compensación de retardo de la constante de tiempo, torna el suministro más económico inicialmente. Sin embargo, con el tiempo los gastos fijos de la empresa pueden aumentar con respecto a la modernización total (con excitación estática) y el rendimiento de la máquina se degrada en su conjunto. En suma, se puede adoptar la alternativa de mantener, o no, la excitatriz rotativa existente, dependiendo del costo/beneficio de la instalación considerando además las ventajas de un mejor desempeño de acuerdo a las exigencias

que imponga el sistema eléctrico interconectado nacional.

5. Los reguladores de tensión y velocidad deberán ser digitales, basado en microprocesadores. Para mejorar la confiabilidad de los equipos pueden tener dos canales independientes, o sea, dos controladores o CPUs, uno principal y otro de respaldo con transferencia automática que trabajaría en caso el principal presente alguna falla, con manejo de la misma información instantánea entre los dos canales.
6. En el presente caso de la central hidroeléctrica de 48 MW, la decisión que se tomó fue la de llevar a cabo una modernización total de la central, el cual incluyó además el cambio y modernización del sistema de protección eléctrica de las unidades generadoras y transformadores de potencia, y la instalación de un sistema de supervisión con estaciones de trabajo en la central que incluye las maniobras de seccionadores e interruptores del patio de llaves, el control del reservorio, tubería de presión y el telemando desde un centro de control remoto para la operación desasistida de la central.
7. Los reguladores digitales de tensión y velocidad instalados en esta central se encuentran integrados en un mismo hardware o CPU, de modo que se denomina 'sistema integrado de regulación de tensión y velocidad', lo cual permite un ahorro de costos. Por confiabilidad del sistema de regulación se consideró un sistema de doble canal, o sea, dos CPU de los cuales uno funciona como principal y el otro de respaldo.

**ANEXO A**  
**INFORME DE PRUEBAS DINÁMICAS PARA LA REGULACIÓN DE**  
**FRECUENCIA DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE 48 MW,**  
**ANTES DE LA MODERNIZACIÓN**

**Ciente** COES-SINAC

**Asunto** CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE MALPASO (PERÚ)  
Pruebas Dinámicas para la Regulación de Frecuencia

**Pedido** 11-2004 COES-SINAC  
*PRUEBAS DINÁMICAS PARA LA REGULACIÓN DE FRECUENCIA DE LAS UNIDADES DE GENERACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO INTERCONECTADO*

**Notes** Revisiones 0.0

La reproducción parcial de este documento se permite sólo con el permiso escrito del CESI.

**N. paginas** 17

**N. pagina fuera del texto** 76

**Fecha** 24 Febrero 2005

**Preparado** B.U. RETE & TD - SC V. Lotto, F. Vago; P. Calabrese, G. Tagliabue

**Verificado** B.U. RETE & TD - SC V. Prandoni

**Aprobado** B.U. RETE & TD A. Ardito

**SUMARIO**

<b>1</b>	<b>INTRODUCCION.....</b>	<b>82</b>
<b>2</b>	<b>CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA PLANTA.....</b>	<b>83</b>
<b>3</b>	<b>DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ACTIVIDAD.....</b>	<b>85</b>
3.1	Tabla de Pruebas.....	86
3.1.1	Grupo 1.....	86
3.1.2	Grupo 2.....	86
3.1.3	Grupo 3.....	87
3.1.4	Grupo 4.....	87
<b>4</b>	<b>MODELO MATEMÁTICO DE LOS REGULADORES DE TURBINA.....</b>	<b>88</b>
4.1	Regulador WOODWARD.....	88
4.2	Regulador MORGAN-SMITH.....	88
<b>5</b>	<b>FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA DE REGULACIÓN DE FRECUENCIA.....</b>	<b>89</b>
<b>6</b>	<b>DESEMPEÑO DE LAS UNIDADES EN ARRANQUE, VACÍO Y PARALELO.....</b>	<b>90</b>
6.1	Desempeño del de las Unidades Conectadas a la Red SEIN.....	92
6.2	Característica de Estatismo Permanente e Insensibilidad.....	92
6.2.1	Grupo 1.....	92
6.2.2	Grupo 2.....	92
6.2.4	Grupo 4.....	93
6.3	Rechazo de Carga.....	93
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>94</b>

**HISTORIA DE LAS REVISIONES**

Número de la revisión	Fecha	Protocolo	Lista de los modificaciones
0.0	24/02/05	A5007000	Primera edición

## 1. INTRODUCCIÓN

En el periodo comprendido entre el 16 y el 21 de noviembre de 2004, por encargo del COES, se realizó una serie de pruebas sobre los sistemas de control de velocidad de los generadores de la C.H. de MALPASO, para verificar el desempeño del sistema de regulación de frecuencia.

Los objetivos de esta actividad, principalmente realizada en forma experimental, han sido:

3. Determinar las características dinámicas asociadas a la regulación de frecuencia y elaborar el modelo matemático, en términos de función de transferencia y esquema de bloque del sistema de control;
4. Caracterizar el comportamiento de la Regulación Primaria de frecuencia de las unidades conectadas al SEIN

El alcance del objetivo N°1 ha sido conseguido con:

- El análisis de la documentación técnica del regulador
- La respuesta a variaciones de la referencia de frecuencia con el grupo conectado
- La definición de la característica estática apertura-potencia a través de variaciones de la carga desde 0 hasta 100 % de la potencia con grupo conectado
- El rechazo de carga

El alcance del objetivo N°2 ha sido conseguido con:

- La variación de la carga (aumento y reducción) a la máxima velocidad de maniobra
- La respuesta a variaciones de la referencia de frecuencia con el grupo conectado
- La definición de la característica de estatismo permanente (bp) y de la insensibilidad con grabación de la frecuencia y de la potencia a carga constante en respuesta a las variaciones normales de la red
- El rechazo de carga

En este informe se resumen las actividades realizadas en la planta, durante las cuales se ha ejecutado la verificación de su comportamiento dinámico.

## 2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA PLANTA

C.H. MALPASO, ubicada en el departamento de Junín a 23 km de la ciudad minera de La Oroya a una cota de 3800 msnm, es una central hidráulica de embalse que recibe las aguas del río Mantaro y del lago Junín. Tiene 4 grupos con los rodetes de tipo Francis, 16 álabes, eje vertical y una única tubería de presión para todos los 4 grupos.

Cada grupo puede entregar sin problema de 0% a 100% la potencia nominal. No existe ningún problema de vibraciones, o cavitación. La planta está operada desde la sala mando.



En las tablas siguientes se muestran las principales características técnicas de la Central

### Características del Equipamiento Hidráulico y Mecánico

Nº Grupo	Tubería				Turbina		
	Long. (m)	Diam. (m)	H (Caída) (m)	Q (Caudal) (m <sup>3</sup> /s)	Fabricante	Tipo	Q (Caudal) (m <sup>3</sup> /s)
1	193	5,2/3,7/2,6	79	80	WOODWARD	Francis	20
2					MORGAN-SMITH		20
3					MORGAN-SMITH		20
4					MORGAN-SMITH		20

### Características del Equipamiento Eléctrico

Nº Grupo	Generador				Regulador velocidad	
	Fabricante	P <sub>n</sub> (MW)	PD <sup>2</sup> (t m <sup>2</sup> )	RPM	Fabricante	Tipo
1	GE	13,6	552	257	WOODWARD	Mecánico
2					MORGAN-SMITH	Mecánico
3					MORGAN-SMITH	Mecánico
4					MORGAN-SMITH	Mecánico

Todas las unidades están equipadas con un sistema de control de tensión antiguo, con excitatriz principal y piloto rodantes coaxiales con el generador y regulador a reóstato motorizado.



### 3. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ACTIVIDAD

Las pruebas se han realizado en los grupos 1-2-3 y 4 con un sistema de medición constituido por adecuados transductores de cantidades eléctricas, con elevada resolución y con elevada rapidez de respuesta. Para la grabación de los datos se ha empleado un moderno sistema de registro con microprocesador, provisión **CESI**.

El significado de los símbolos de las cantidades eléctricas utilizadas en los archivos son los siguientes:

- $w_G$  = Desvío de la frecuencia (Hz) respecto al valor nominal de 60 Hz (señal provista por el transductor ENEL-FD03 : precisión mejor de 0.1 %, constante de tiempo = 40 ms conectado al alternador taquimétrico del regulador de velocidad)
- $Y$  = Posición distribuidor (p.u.) (señal provista por un transductor potenciométrico de desplazamiento instalado por CESI)
- $fr$  = Desvío de la frecuencia de la red (Hz) respecto al valor nominal de 60 Hz (señal provista por el transductor CESI-DUET : precisión mejor de 0.1 %, constante de tiempo = 40 ms conectado al TV de machina)
- $Pe$  = Potencia activa del grupo (MW) (señal provista por el transductor CESI-DUET : precisión = 0.5 %, constante de tiempo = 40 ms)



Sistema de medición CESI



Medición posición distribuidor

Se destaca que en la planta C.H. MALPASO no se pudieron realizar todas las pruebas previstas en el programa inicial, pues los reguladores de tipo mecánico no permiten de aplicar las señales necesarias para efectuar la respuesta en frecuencia y al escalón de referencia de frecuencia.

### 3.1 Tabla de Pruebas

Las siguientes tablas muestran la lista completa de los ensayos efectuados en la C.H. de MALPASO y permiten encontrar los diagramas correspondientes de las grabaciones realizadas.

#### 3.1.1 Grupo 1

<b>Tipo de prueba</b>	<b>CONDICIÓN DEL SISTEMA</b>	<b>Archivos</b>
Arranque del grupo en prueba	Grupo1 en arranque	<a href="#">1Arranque.doc</a>
Comportamiento en vacío	Grupo1 en vacío	<a href="#">1Vacio.doc</a>
Variación rápida de la referencia de frecuencia de grupo en prueba	Grupo1 en vacío	<a href="#">1VarF.doc</a> <a href="#">1Paralelo.doc</a>
Característica apertura-potencia de grupo en prueba	Grupo1 acoplado, variación lenta de la carga 0-100% y 100-0%	<a href="#">1AperturaPotencia.doc</a>
Variación de la carga (aumento y reducción) a la máxima velocidad de maniobra	Grupo1 acoplado variación rápida de la carga 0-100% y 100-0%	<a href="#">1VarP.doc</a>
Rechazo de carga del grupo en prueba	Grupo1 acoplado: rechazo de 11 MW	<a href="#">1Rechazo11MW.doc</a>
Definición de la característica de estatismo permanente (bp) con grabación de la frecuencia y de la potencia a carga constante en respuesta a las variaciones normales de la red	Grupo1 acoplado con carga constante	<a href="#">1Estatismo.doc</a>

#### 3.1.2 Grupo 2

<b>Tipo de prueba</b>	<b>Condición del Sistema</b>	<b>Archivos</b>
Arranque del grupo en prueba	Grupo2 en arranque	<a href="#">2Arranque.doc</a>
Comportamiento en vacío	Grupo2 en vacío	<a href="#">2Vacio.doc</a>
Variación rápida de la referencia de frecuencia de grupo en prueba	Grupo2 en vacío	<a href="#">2VarF.doc</a> <a href="#">2Paralelo.doc</a>
Característica apertura-potencia de grupo en prueba	Grupo2 acoplado, variación lenta de la carga 0-100% y 100-0%	<a href="#">2AperturaPotencia.doc</a>
Variación de la carga (aumento y reducción) a la máxima velocidad de maniobra	Grupo2 acoplado variación rápida de la carga 0-100% y 100-0%	<a href="#">2VarP.doc</a>
Rechazo de carga del grupo en prueba	Grupo2 acoplado: rechazo de 6 MW	<a href="#">2Rechazo6MW.doc</a>
Definición de la característica de estatismo permanente (bp) con grabación de la frecuencia y de la potencia a carga constante en respuesta a las variaciones normales de la red	Grupo2 acoplado con carga constante	<a href="#">2Estatismo.doc</a>

### 3.1.3 Grupo 3

Tipo de prueba	Condición de sistema	Archivos
Arranque del grupo en prueba	Grupo3 en arranque	<a href="#">3Arranque.doc</a>
Comportamiento en vacío	Grupo3 en vacío	<a href="#">3Vacío.doc</a>
Variación rápida de la referencia de frecuencia de grupo en prueba	Grupo3 en vacío	<a href="#">3VarF.doc</a>
Característica apertura-potencia de grupo en prueba	Grupo3 acoplado, variación lenta de la carga 0-100% y 100-0%	<a href="#">3AperturaPotencia.doc</a>
Variación de la carga ( en aumento y reducción ) a la máxima velocidad de maniobra	Grupo3 acoplado variación rápida de la carga 0-100% y 100-0%	<a href="#">3VarP.doc</a>
Rechazo de carga del grupo en prueba	Grupo3 acoplado: rechazo de 6 MW	<a href="#">3Rechazo6MW.doc</a>
Definición de la característica de estatismo permanente (bp) con grabación de la frecuencia y de la potencia a carga constante en respuesta a las variaciones normales de la red	Grupo3 acoplado con carga constante	<a href="#">3Estatismo.doc</a>

### 3.1.4 Grupo 4

Tipo de prueba	Condición del Sistema	Archivos
Arranque del grupo en prueba	Grupo4 en arranque	<a href="#">4Arranque.doc</a>
Comportamiento en vacío	Grupo4 en vacío	<a href="#">4Vacío.doc</a>
Variación rápida de la referencia de frecuencia de grupo en prueba	Grupo4 en vacío	<a href="#">4VarF.doc</a> <a href="#">4Paralelo.doc</a>
Característica apertura-potencia de grupo en prueba	Grupo4 acoplado, variación lenta de la carga 0-100% y 100-0%	<a href="#">4AperturaPotencia.doc</a>
Variación de la carga (aumento y reducción) a la máxima velocidad de maniobra	Grupo4 acoplado variación rápida de la carga 0-100% y 100-0%	<a href="#">4VarP.doc</a>
Rechazo de carga del grupo en prueba	Grupo4 acoplado: rechazo de 6 MW	<a href="#">4Rechazo8MW.doc</a>
Definición de la característica de estatismo permanente (bp) con grabación de la frecuencia y de la potencia a carga constante en respuesta a las variaciones normales de la red	Grupo4 acoplado con carga constante	<a href="#">4Estatismo.doc</a>

## 4. MODELO MATEMÁTICO DE LOS REGULADORES DE TURBINA

No fue posible determinar el modelo matemático del regulador de turbina. En la planta no estaba disponible alguna documentación técnica y no fue posible efectuar las pruebas experimentales de identificación en el caso de los reguladores de tipo mecánico.

### 4.1 Regulador WOODWARD

Es un regulador de tipo mecánico antiguo, puesto en servicio en el año 1954, con el transductor de velocidad de tipo taqui-acelerométrico. La toma de carga se actúa exclusivamente por el mando del "Variagiri" (referencia de frecuencia).



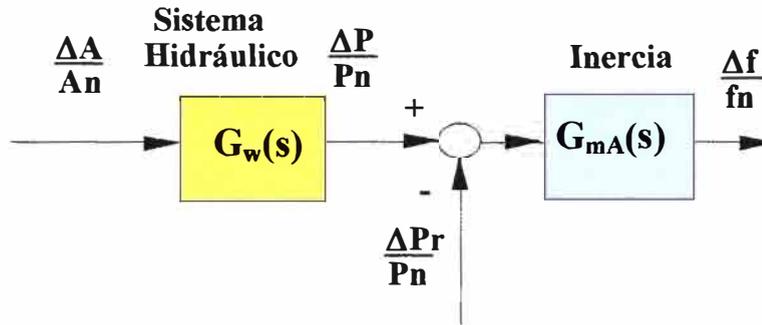
### 4.2 Regulador MORGAN-SMITH

Es un regulador de tipo mecánico antiguo, puesto en servicio en el año 1936, con el transductor de velocidad del tipo a retroalimentación transitoria. La toma de carga se actúa exclusivamente por el mando del "Variagiri" (referencia de frecuencia).



## 5. FUNCION DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA DE REGULACIÓN DE FRECUENCIA

Siendo los reguladores de tipo mecánico se puede determinar solo el esquema de bloque de la parte hidráulica y mecánica del sistema de regulación de frecuencia, que resulta ser el siguiente:



En particular:

$$G_w(s) = \frac{1 - sT_w}{1 + s\frac{T_w}{2}} \quad \text{representa la fdt de la parte hidráulica}$$

$$G_{mA}(s) = \frac{1}{sT_a} \quad \text{representa la fdt de la parte mecánica, que tiene en cuenta de la inercia del alternador}$$

Considerando los principales datos característicos de la planta, como son:

- Hn** (salto neto)
- Qn** (caudal del conducto)
- Lc** (longitud del conducto)
- Ac** sección media del conducto)
- $\omega_n$  (velocidad nominal de rotación)
- Pn** (potencia activa nominal del grupo)
- PD<sup>2</sup>** (momento de inercia del grupo)

Se pueden deducir los siguientes parámetros característicos, por cada grupo y para el conducto forzado:

$$T_a = \frac{PD^2 \omega_n^2}{4 Pn} \quad \text{(tiempo característico de la unidad)}$$

$$T_w = \frac{Lc}{g Ac Hn} \frac{Q_n}{Hn} \quad \text{(tiempo característico del conducto)}$$

Se pone en evidencia que el valor del tiempo característico de cada grupo  $T_a$  ha sido comprobado también de modo experimental, con las pruebas de rechazo de carga. Además a través de la prueba de variación lenta de la carga han sido verificados otros datos importantes para caracterizar el comportamiento de la regulación de frecuencia como: la ganancia de la característica apertura-potencia ( $K_{dmv}$  = ganancia en vacío;  $K_{dmax}$  = ganancia máxima) y la máxima velocidad de apertura y cierre del distribuidor.

En la tabla siguiente se muestran todos los valores de estos parámetros.

Grupo	$K_{dmv}$	$K_{dmax}$	$T_w$ (s)	$T_a$ (s) calc	$T_a$ (s) exper	Velocidad Distribuidor ( pu/s )		Archivo
						Apertura	Cierre	
1	1,1	1.5	1,58	7,34	7,1	0,14	0,04	<a href="#">1AperturaPotencia.doc</a> <a href="#">1Rechazo11MW.doc</a>
2	1,5	1,5			7,1	0,2	0,14	<a href="#">2AperturaPotencia.doc</a> <a href="#">2Rechazo6MW.doc</a>
3	1,4	1.7			7,2	(*)	0,16	<a href="#">3AperturaPotencia.doc</a> <a href="#">3Rechazo6MW.doc</a>
4	1,5	1.7			7,2	0,16	0,08	<a href="#">4AperturaPotencia.doc</a> <a href="#">4Rechazo8MW.doc</a>

(\*) No se pudo detectar el valor de la velocidad de apertura del grupo 3 pues se paró durante el rechazo

## 6. DESEMPEÑO DE LAS UNIDADES EN ARRANQUE, VACÍO Y PARALELO

Las pruebas de arranque y en vacío permiten verificar el correcto desempeño de las unidades en estas fases, en particular se pueden examinar:

- La correcta puesta en tensión del grupo;
- El desarrollo del transitorio para alcanzar la velocidad nominal y la presencia de oscilaciones de la velocidad del grupo durante la rotación en vacío, debidas a un ajuste no optimizado de los parámetros de control o juegos mecánicos;
- Los niveles de apertura del distribuidor requeridos para mantener el grupo en rotación a la velocidad nominal;
- El desarrollo del transitorio de sincronización.

Los resultados conseguidos se consignan en las tablas siguientes.

Grupo	Puesta en tensión	Transitorio alcance $\omega_n$	Nivel Apertura Distribuidor en Vacío	Archivo
<b>Gr1</b>	Muy lento > 100 s	regular	0.04 pu	<a href="#">1Arranque.doc</a>
<b>Gr2</b>	Muy lento > 100 s	Presencia de oscilaciones	0,07 pu	<a href="#">2Arranque.doc</a>
<b>Gr3</b>	Muy lento > 100 s	Presencia de oscilaciones	0.06pu	<a href="#">3Arranque.doc</a>
<b>Gr4</b>	Muy lento > 200 s	Presencia de oscilaciones	0,04 pu	<a href="#">4Arranque.doc</a>

<b>Grupo</b>	<b>Forma oscilación de velocidad en vacío</b>	<b>Amplitud Oscilación [Hz pico-pico]</b>	<b>Periodo Oscilación [s]</b>	<b>Archivo</b>
<b>Gr1</b>	Bien amortiguada	-	-	<a href="#">1Vacio.doc</a>
<b>Gr2</b>	Sinusoidal	0,9	9	<a href="#">2Vacio.doc</a>
<b>Gr3</b>	Sinusoidal	0,42	21	<a href="#">3Vacio.doc</a>
<b>Gr4</b>	Sinusoidal	0,6	15	<a href="#">4Vacio.doc</a>

Valores de la amplitud de la oscilación de frecuencia en vacío demasiados elevados pueden poner más dificultosa la fase de sincronización, prolongando el tiempo necesario para efectuar la maniobra de paralelo, lo que en esta situación puede resultar imprecisa, con consecuentes anchas oscilaciones de potencia en el momento de la sincronización. En efecto en la planta de Malpaso la elevada amplitud de las oscilaciones en vacío no permitía utilizar el dispositivo automático de sincronización y el paralelo había que efectuarlo manualmente.

Se puede observar que durante el paralelo, mientras el desempeño del grupo Gr1 resulta regular ([1Paralelo.doc](#)), los grupos Gr3 y Gr4 muestran oscilaciones de potencia del orden de  $\pm 3$  MW, ([4Paralelo.doc](#)) y el grupo Gr2 presenta una oscilación aún más ancha ( $\pm 10$  MW, [2Paralelo.doc](#))

Las pruebas de variación rápida de la referencia de frecuencia en vacío (actuando sobre el “variagiri”), permiten conseguir una indicación de máxima sobre el comportamiento dinámico del regulador. Los resultados son mostrados en la tabla siguiente.

<b>Grupo</b>	<b>Tiempo respuesta</b>	<b>Tipo Transitorio alcance <math>\omega n</math></b>	<b>Archivo</b>
<b>Gr1</b>	Del orden de 100 s	Poco amortiguado (*)	<a href="#">1VarF.doc</a>
<b>Gr2</b>	Del orden de 100 s	Bien amortiguado (*)	<a href="#">2VarF.doc</a>
<b>Gr3</b>	Del orden de 100 s	Bien amortiguado (*)	<a href="#">3VarF.doc</a>
<b>Gr4</b>	Del orden de 50 s	Bien amortiguado (*)	<a href="#">4VarF.doc</a>

(\*) Para la evaluación de este transitorio no se consideran las oscilaciones persistentes

## 6.1 Desempeño de las Unidades Conectadas a la Red SEIN

Para verificar el desempeño de la regulación de velocidad, en el funcionamiento en paralelo, con los grupos conectados a la red SEIN, se pudieron solo efectuar pruebas de variación de la carga (aumento y reducción) a la máxima velocidad de maniobra.

Los resultados conseguidos se consignan en la tabla siguiente.

Grupo	Tiempo respuesta [s]	Gradiente máx P en aumento [pu/s]	Gradiente P en aumento [pu/s]	Gradiente max P en bajada [pu/s]	Gradiente P en bajada [pu/s]	Archivo
Gr1	Del orden de 100 s	0,02	0,02	0,1	0,025	<a href="#">1VarP.doc</a>
Gr2	Del orden de 50 s	0,04	0,04	0,05	0,01	<a href="#">2VarP.doc</a>
Gr3	Del orden de 100 s	0,03	0,005	0,035	0,015	<a href="#">3VarP.doc</a>
Gr4	Del orden de 500 s	0,013	0,0008	0,018	0,0006	<a href="#">4VarP.doc</a>

La dinámica de respuesta del grupo Gr4 resulta demasiado lenta, mientras los grupos Gr1, Gr2, Gr3 presentan valores normales para este tipo de planta.

## 6.2 Característica de Estatismo Permanente e Insensibilidad

La evaluación del valor global de estatismo permanente de cada unidad se ha realizado a través de un registro continuo (de duración mínima de 2 horas) de la frecuencia de la red y la potencia eléctrica producida por el grupo en prueba.

Filtrando oportunamente las señales  $f_{red}$  de la frecuencia de red y  $P_i$  de la potencia eléctrica de grupo, y poniéndoles en relación en un diagrama x-y se puede obtener una trayectoria indicativa del valor del estatismo de potencia de la unidad. Además, comparando el desarrollo en el tiempo de las mismas señales es posible estimar la eventual presencia de una banda muerta o de una insensibilidad en el sistema de control.

Los resultados logrados se consignan en la tabla siguiente.

Grupo	Estatismo de potencia [%]	Estatismo de potencia [MW/Hz]	Archivo
Gr1	-3	7,6	<a href="#">1Estatismo.doc</a>
Gr2	-2	11,3	<a href="#">2Estatismo.doc</a>
Gr3	Indefinido	-	<a href="#">3Estatismo.doc</a>
Gr4	1,7	13,3	<a href="#">4Estatismo.doc</a>

### 6.2.1 Grupo 1

El valor del estatismo permanente resulta bastante bajo y depende del punto de trabajo ( $bp = 3\%$  para  $P_o = 8$  MW, correspondiente a una ganancia de 7,6 MW/Hz;  $bp = 9\%$  para  $P_o = 10,6$  MW, correspondiente a una ganancia de 2,5 MW/Hz). La insensibilidad resulta inferior a 50 mHz.

### 6.2.2 Grupo 2

El valor del estatismo permanente resulta bastante bajo ( $bp = 2\%$ , correspondiente a una ganancia de 11,3 MW/Hz). La insensibilidad resulta inferior a 50 mHz.

### 6.2.3 Grupo 3

Los resultados detectados no permiten definir el valor del estatismo permanente, el grupo no responde en modo regular a las variaciones de frecuencia de la red, probablemente por la presencia de una insensibilidad muy elevada.

#### 6.2.4 Grupo 4

El valor del estatismo permanente resulta bastante bajo ( $bp = 1,7\%$ , correspondiente a una ganancia de 13,3 MW/Hz). La insensibilidad resulta inferior a 50 mHz.

En conclusión puede afirmarse que la regulación primaria de frecuencia en C.H. MALPASO es realizada exclusivamente por los grupos Gr1, Gr2 y Gr4.

### 6.3 Rechazo de Carga

Estas pruebas permiten estimar el comportamiento dinámico del sistema de regulación de frecuencia en régimen no lineal de operación, frente a grandes variaciones. El desempeño correcto del grupo, en consecuencia del rechazo de carga, requiere que la unidad se mantenga en operación en rotación en vacío a la velocidad nominal, inmediatamente disponible por una sucesiva maniobra de sincronización. El transitorio de sobrevelocidad que se produce debe resultar de amplitud reducida y el grupo no debe pararse por una intervención inapropiada de protecciones o de la lógica de control.

Además, examinando el desarrollo del transitorio de frecuencia, se puede verificar el valor del tiempo característico de máquina  $Ta$  y determinar otros datos importantes como la velocidad de apertura y cierre del distribuidor.

Los resultados logrados se consignan en las tablas siguientes.

Grupo	$P_o$ [MW]	$\Delta\omega_{max}$ [Hz]	$Ta$ [s]	Vel1 ap [pu/s]	Vel1 ch [pu/s]	Vel2 ch [pu/s]	Archivo
Gr1	11	20	7,1	0,04	0,14	0,14	<a href="#">1Rechazo11MW.doc</a>
Gr2	6,4	4,8	7,1	0,14	0,2	0,2	<a href="#">2Rechazo6MW.doc</a>
Gr3	5,9	5,9	7,2	-	0,16	0,16	<a href="#">3Rechazo6MW.doc</a>
Gr4	8,4	8,4	7,1	0,08	0,16	0,06	<a href="#">4Rechazo8MW.doc</a>

Grupo	Sobretensión de máquina [KV]	Archivo
Gr1	9,62	<a href="#">1Rechazo11MW.doc</a>
Gr2	8,33	<a href="#">2Rechazo6MW.doc</a>
Gr3	8,39	<a href="#">3Rechazo6MW.doc</a>
Gr4	9,25	<a href="#">4Rechazo8MW.doc</a>

El desempeño de las unidades de generación frente al rechazo de carga no resulta satisfactorio. En consecuencia de la respuesta demasiado lenta de los reguladores de voltaje por la cual debería intervenir la correspondiente protección y producirse la parada del grupo. En efecto esto ocurre solo en el grupo 3, mientras los otros se mantienen en servicio, porque sus protecciones no están correctamente ajustadas.

## 7. CONCLUSIONES

Los resultados de las pruebas realizadas en la C.H. MALPASO, han mostrado que el desempeño de los reguladores no es satisfactorio. En la fase de rotación en vacío los grupos Gr2, Gr3, Gr4 presentan oscilaciones de velocidad demasiado anchas (particularmente en el grupo Gr2), que pueden hacer difícil y retrasar la maniobra de paralelo. Lo contrario ocurre en el grupo 1 que parece bien controlado y tiene un comportamiento correcto.

En las unidades Gr2, Gr3, Gr4 la respuesta a variaciones rápidas de la referencia de frecuencia resulta bien amortiguada incluso demasiadas lentas, mientras el grupo Gr1 muestra un bajo amortiguamiento.

Con respecto al valor de máximo gradiente de variación de la carga con el grupo conectado a la red, se encuentra un desempeño lento de todos los grupos, este comportamiento lento es particularmente evidente en el grupo Gr4.

Los resultados también muestran un comportamiento satisfactorio en los reguladores de velocidad de los grupos Gr1, Gr2 y Gr4 con respecto a la regulación primaria de frecuencia. De las pruebas se obtiene un valor del estatismo permanente del orden del 2-3% y una insensibilidad inferior a 50 mHz. Para el Gr3 se encuentra una larga insensibilidad que limita fuertemente la contribución de esta máquina a la regulación primaria de frecuencia. Se destaca que no es posible detectar el valor de ajuste del estatismo sobre los reguladores.

Con respecto a las pruebas de rechazo de carga los resultados obtenidos muestran que los grupos tienen un desempeño no satisfactorio. Durante la fase de sobrevelocidad la tensión de la máquina se eleva excesivamente, por efecto de la respuesta dinámica demasiado lenta del regulador de voltaje de reóstato motorizado. La protección de sobretensión de la máquina debería intervenir y sacar el grupo de servicio. En realidad se observa la parada del grupo solo por la unidad Gr3, siendo probablemente ajustadas en modo no correcto las protecciones de sobretensión de las otras unidades.

Este problema tiene solución sólo con una sustitución de los actuales reguladores por reguladores más modernos.

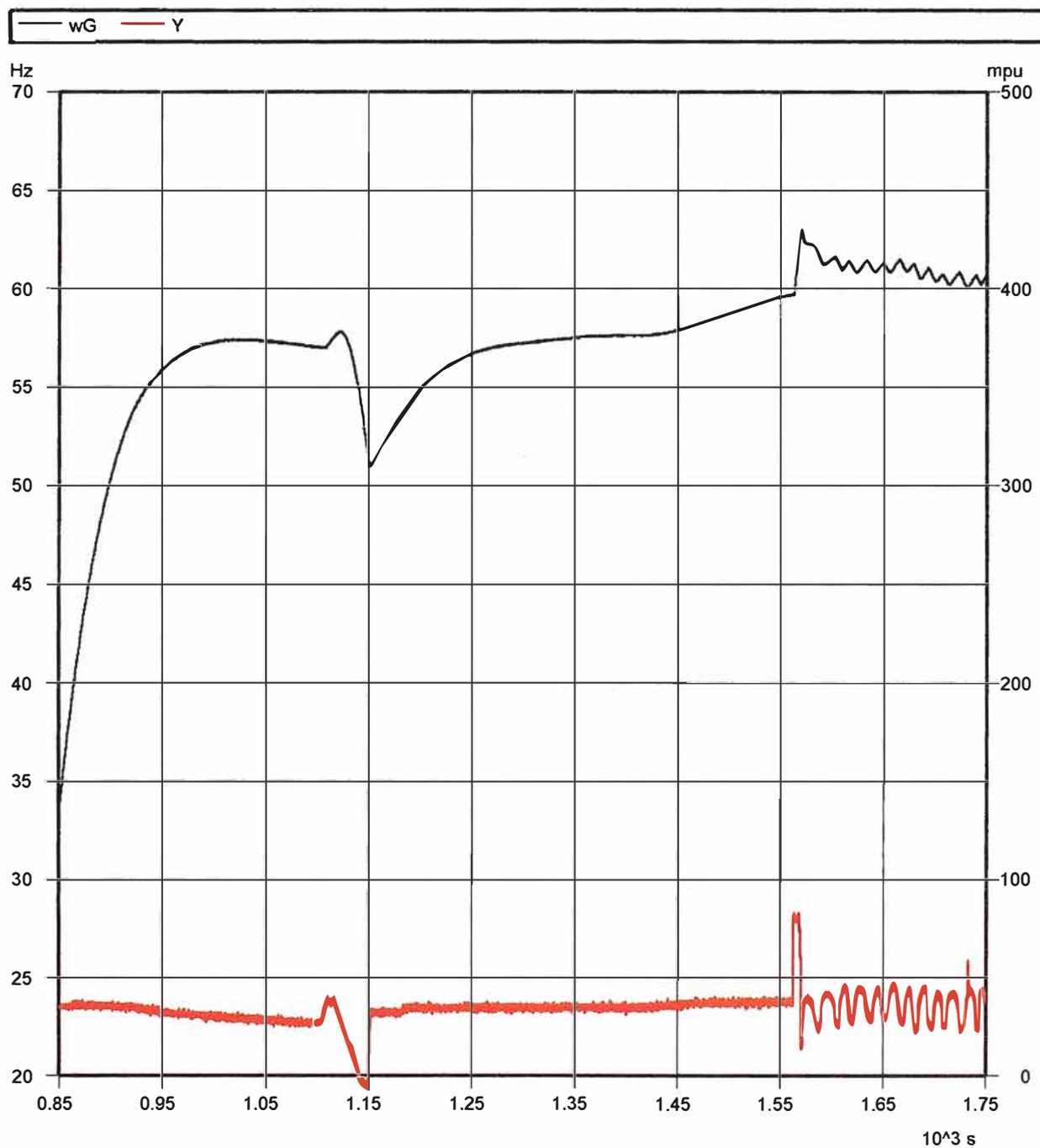
Por el tema del modelo de la función de transferencia del sistema de control de velocidad se destaca que no hay documentación técnica disponible y que los reguladores son de tipo mecánico y no es posible realizar las necesarias pruebas de identificación.

# CENTRAL HIDROELECTRICA DE MALPASO

## Pruebas dinámicas para la regulación de frecuencia

### Gr. 4

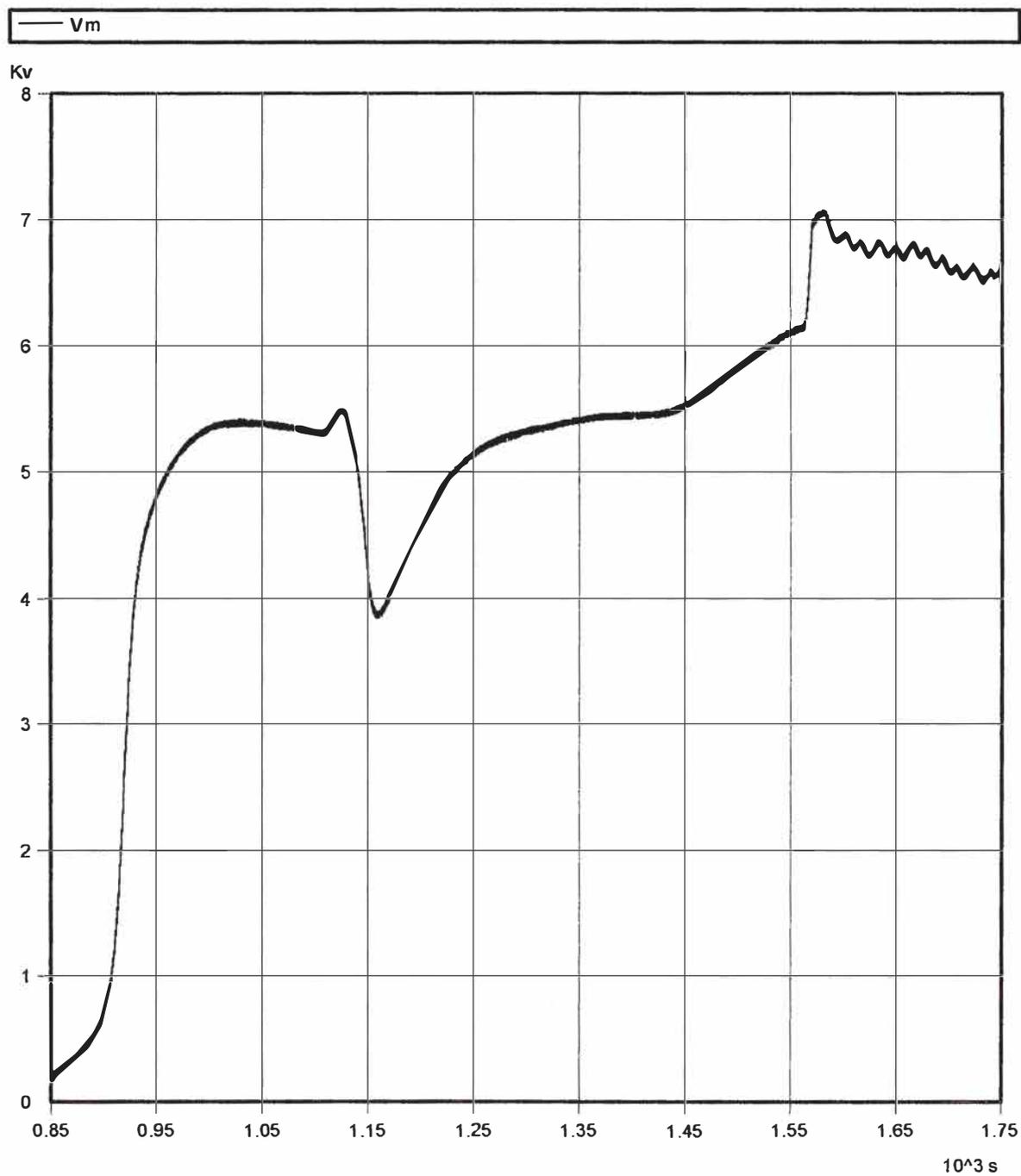
#### Arranque



**Fig 1**

**CENTRAL HIDROELECTRICA DE MALPASO**  
Pruebas dinámicas para la regulación de frecuencia

Gr. 4  
Arranque



**Fig 2**

# CENTRAL HIDROELECTRICA DE MALPASO

## Pruebas dinámicas para la regulación de frecuencia

Gr. 4  
Vacío

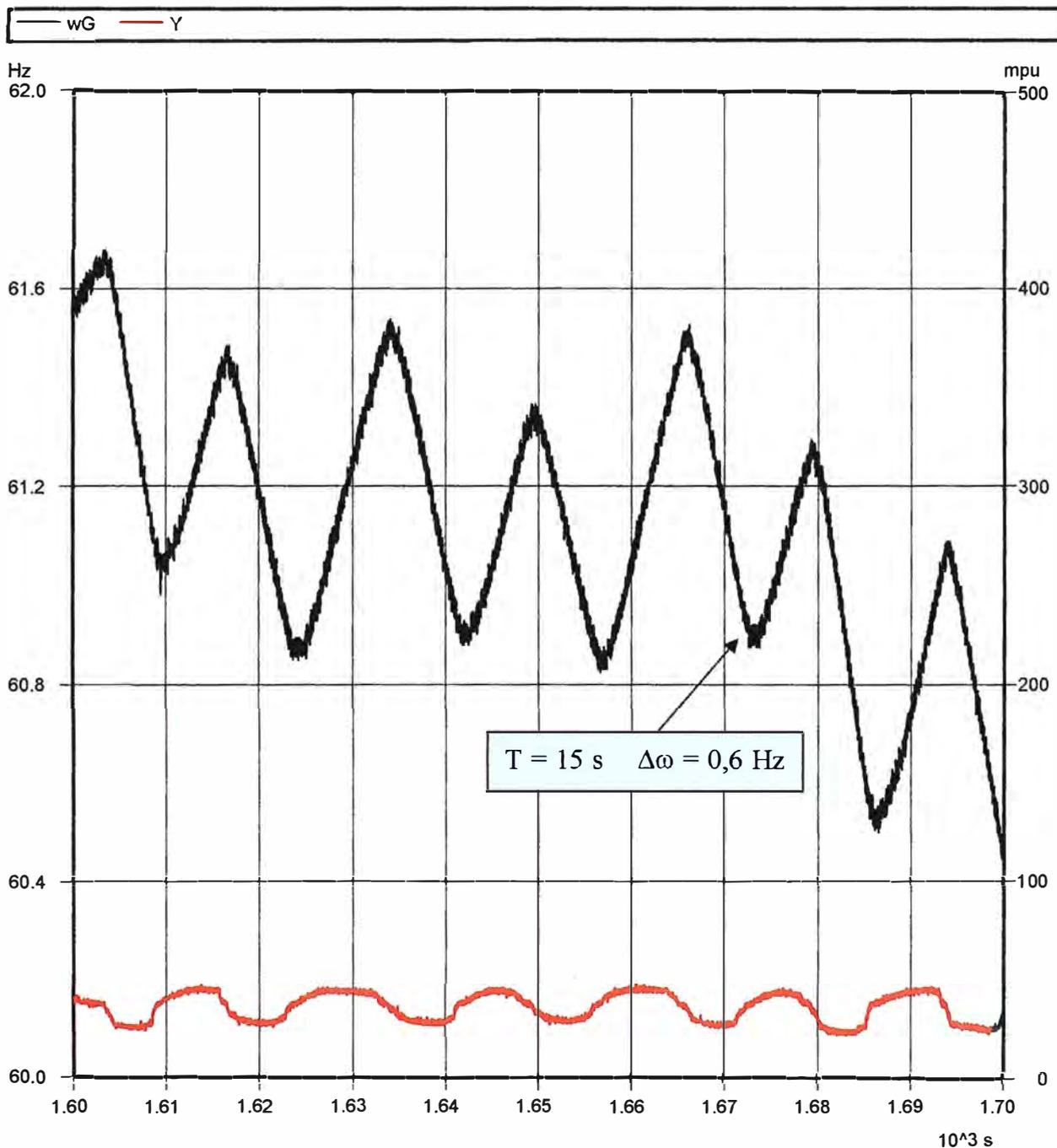


Fig 1

**CENTRAL HIDROELECTRICA DE MALPASO**  
Pruebas dinámicas para la regulación de frecuencia

Gr. 4  
Variación Fref en Vacío

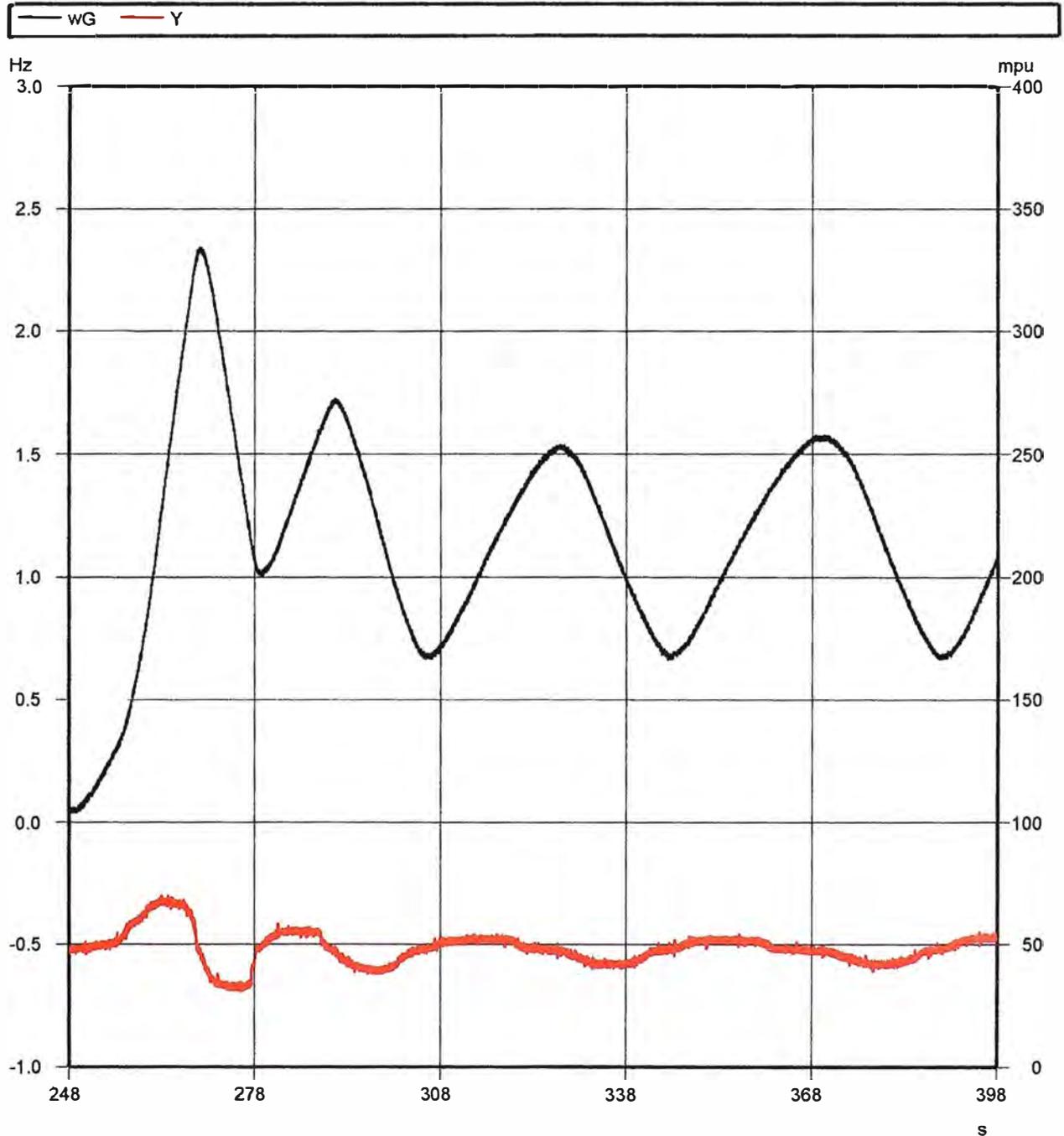


Fig 1

**CENTRAL HIDROELECTRICA DE MALPASO**  
Pruebas dinámicas para la regulación de frecuencia

Gr. 4  
Variación Fref en Vacío

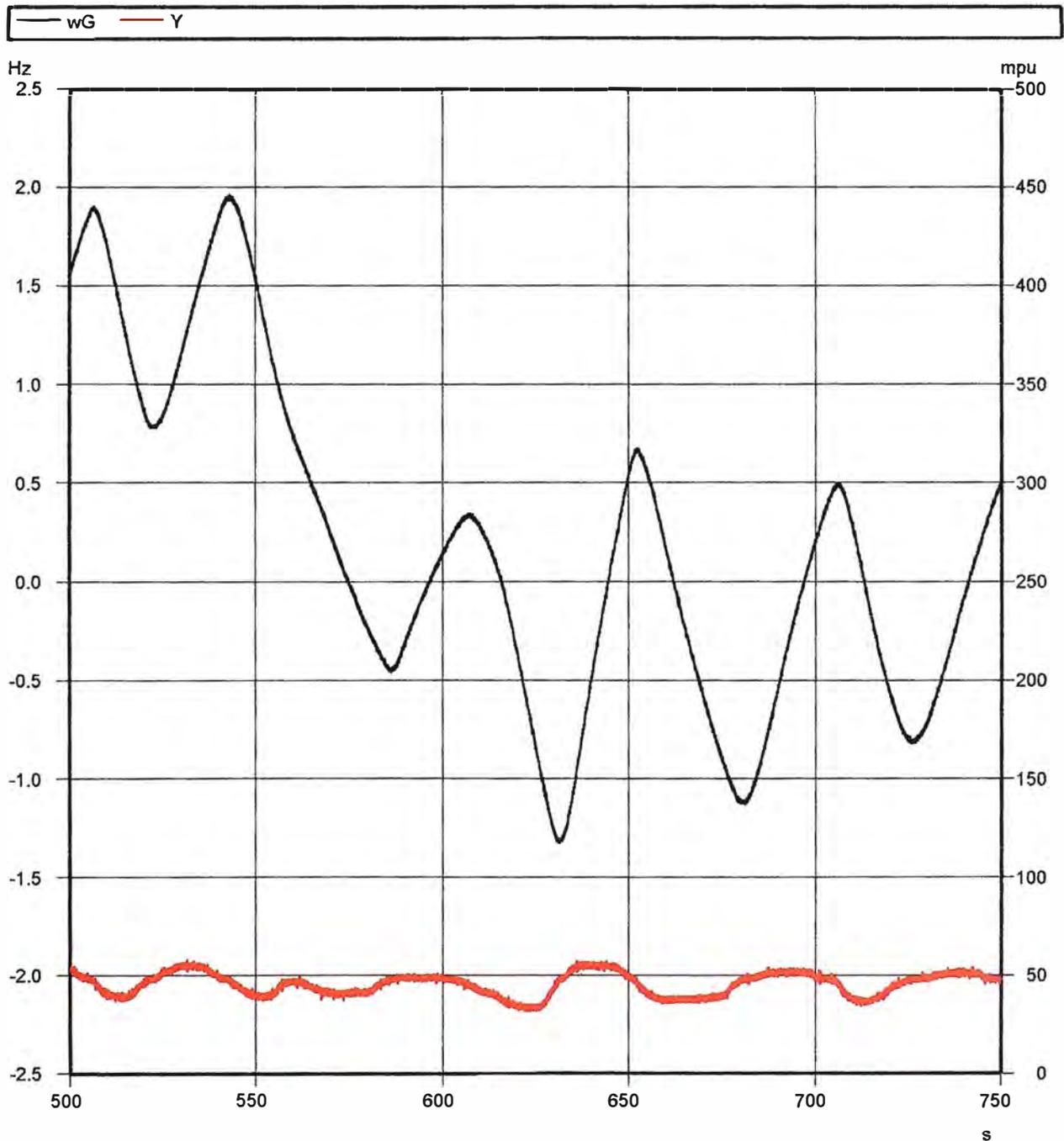


Fig 2

# CENTRAL HIDROELECTRICA DE MALPASO

## Pruebas dinámicas para la regulación de frecuencia

Gr. 4  
Paralelo

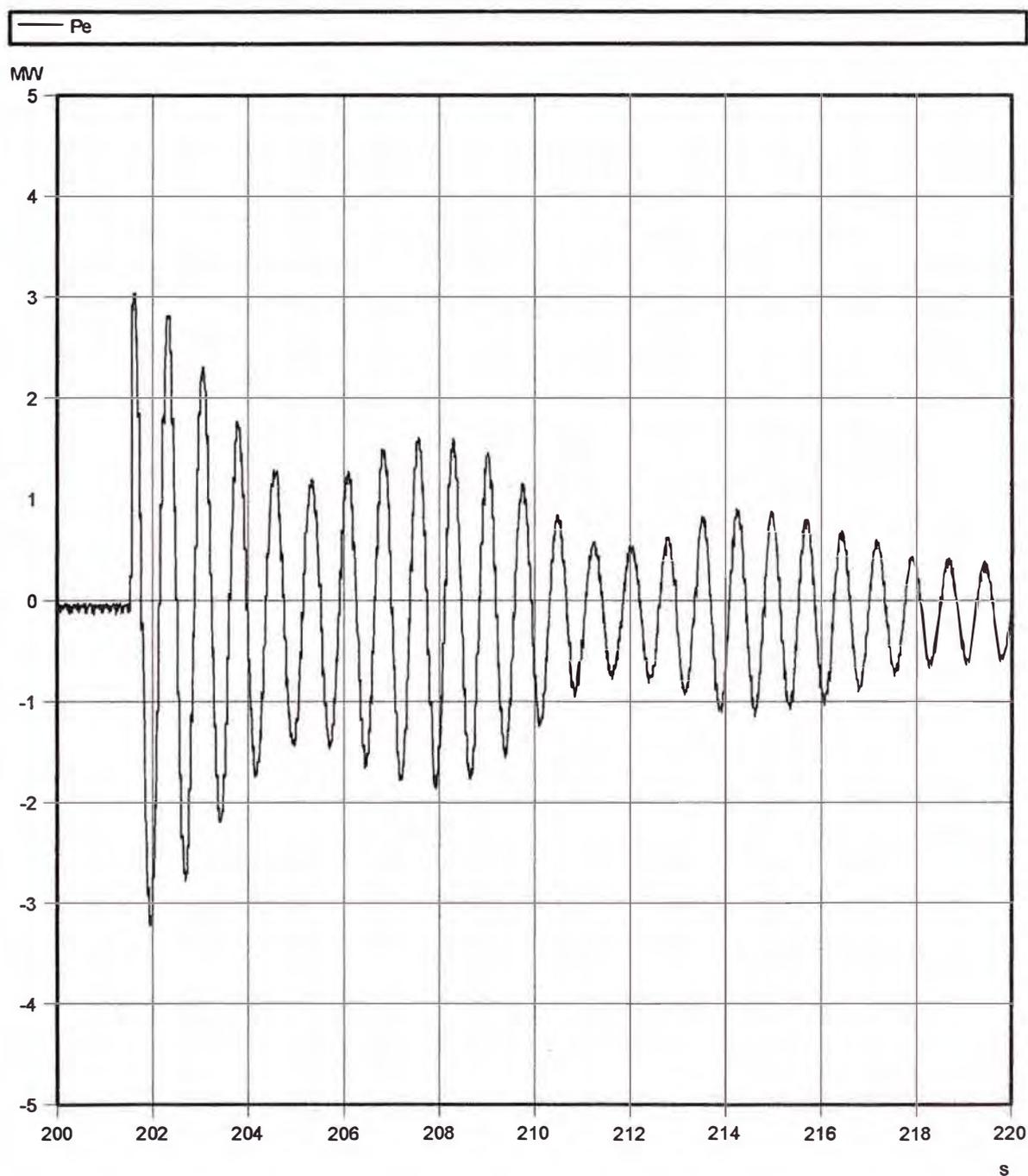


Fig 1

## CENTRAL HIDROELECTRICA DE MALPASO

### Pruebas dinámicas para la regulación de frecuencia

#### Gr. 4 Paralelo

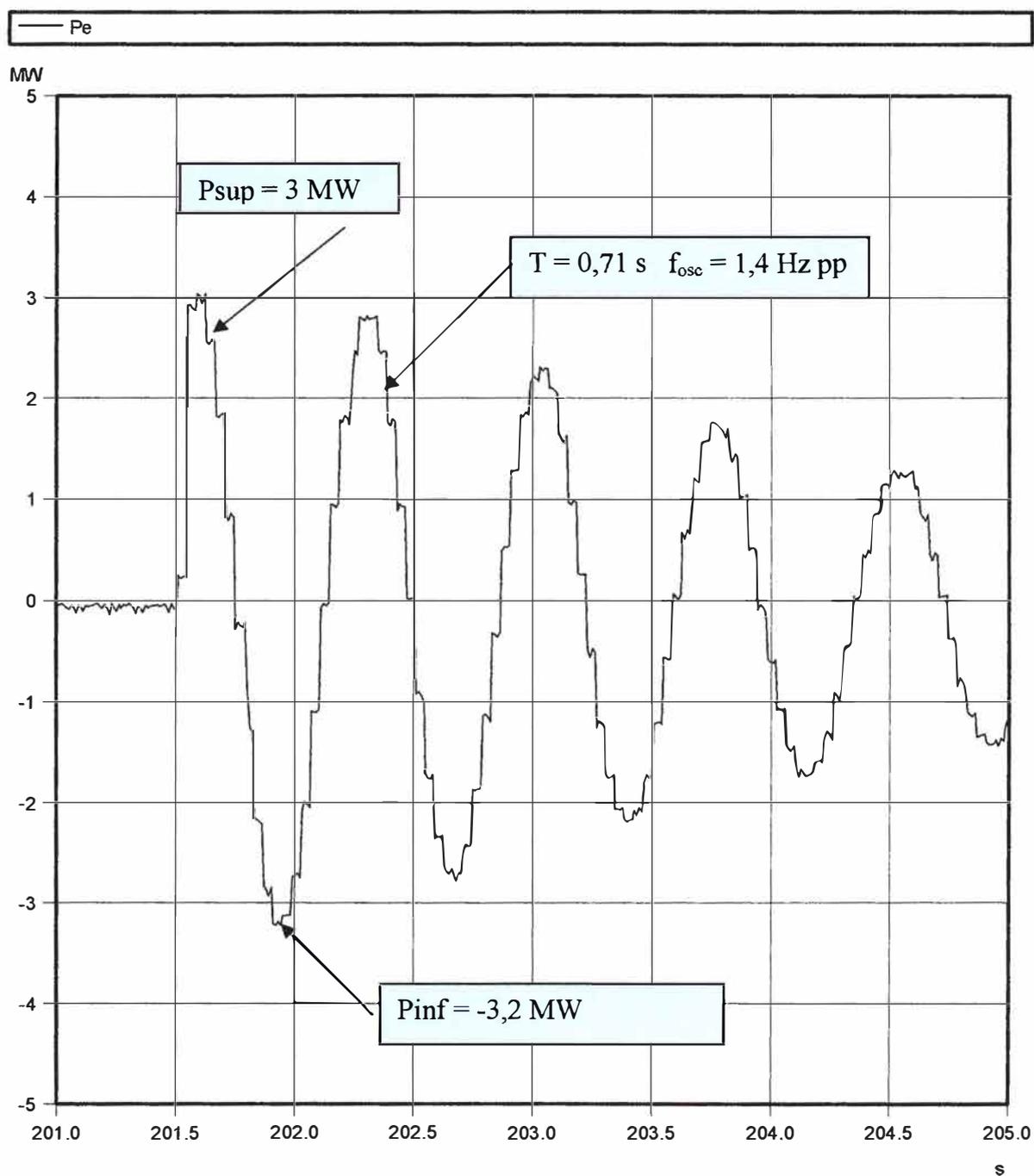


Fig 2

# CENTRAL HIDROELECTRICA DE MALPASO

## Pruebas dinámicas para la regulación de frecuencia

Gr. 4  
Característica estática apertura potencia

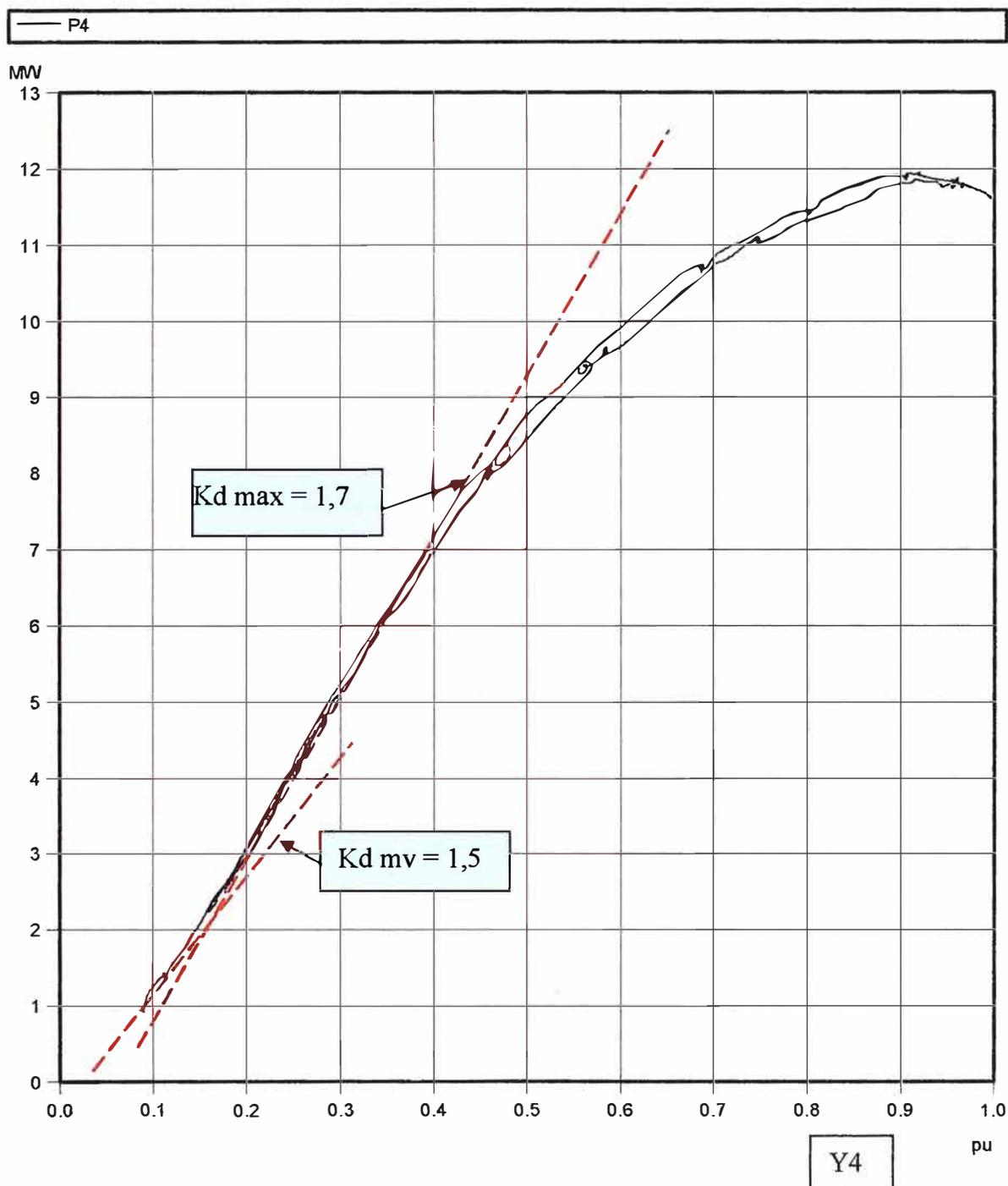


Fig 1

# CENTRAL HIDROELECTRICA DE MALPASO

## Pruebas dinámicas para la regulación de frecuencia

### Gr. 4 Variación Fref en Paralelo

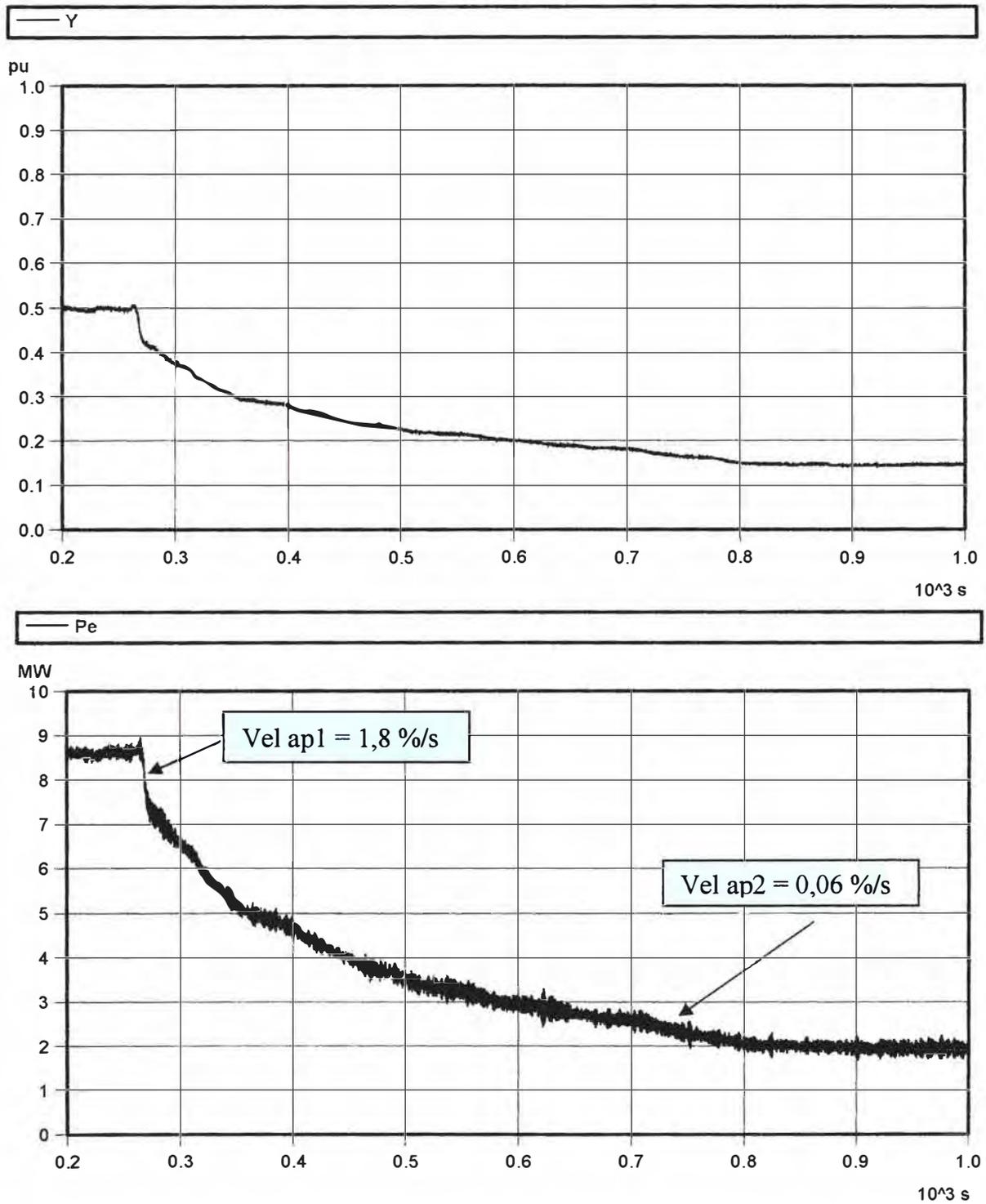


Fig 1

# CENTRAL HIDROELECTRICA DE MALPASO

## Pruebas dinámicas para la regulación de frecuencia

### Gr. 4 Variación Fref en Paralelo

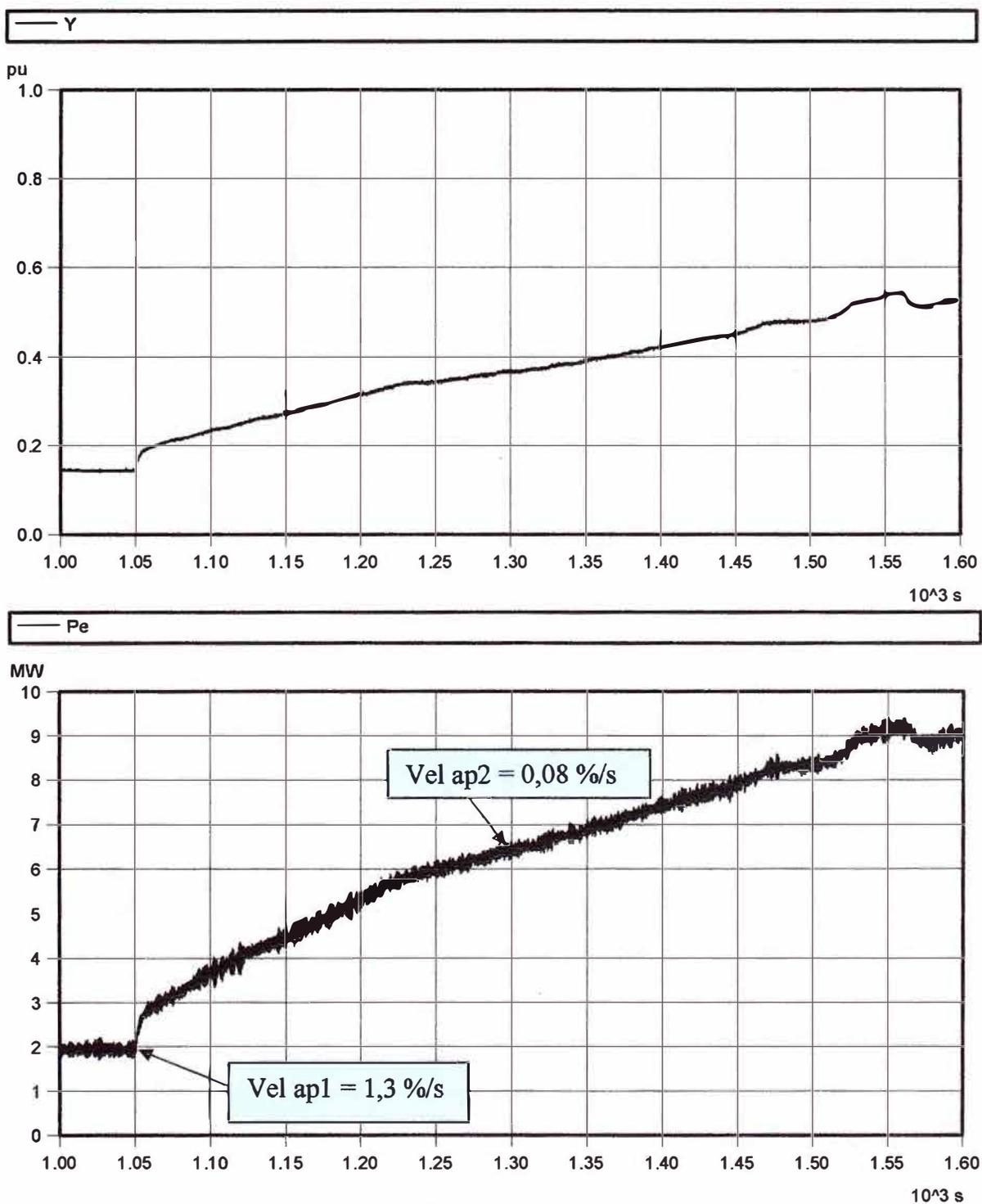


Fig 2

# CENTRAL HIDROELECTRICA DE MALPASO

## Pruebas dinámicas para la regulación de frecuencia

Gr. 4  
Rechazo carga: 8,4 MW

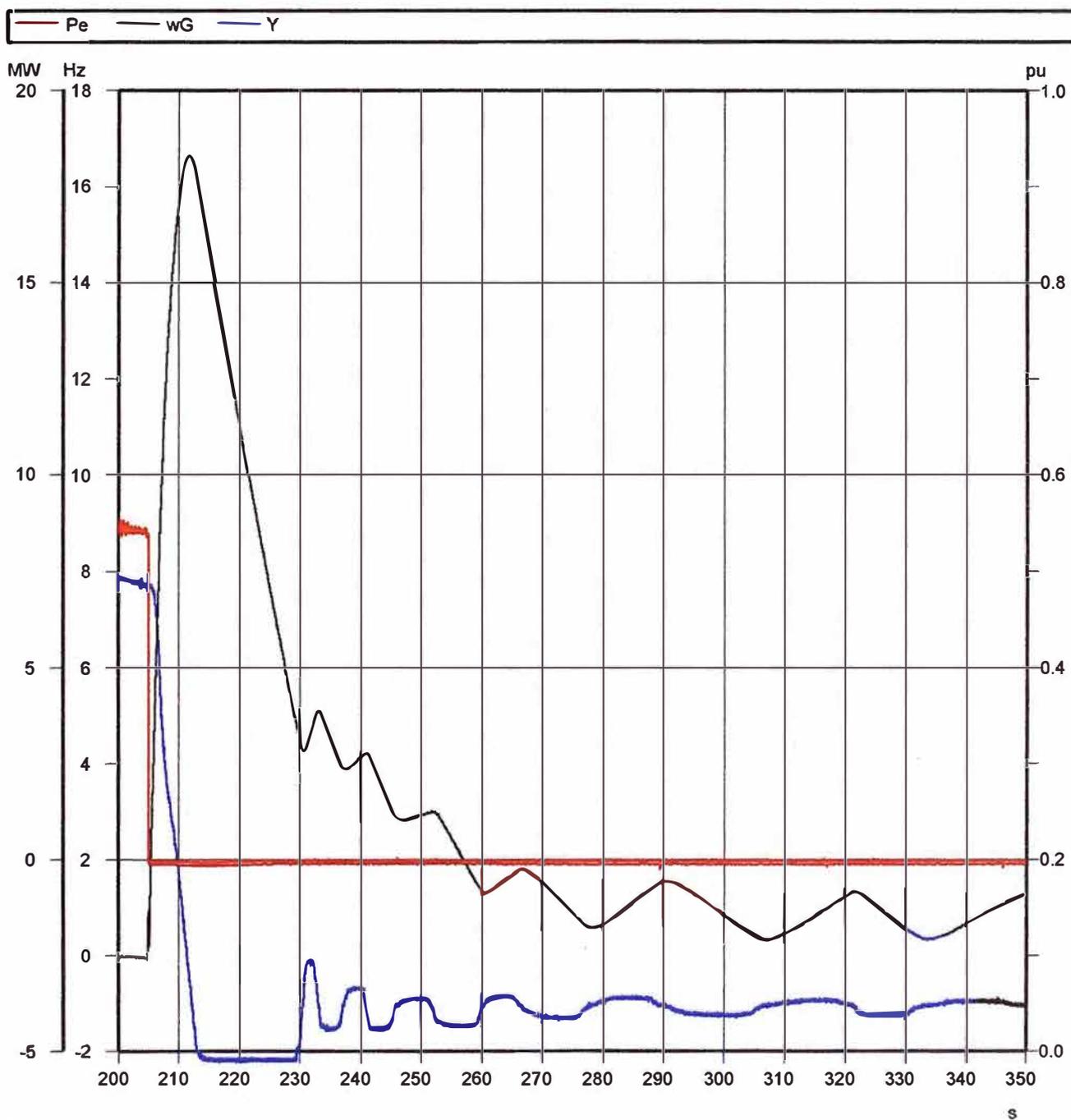


Fig 1

# CENTRAL HIDROELECTRICA DE MALPASO

## Pruebas dinámicas para la regulación de frecuencia

Gr. 4  
Rechazo carga: 8,4 MW

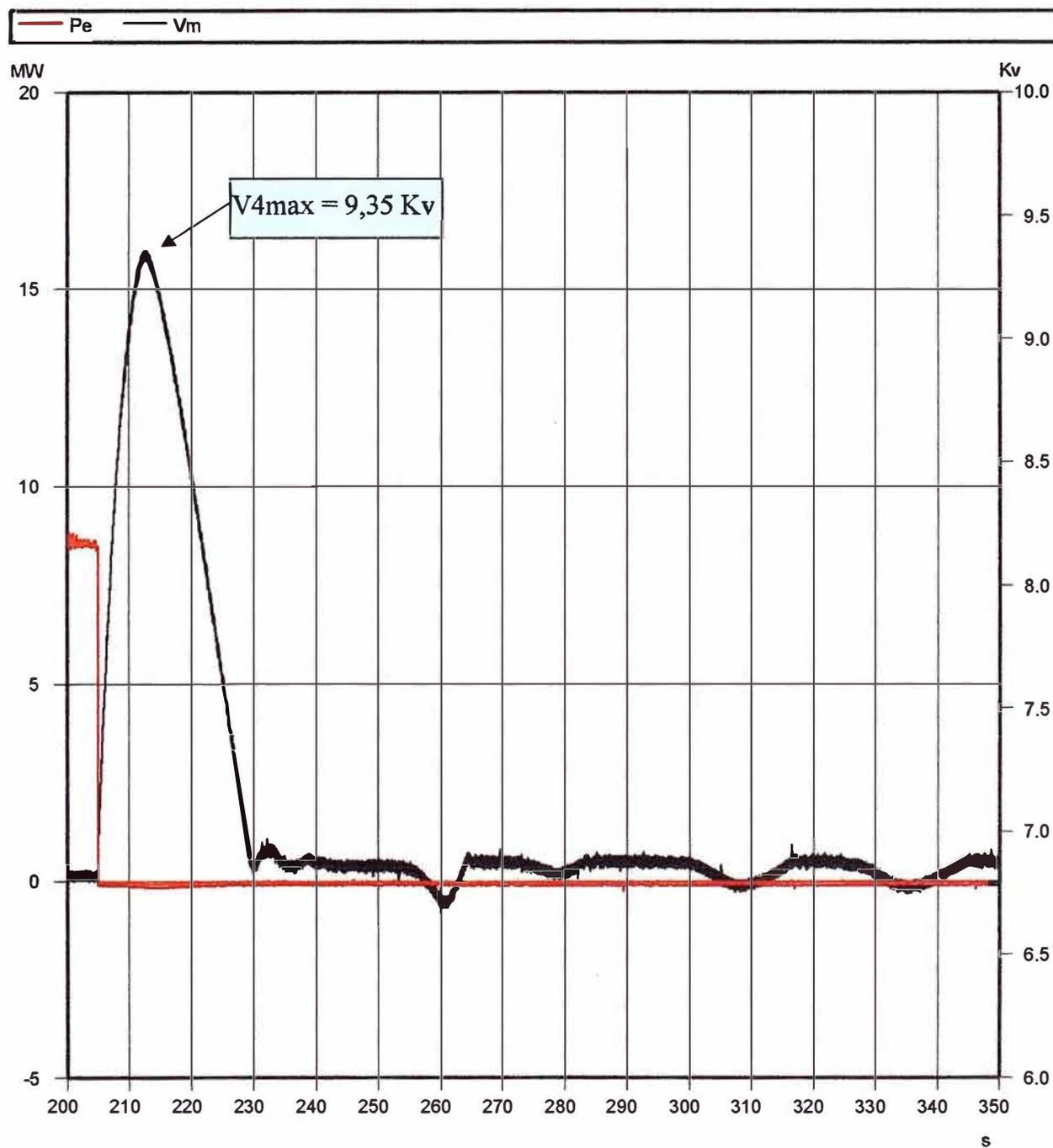


Fig 2

**CENTRAL HIDROELECTRICA DE MALPASO**  
Pruebas dinámicas para la regulación de frecuencia

Gr. 4  
Rechazo carga: 8,4 MW

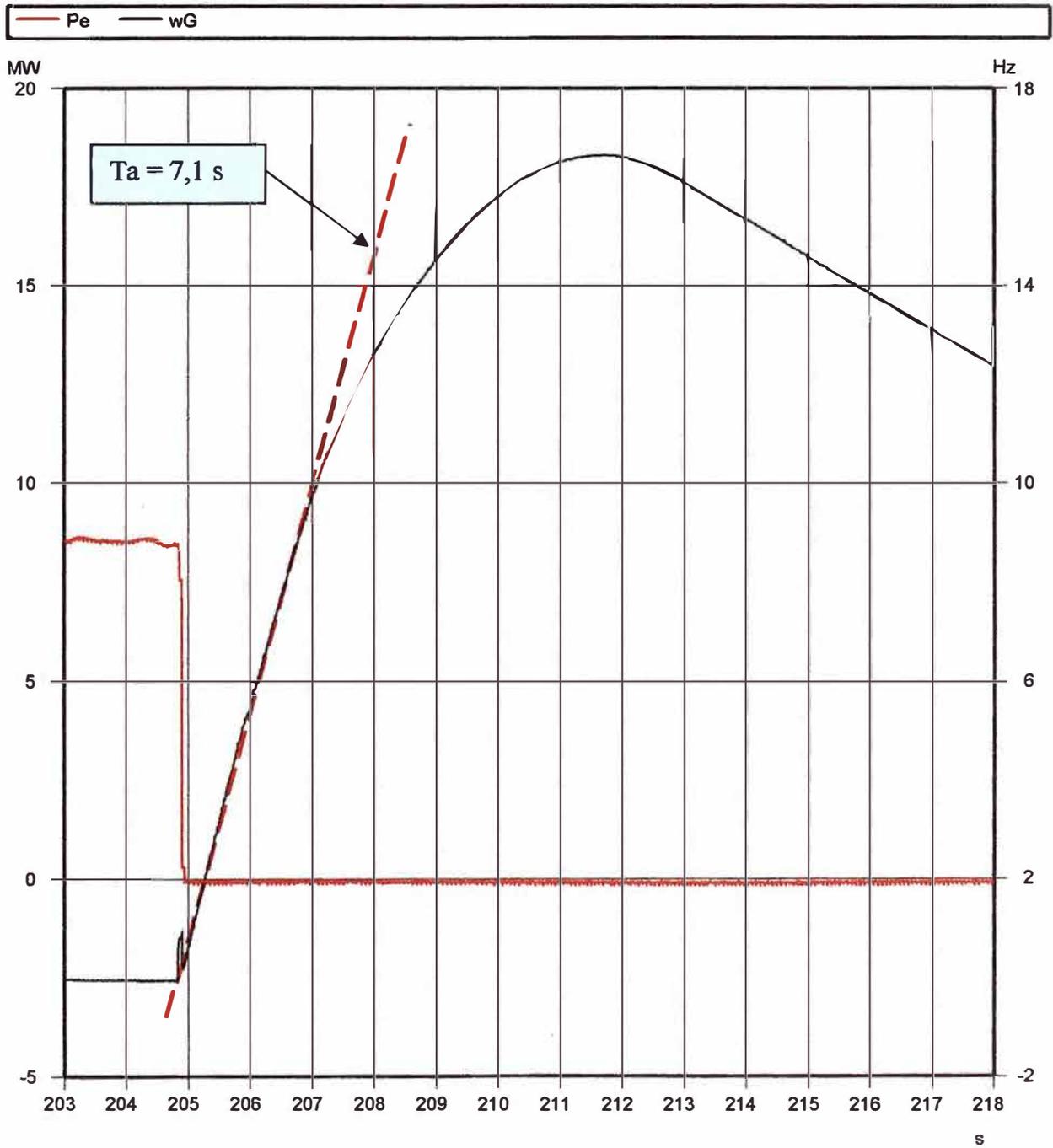
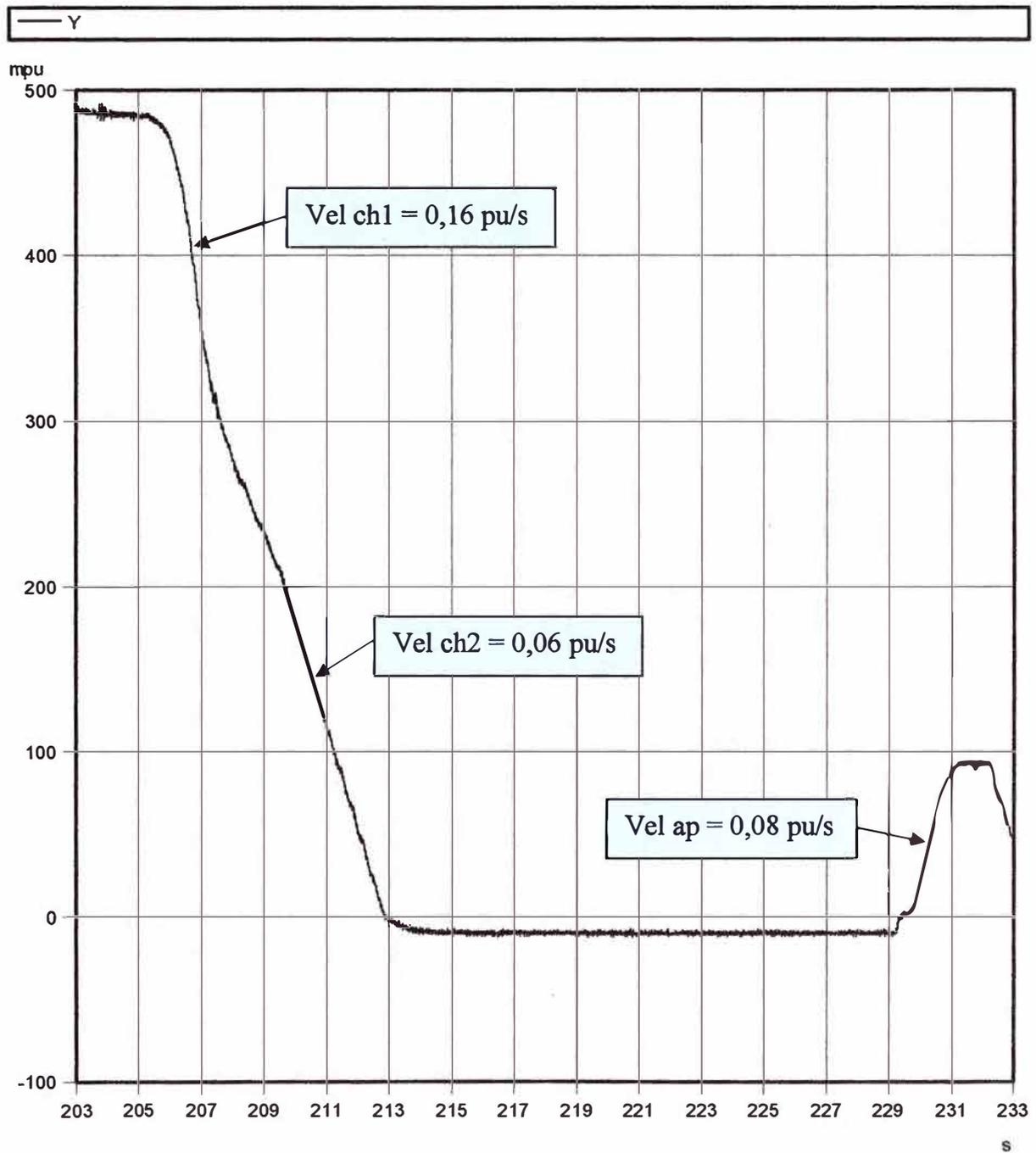


Fig 3

**CENTRAL HIDROELECTRICA DE MALPASO**  
Pruebas dinámicas para la regulación de frecuencia

Gr. 4  
Rechazo carga: 8,4 MW



**Fig 4**

# CENTRAL HIDROELECTRICA DE MALPASO

## Pruebas dinámicas para la regulación de frecuencia

### Gr. 4

#### Característica de estatismo

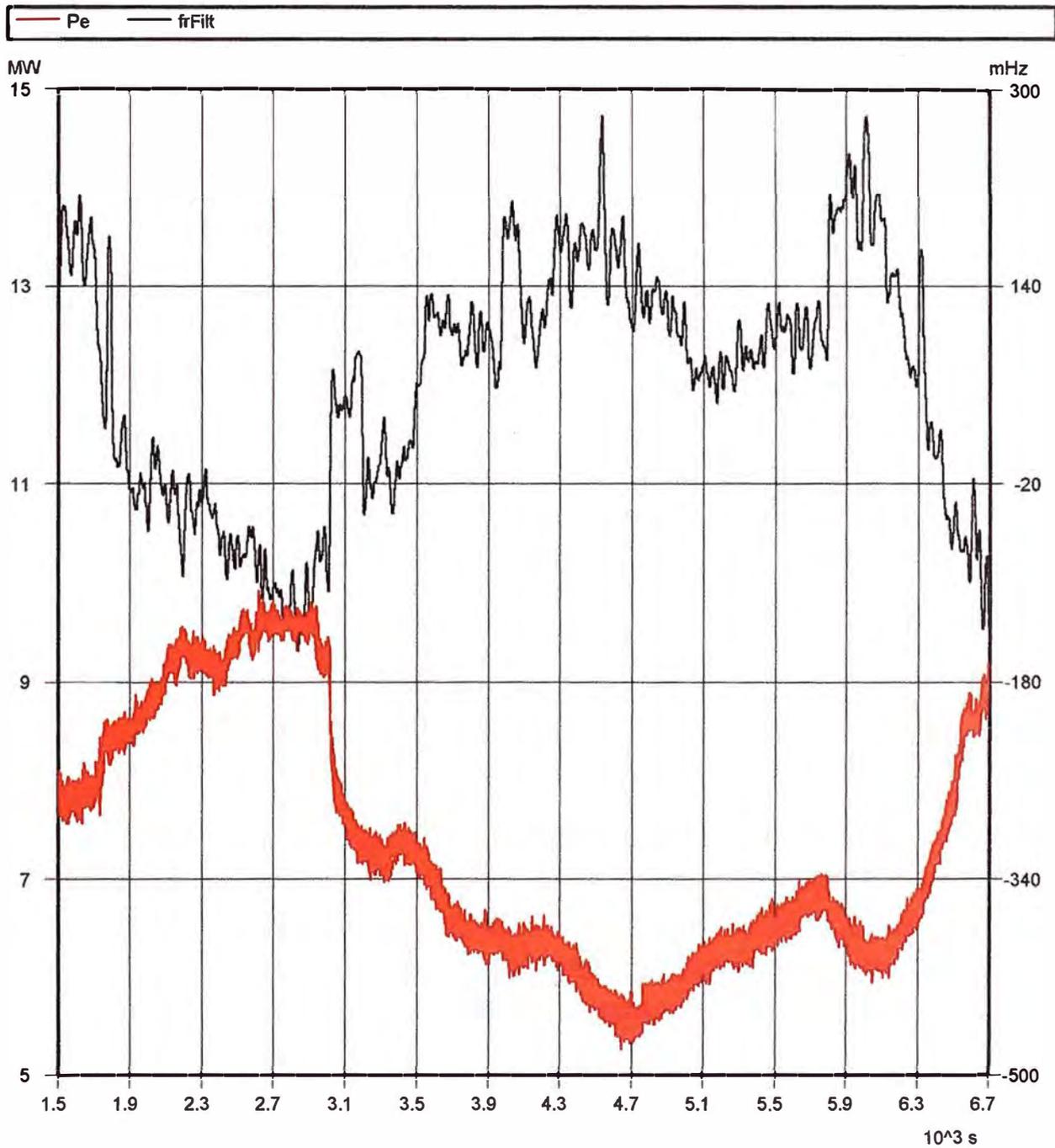


Fig 1

# CENTRAL HIDROELECTRICA DE MALPASO

## Pruebas dinámicas para la regulación de frecuencia

### Gr. 4

#### Característica de estatismo

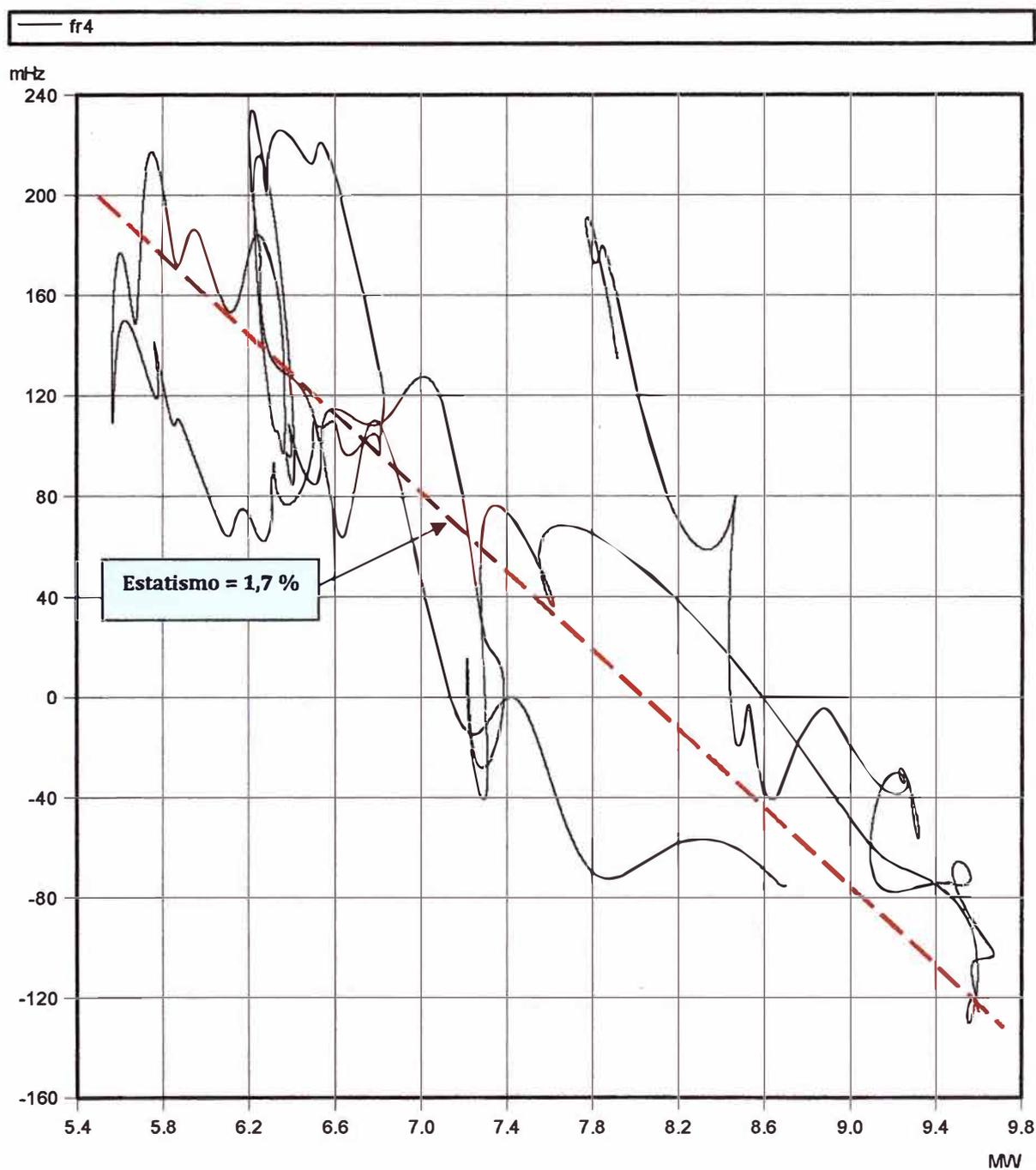


Fig 2

**ANEXO B**  
**FORMULARIOS DE DATOS PARA LA ELABORACIÓN DE LAS**  
**ESPECIFICACIONES TÉCNICAS**

Regulador de turbina hidráulica		Formulario nº 6.1a
Comprador:	Suministrador:	Instalación:
Fecha:		

### Datos de la instalación

Tipo de turbina			
Número de grupos			
	Nominal	Máximo	Mínimo
Energía hidráulica específica E/salto neto	II		$m^3 \cdot s^{-2}/m$
Caudal por grupo	Q		$m^3 \cdot s^{-1}$
Potencia por grupo	P		MW
Velocidad de rotación	n		$r \cdot \text{min}^{-1}$
Nivel de agua aguas arriba			m   NN <sup>1)</sup>
Nivel de agua aguas abajo			m   NN <sup>1)</sup>
Regulación simple/Regulación doble <sup>3)</sup>		Rodete	Distribuidor
		inyector	Deflector
Servomotores individuales, distribuidor/inyector		Número	

### Circuito hidráulico<sup>3)</sup>

Lado aguas arriba		Canal	Tubería	<sup>2)</sup>
Longitudes en el caso de conducciones			m	
			$m^2$	
Lado aguas abajo		Canal	Tubería	<sup>2)</sup>
Longitudes en el caso de conducciones			m	
			$m^2$	

Otros datos (por ejemplo concernientes a bifurcaciones, chimenea de equilibrio, etc.)

Presión máxima admisible				m+NN <sup>1)</sup>
Presión mínima admisible				m+NN <sup>1)</sup>
Medido en el punto				
Otras limitaciones (por ejemplo variaciones de caudal, presión negativa, etc.)				

1) Sobre el nivel del mar.

2) Táchese lo que no proceda.

3) Los datos pueden ser complementados con planos.

Regulador de turbina hidráulica		Formulario nº 6.1b
Comprador:	Suministrador:	Instalación:

Momento de inercia del alternador $I = MD^2/4$			kg . m <sup>2</sup>
Momento de inercia de la turbina y de otras masas giratorias			kg . m <sup>2</sup>
Sobrevelocidad admisible respecto de la nominal para los siguientes rechazos de carga			
100 P/P <sub>t</sub>		100	%
100 Δn/n <sub>r</sub>			%
Descenso de velocidad admisible para los siguientes rechazos de carga			
100 P/P <sub>t</sub>			%
100 Δn/n <sub>r</sub>			%
Modos de funcionamiento		Red aislada	Red interconectada
Funcionamiento en red		Frecuencia nominal	Hz
Banda de frecuencia		+/-	Hz
Red aislada			MW
Funcionamiento en red aislada hasta			MW
Escalón más grande de cambio de potencia			-
Variación admisible de la velocidad 100 Δn/n <sub>r</sub>			-
Tipo de carga (por ejemplo predominante resistiva, motores, cargas combinadas, etc)			
Energía de accionamiento	Distribuidor		Nm
	Accionamiento individual de álabes directrices	Inyector	Nm
	Palas de la rueda	Deflector	Nm
Otros datos			
Límites del suministro			

1) Táchese lo que no proceda.

Regulador de turbina hidráulica		Formulario nº 6.2
Comprador:	Suministrador:	Instalación:

Requisitos mínimos en el caso de centrales de energía de punta

	Apartado
Arranque y sincronización manuales <sup>1)</sup>	
Arranque y sincronización automáticos	4.13.1
Marcha en vacío estabilizada	4.13.2
Parada manual <sup>1)</sup>	
Parada automática	
Mando local del limitador de apertura y ajuste de consigna de velocidad en el regulador	4.3.1
Mando remoto del limitador y de la consigna de velocidad con una rampa variable	4.3.1
Funcionamiento en red interconectada con el limitador de apertura o con el consignador de velocidad y una constante de tiempo de regulación pequeña	4.2.2
Sobrepresión y sobrevelocidad tras un rechazo de carga dentro de límites admisibles	4.13.2
Transiciones rápidas entre modos de funcionamiento específicos	
Función de parada rápida	4.14.1
Protección de sobrevelocidad	4.14.3
1) Sin función automática ni control remoto	

Regulador de turbina hidráulica		Formulario nº 6.3
Comprador:	Suministrador:	Instalación:

Requisitos mínimos en el caso de centrales de energía de base

	Apartado
<b>Arranque y sincronización manuales<sup>1)</sup></b>	
Marcha en vacío estabilizada	4.13.2
<b>Parada manual</b>	
Mando local del limitador de apertura y ajuste de consigna de velocidad en el regulador	4.3.1
Funcionamiento en red interconectada con el limitador de apertura	4.3.1
Sobrepresión y sobrevelocidad tras un rechazo de carga dentro de límites admisibles	4.13.2
Función de parada rápida	4.14.1
Protección de sobrevelocidad	4.14.3
1) Sin función automática ni regulación de potencia	

Regulador de turbina hidráulica		Formulario nº 6.4
Comprador:	Suministrador:	Instalación:

Requisitos mínimos en caso de grupos con alternador asíncrono

	Apartado
El regulador no tiene función de regulador de velocidad	
Arranque manual <sup>1)</sup>	
Acoplamiento manual a la red <sup>1)</sup>	
Parada manual <sup>1)</sup>	
Sobrepresión y sobrevelocidad tras un rechazo de carga dentro de límites admisibles	4.13.2
Mando local de posición del servomotor	
Regulador de nivel	3.1.3
Función de parada rápida	4.14.1
Protección de sobrevelocidad	4.14.3
1) Véase formulario 6.3.	

Regulador de turbina hidráulica		Formulario nº 6.5a
Comprador:	Suministrador:	Instalación:

Requisitos adicionales para los grupos de potencia de punta, de potencia de base y de alternador asíncrono<sup>1)</sup>

		Apartado
Funcionamiento en red aislada según el formulario 6.1b		
Entrada y salida para un control automático y remoto		
Control remoto del limitador de apertura		4.3.1
Control remoto del consignador de velocidad		4.3.1
Arranque automático		4.13.1
Parada automática		
Arranque sin alimentación exterior de auxiliares, estando la energía suministrada por:		
Apertura de arranque en función del salto		4.13.1 <sup>2)</sup>
Preajuste de señal del mando de velocidad		<sup>2)</sup>
Sincronización mediante sincronizador		
Control manual puenteadando al regulador	con realimentación mecánica	4.6
	con realimentación eléctrica	
	sin realimentación (tipo a impulsos)	
Regulación de potencia		
Regulación de nivel		
Parada rápida		4.14.1
Parada de emergencia		4.14.2
Protección de velocidad adicional	Mecánica	4.14.3
	Eléctrica	
Cerrojo		4.14.4
Tipo de transductor de velocidad		4.5.1
Tipo de realimentación		4.5.4
Mando común de varios grupos		4.9
Control de optimización (Turbinas con órganos de regulación múltiple, inyectoras, células)		
Conjugación entre el distribuidor y las palas del rodete en función del salto		
Regulación de oscilaciones del nivel del agua		4.15.2 <sup>3)</sup>

1) Indíquese si es aplicable.

2) Principalmente para los grupos de potencia de punta.

3) Principalmente para los grupos de potencia de base.

Regulador de turbina hidráulica		Formulario nº 6.5b
Comprador:	Suministrador:	Instalación:

Otros requisitos	Apartado
Por ejemplo	
Regulación de caudal	4.15.4
Funcionamiento como condensador	4.15.6
Linealizaciones	3.12
Tiempo de transición entre modos de funcionamiento	

1)

1) Principalmente para las centrales de potencia de pttuta.

Regulador de turbina hidráulica		Formulario nº 6.6a
Comprador:	Suministrador:	Instalación:

## Parámetros de ajuste del regulador

						Apartado	
Modo de funcionamiento principal con	Red interconectada		Red aislada				1)
	Limitador de apertura		Consignador de velocidad				1)
	Regulador de potencia						1)
	Regulación de velocidad		Regulación de potencia				
	Red interconectada	En vacío, en red aislada					
Estatismo permanente $b_p$					%	4.2.1	
					%	4.2.2	
Tiempo de acción integral $T_d$					s	4.2.2	
Tiempo de acción derivada $T_v$					s	4.2.2	
Commutación automática al regulador de velocidad con ajuste mediante						4.2.2	1)
Red interconectada		Red aislada					
		Regulación de velocidad	Regulación de potencia				
Ajustador de la señal de mando	Campo de ajuste				%	4.3.1	1)
	Tiempo de ajuste				s		
Tiempo de ajuste del limitador de apertura						s	
Función de tiempo de cierre	Distribuidor				%	4.3.3	1)
	Inyectores				s		1)
	Tiempo total de cierre				s		
	Campo de ajuste				s		
Tiempos de cierre	Palas del rodete		Deflector		s		1)
Función de tiempo de apertura	Distribuidor				%		1)
	Inyectores				s		1)
	Tiempo total de apertura				s		
	Campo de ajuste				s		
Tiempos de apertura	Palas del rodete		Deflector				1)
Grupo dispuesto para sincronización después de $t_{SR}$						s	4.13.1
						s	
Insensibilidad del regulador $ix/2$							4.3.2
Protección de sobrevelocidad	Parada eléctrica a				%	4.14.3	
	Parada mecánica a				%		

1) Táchese lo que no proceda.

Regulador de turbina hidráulica		Formulario nº 6.6b	
Comprador:	Suministrador:	Instalación:	
Control de oscilaciones del nivel del agua	a partir de la posición del distribuidor	%	Apartado 4.15.2
	de la velocidad de la turbina ns/nr	%	
	del caudal absoluto $Q_3$ (fijado) o	m <sup>3</sup> /s	
	del caudal relativo $Q_w/Q_r$	%	
		_____	1)
		_____	1)
		_____	2)
		_____	2)
		_____	2)
Otros parámetros, por ejemplo referentes a un "by-pass" (Capítulo ...), resistencia líquida (Capítulo ...)			4.15.3
_____			
_____			
_____			
_____			

Alimentación de energía de maniobra

			Apartado
Alimentación de energía para	Apertura	por _____	4.11
	Cierre	por _____ por _____	
Presión de diseño	Distribuidor	_____	4.11.1
	Alabes directrices con actuación individual	inyector _____	
	Palas del rodete	Deflector _____	
		_____	

Bombas hidráulicas (desplazamiento constante y variable)

			Apartado
Tipo	Bomba principal	_____	4.11.1.4
Velocidad de rotación	_____	r . min <sup>-1</sup>	
Movida por	_____	_____	
Nivel de ruido	_____	dB (A)	
Caudal	_____	_____	
Presión	_____	bar	
Potencia	_____	kW	

1) Táchese lo que no proceda.  
2) Indíquese si es aplicable.

Regulador de turbina hidráulica	Formulario nº 6.6c
Comprador:	Suministrador:
	Instalación:

Acumuladores Rellenado de gas mediante			Apartado 4.11.1
	Duración de la recarga de gas		s
			bar
	Presión de apertura de la válvula de seguridad		%
	Presión final (máxima) a pleno caudal de las bombas y consumo con caudal nulo		%
	Volumen de aceite mínimo útil	VT	%
Volumen de aceite útil	Actuación de un servomotor		x VS
	Regulación doble	x VsgV	x Vsru
Tanque de aceite			4.11.1.5
Indicador de nivel			4.11.1.6
Filtro "by-pass"			
Evacuación de los vapores de aceite			
Calefacción del aceite			
Refrigeración del aceite			
Alarma de agua en el aceite			
Fluido hidráulico	Aceite mineral / Aceite sintético		
Viscosidad a 40 °C			mm <sup>2</sup> /s
Otros datos (por ejemplo densidad, poder de separación de agua, desaeración, propiedades de protección contra la corrosión, etc)			4.11.4

Otros datos

		Apartado
Tipo de freno		4.15.4
Parámetros de (por ejemplo imprecisión, constante de tiempo, etc)		4.3.3

	Principio	Fabricante/Tipo	
Transductores de	carrera		
	presión		
	temperatura		
	velocidad		

1) Táchese lo que no proceda.

Regulador de turbina hidráulica		Formulario nº 6.6d
Comprador:	Suministrador:	Instalación:

Interruptores fin de carrera	Principio		Fabricante/tipo		
Válvulas de solenoide	Fabricante/tipo				
Instrumentos de medida	digitales/analógicos				
	directos/indirectos				
	tamaño				
	precisión				
	fabricante/tipo				
Indicación de estado					
Indicación de defecto					
Alimentación eléctrica					
Red de servicios auxiliares			+/-	V	Hz
Alimentación de corriente alterna de seguridad			+/-	V	Hz
Alimentación de corriente continua			+/-	V	
				W	
Sección de los bornes de conexión hasta					mm <sup>2</sup>
Tipo					
Cables	tipo				

1) Para los transductores de señal.

**ANEXO C**  
**EJEMPLO DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS SISTEMAS DE**  
**REGULACIÓN Y CONTROL DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE 48**  
**MW**

## ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE REGULADORES DE TENSIÓN Y DE VELOCIDAD

### ÍNDICE

<b>1</b>	<b>OBJETIVO.....</b>	<b>128</b>
<b>2</b>	<b>ALCANCE DEL SUMINISTRO.....</b>	<b>128</b>
	2.1 Servicios y Materiales Incluidos en el Suministro .....	128
	2.2 Desvíos de la Especificación.....	129
	2.3 Ofertas Adicionales .....	129
<b>3</b>	<b>CONDICIONES LOCALES DE LA INSTALACIÓN .....</b>	<b>130</b>
	3.1 Visita a la Instalación .....	130
	3.2 Localización Geográfica.....	130
	3.3 Descripción General de la Instalación.....	130
<b>4</b>	<b>REQUISITOS GENERALES DEL PROYECTO.....</b>	<b>131</b>
	4.1 Normas y Patrones.....	131
	4.1.1 Sistemas de Unidades.....	131
	4.1.2 Calidad .....	131
	4.1.3 Construcción .....	131
<b>5</b>	<b>REGULACIÓN DE TENSIÓN .....</b>	<b>133</b>
	5.1 General .....	133
	5.2 Características de Operación.....	134
	5.3 Requisitos de Desempeño .....	134
	5.3.1 Control de Tensión.....	134
	5.3.2 Límite de Tensión .....	134
	5.3.3 Sensibilidad.....	134
	5.3.4 Nivel de Ruido .....	135
	5.3.5 Capacidad Nominal de la Excitación.....	135
	5.4 Componentes del Sistema de Excitación.....	135
	5.4.1 Transformador de Excitación.....	135
	5.4.2 Interruptor de Campo .....	136
	5.4.3 Crow-Bar y Resistor de Descarga .....	136
	5.4.4 Excitación Inicial .....	136
	5.4.5 Puente Rectificador .....	137
	5.4.6 Regulador Automático de Tensión y Regulador Manual de la Excitación.....	137
	5.5 Protección del Sistema de Excitación .....	141
	5.5.1 General.....	141
	5.5.2 Transformador de Excitación.....	141
	5.5.3 Excitación Inicial .....	141

5.5.4	Sistema de Enfriamiento de la Excitatriz.....	142
5.5.5	Puentes Rectificadores .....	142
5.5.6	Regulador de Tensión - Circuitos de Control .....	142
<b>6</b>	<b>REGULACION DE VELOCIDAD.....</b>	<b>143</b>
6.1	General .....	143
6.2	Características de Operación.....	143
6.3	Requisitos de Desempeño .....	143
6.3.1	Generalidades.....	143
6.3.2	Características de desempeño requeridas.....	144
6.3.3	Filosofía de Regulación.....	145
6.3.4	Tomas de Carga.....	145
6.3.5	Ciclo de Servicio.....	145
6.3.6	Nivel de Ruido .....	146
6.4	Componentes del Sistema de Regulación de Velocidad .....	146
6.4.1	Unidad de Control .....	146
6.4.2	Transductores.....	147
6.4.3	Relés de Velocidad.....	147
6.5	Unidad Hidráulica .....	147
6.5.1	Introducción .....	147
6.5.2	Modos de operación .....	148
6.5.3	Modo manual .....	148
6.5.4	Modo automático .....	148
6.5.5	Protecciones y señalizaciones .....	149
6.5.6	Descripción de los componentes.....	150
6.5.7	Tuberías y conexiones.....	152
6.5.8	Pintura .....	152
6.5.9	Tarjeta de identificación.....	152
6.5.10	Esquema hidráulico ilustrativo.....	153
6.6	Protecciones del Sistema de Regulación de Velocidad.....	154
6.6.1	General.....	154
6.6.2	Unidad Hidráulica.....	154
6.6.3	Unidad de Control.....	154
6.6.4	Sobrevelocidad.....	154
6.6.5	Partida .....	154
6.6.6	Paradas .....	155
<b>7</b>	<b>PROGRAMABILIDAD .....</b>	<b>155</b>
<b>8</b>	<b>PROTECCIÓN DEL GRUPO GENERADOR.....</b>	<b>155</b>
8.1	General .....	155
8.2	Protecciones Especificadas.....	155
8.3	Protecciones del Generador Asociadas a la Excitación.....	156
8.3.1	Protección contra Defecto a Tierra en el Rotor (64F1 y 64F2).....	156
8.3.2	Protección Contra Falla de TPs o del Transformador de Excitación (60E).....	156
8.3.3	Protección Contra Sobre corriente del Transformador de Excitación (51TE).....	156
8.3.4	Protección contra Pérdida de Excitación (40G).....	156
8.4	Protecciones de la Turbina Asociadas al Control de Velocidad .....	156
<b>9</b>	<b>COMUNICACIÓN .....</b>	<b>157</b>

9.1	Interfaz Local .....	157
9.2	Interfaz Remota .....	157
9.3	Protocolos de Comunicación.....	158
9.4	Interfaz de Programación .....	158
<b>10</b>	<b>GENERACIÓN DE REGISTROS .....</b>	<b>158</b>
<b>11</b>	<b>VISUALIZACIÓN DE SEÑALES EN TIEMPO REAL (ON LINE).....</b>	<b>158</b>
<b>12</b>	<b>OBTENCIÓN Y PORTABILIDADE DE DATOS.....</b>	<b>158</b>
<b>13</b>	<b>CUBICULOS BLINDADOS.....</b>	<b>159</b>
13.1	Generalidades .....	159
13.2	Construcción.....	159
13.3	Puertas .....	159
13.4	Aterramiento.....	160
13.5	Identificación.....	160
13.6	Dispositivos de Control e Instrumentos .....	160
13.7	Acabado.....	161
13.8	Bloques de Terminales.....	161
13.9	Cableado.....	161
13.10	Características de los Circuitos Electrónicos .....	161
<b>14</b>	<b>PIEZAS DE REPUESTO.....</b>	<b>161</b>
<b>15</b>	<b>INSPECCIÓN DE FÁBRICA.....</b>	<b>162</b>
15.1	Generalidades .....	162
15.2	Inspección.....	162
15.3	Ensayos de Fábrica.....	162
<b>16</b>	<b>ENTRENAMIENTO .....</b>	<b>163</b>
16.1	Entrenamiento en Fábrica.....	163
16.1.1	Entrenamiento en Hardware.....	163
16.1.2	Entrenamiento en Software.....	163
16.1.3	Entrenamiento en Instalación y Configuración.....	163
16.2	Entrenamiento en Campo .....	163
16.2.1	Entrenamiento en Hardware, Software y Configuración.....	163
16.2.2	Entrenamiento en Operación.....	163
16.2.3	“On the Job Training” .....	164
<b>17</b>	<b>EMBALAJE .....</b>	<b>164</b>
<b>18</b>	<b>MONTAJE .....</b>	<b>164</b>
18.1	Servicios de Desmontaje .....	164
18.2	Servicios de Montaje.....	164
18.3	Interconexión con El Campo del Generador .....	165
18.4	Instalación del Transformador de Excitación.....	165
18.5	Cronograma.....	165
<b>19</b>	<b>COMISIONAMIENTO (PUESTA EN MARCHA) .....</b>	<b>165</b>
19.1	Generalidades.....	165
19.2	Pruebas Pre-Operacionales.....	166
19.3	Pruebas de Desempeño.....	166

19.4	Respuesta Dinámica .....	167
19.5	Resultados de los Pruebas .....	167
19.6	Informe de Pruebas.....	167
<b>20</b>	<b>DIAGRAMA DE BLOQUES Y MODELAJE .....</b>	<b>167</b>
<b>21</b>	<b>DOCUMENTACION .....</b>	<b>168</b>
<b>22</b>	<b>GARANTIA.....</b>	<b>169</b>
<b>23</b>	<b>EXCEPCIONES.....</b>	<b>169</b>
<b>24</b>	<b>DATOS TÉCNICOS GARANTIZADOS.....</b>	<b>170</b>
<b>25</b>	<b>LUGAR DE ENTREGA.....</b>	<b>170</b>

## **ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE REGULADORES DE TENSIÓN Y DE VELOCIDAD**

### **1 OBJETIVO**

Este documento tiene por objetivo presentar una especificación base para la provisión bajo la modalidad de un contrato llave en mano a precio fijo, de un Sistema de Regulación de Tensión y de Regulación de Velocidad para grupos hidrogeneradores de la Central de ..... de propiedad de ....., comprendiendo prácticamente todas las etapas y las condiciones de un suministro completo, tales como el suministro de equipos y materiales, la ingeniería de detalle, pruebas en fábrica, transporte a obra, montaje, pruebas en sitio y puesta en operación.

El proyecto está programado para su instalación en sitio en el periodo de lluvias entre los meses de febrero y mayo del 20.... Se prevé parar medio mes por cada grupo de generación para la instalación de los sistemas de regulación de tensión y de velocidad.

Debe quedar claro que esta especificación es genérica y es fundamental su adaptación a cada caso, atendiendo las peculiaridades de la central-cliente a que se destina, ya que el alcance del suministro puede ser diferente de una central para otra.

### **2 ALCANCE DEL SUMINISTRO**

#### **2.1 Servicios y Materiales Incluidos en el Suministro**

El alcance del suministro es la modernización de los Sistemas de Regulación de Tensión y de Regulación de Velocidad para cuatro (4) unidades o grupos de generación de 17 MVA cada uno, con turbinas tipo Francis de eje vertical. Para cada unidad generadora se suministrará un Sistema de Regulación de Tensión y de Regulación de Velocidad, que deberán ser suministrados completos, con todos los componentes y equipos necesarios para su operación, de acuerdo con los requisitos de esta Especificación.

El alcance del suministro deberá comprender los componentes, equipos, accesorios y servicios mencionados a continuación, pero no siendo limitativos a los mismos.

- Cubículos con los diversos dispositivos de comando, control, accionamiento, protección y auxiliares.
- Regulador digital de velocidad y regulador digital de tensión con limitadores dinámicos, estabilizador de sistemas de potencia PSS, etc. (ver descripción detallada), interfaces de acondicionamiento de señales (aisladores galvánicos, drivers, fuentes, etc.), Interface hombre-máquina.
- Puentes rectificadores controlados y sus circuitos auxiliares.

- Circuito completo de excitación inicial.
- Interruptor de campo.
- Resistor de descarga de campo.
- Protección crowbar.
- Protección de generador
- Transformador de excitación y su protección.
- Cableado externo comprendiendo: los cables de fuerza del interruptor de campo hasta las escobillas, interconectando la máquina hasta el transformador de excitación, interconectando el transformador de excitación con el puente rectificador, las interconexiones con la Sala de Comando, Unidad Hidráulica (alternativas: por presión de aceite/nitrógeno tipo vejiga), Cubículo de TPs, TCs y Servicios Auxiliares.
- Válvulas proporcionales para el actuador electro-hidráulico
- Transductores de posición.
- Unidad hidráulica de suministro de aceite presurizado para la etapa de pre-amplificación hidráulica del control nuevo.
- Conjunto de filtros para el aceite de regulación de la etapa de control.
- Válvulas de bloqueo manual.
- Sistema mecánico de protección contra sobrevelocidad del grupo generador.
- Flexibilidad para instalación futura de un sistema AGC (Control Automático de Generación).
- Servicio de arranque automático de servicios auxiliares de emergencia (Black Start).
- Piezas de repuesto.
- Transporte de Fábrica hasta el local de la obra de todo el suministro, inclusive accesorios necesarios de transporte.
- Ensayos en la fábrica.
- Ejecución del montaje.
- Ejecución de ensayos en campo.
- Diseños y documentos.
- Entrenamiento.
- Mediciones en campo de parámetros de los grupos de generación y central para el diseño y para efectos de calibración de los equipos de regulación de tensión y de velocidad.

## **2.2 Desvíos de la Especificación**

El FABRICANTE deberá presentar en su propuesta, de manera clara y resaltada, los desvíos en relación a la Especificación básica.

## **2.3 Ofertas Adicionales**

Lo que el FABRICANTE juzgue como un suministro adecuado y conveniente para la instalación, que no fue originalmente previsto en esta Especificación, deberá ser claramente ofertado y cotizado.

### **3 CONDICIONES LOCALES DE LA INSTALACIÓN**

#### **3.1 Visita a la Instalación**

El FABRICANTE deberá efectuar una visita técnica a la central con el objetivo de verificar las condiciones locales, tomando datos adicionales del equipo existente, aspectos de lay-out (disposición) de la casa de fuerza y del piso donde serán instalados el sistema de excitación y de velocidad.

Se deberá presentar con la propuesta el certificado de visita técnica.

#### **3.2 Localización Geográfica**

La Central Hidroeléctrica de ..... provista por las aguas del río Mantaro, se encuentra a una altitud de 3800 msnm, en el distrito de Paccha, provincia de Yauli, departamento de Junín, Perú, aproximadamente a 195km por vía terrestre de la ciudad de Lima. La Central se encuentra a 20km de la ciudad de La Oroya.

La temperatura ambiente oscila de  $-12^{\circ}\text{C}$  a  $20^{\circ}\text{C}$ . La humedad relativa puede ser considerada entre 50y 90 %.

#### **3.3 Descripción General de la Instalación**

Los generadores son de tipo de polos salientes y excitatrices rotativas autoexcitadas, con regulador de tensión actual de tipo electro-mecánico con actuador modelo BJ-30 de Westinghouse. El generador es refrigerado por ventilación natural.

Las turbinas son de tipo Francis, con el regulador de velocidad actual de tipo electro-hidráulico. La modernización del regulador de velocidad será realizada simultáneamente al suministro del sistema de excitación, pudiendo ser utilizado un regulador integrado de tensión y velocidad.

El sistema de excitación será del tipo estático con los rectificadores alimentados a través de un transformador de excitación, conectado directamente a los terminales del generador.

Los terminales de fase del generador serán conectados con cables al transformador de excitación.

La unidad turbina-generador puede ser operada localmente en emergencia a través de Control Local y en condiciones normales, remotamente, a través de la Sala de Control.

La Tabla siguiente presenta los datos básicos de las máquinas (generadores y turbinas). Los datos de reactancias están en base de la máquina (tensión y potencia aparente nominales).

	<b>Turbina</b>	
Fabricante		S. Morgan Smith Co.
Tipo		Francis eje vertical
Potencia nominal		18 600 HP
Rotación		257 rpm
Caída nominal		76,2 m
Caída máxima		78,9 m
Caída mínima		67,0 m
Caudal nominal		20 m <sup>3</sup> /s
	<b>Generador</b>	
Fabricante		General Electric
Potencia aparente nominal		17 MVA
Tensión nominal		6,9 kV
Corriente nominal		1 422 A
Frecuencia nominal		60 Hz
Factor de potencia		0,8
Tipo		polos salientes
Franja de Regulación de Tensión		±5%
Sentido de Rotación		Anti horario
Secuencia de fases		RST
Tensión de excitación		250 VDC
Corriente de excitación		288 ADC
Reactancia síncrona de eje directo no saturada (x <sub>d</sub> )		1,05 Pu
Reactancia transitoria de eje directo no saturada (x' <sub>d</sub> )		0,33 pu
Reactancia sub-transitoria de eje directo no saturada (x'' <sub>d</sub> )		0,33 pu

## 4 REQUISITOS GENERALES DEL PROYECTO

### 4.1 Normas y Patrones

#### 4.1.1 Sistemas de Unidades

El sistema de unidades a ser usado deberá ser el Sistema Internacional De Unidades (SI), definido por la Internacional Organization For Standardization (ISO).

#### 4.1.2 Calidad

La empresa deberá estar certificada en la ISO9001.

#### 4.1.3 Construcción

El proyecto, fabricación y prueba del equipo deberá ser hecho de acuerdo con la última revisión de normas de asociaciones técnicas reconocidas, en todos los puntos en que ellas no son contrariadas o reescritas por estas Especificaciones:

- a) Para las partes Estructurales y Mecánicas
- b) Para las partes Eléctricas
- c) Programabilidad
- d) Compatibilidad Electromagnética

## 5 REGULACIÓN DE TENSIÓN

### 5.1 General

El generador deberá ser equipado con un sistema de excitación digital con estructura de regulación doble canal (dos canales iguales e independientes en Hardware, cada uno de ellos con Regulación automática y manual, con función de rastreo), del tipo estático. La conmutación entre los canales, en caso de fallas, debe ser automática y de forma suave. También podrá ser por mando manual del operador. Cada uno de los canales tiene recursos para hacer también la regulación manual de corriente o tensión de campo de la máquina.

La alimentación de potencia de los rectificadores, deberá ser de los terminales del generador a través de un transformador de excitación adecuado.

El sistema de excitación deberá ser previsto con, por lo menos, los siguientes recursos:

- control automático de tensión del generador (doble canal automático);
- compensación de corriente reactiva;
- control manual de la excitación del generador;
- transición suave de control automático para control manual;
- polarización del campo para la elevación inicial de la tensión del generador (excitación inicial);
- estabilizador del sistema de potencia derivado de la potencia de aceleración modelo PSS2A del IEE con filtro rastreador de rampa ;
- des-excitación rápida del campo del generador;
- límite automático de la excitación en valores máximo y mínimo;
- límite automático de relación Volts/Hertz;
- desempeño automático de las funciones requeridas por las secuencias de control automático de partida y parada del grupo turbina-generador;
- capacidad transitoria de tensión negativa.
- registrador incorporado de señales continuos y discretos;
- registrador incorporado de eventos;
- capacidad de monitoreo on line de señales continuas y discretas en el controlador;
- IHM gráfica Touch Screen con visualización simultánea de parámetros y monitoreo gráfico de señales.
- obtención on line de archivo de datos y parámetros para generación de informes y documentación;
- portabilidad de datos y parámetros entre controladores en operación o unidad de reserva;

El sistema de excitación del generador deberá ser totalmente independiente de los servicios auxiliares en Corriente alterna, excepto para:

- dispositivos auxiliares que no limiten o sean esenciales en el arranque del equipo;
- ensayos especiales.

Se deberá implementar un sistema de black start a fin de que el sistema de excitación sea capaz de arrancar cuando la planta se encuentre completamente en cero y sin suministro externo.

A excepción del transformador de excitación, los equipos abajo relacionados deberán ser instalados en un cuadro o panel único, a ser localizado conforme a los diseños de arreglo físico de la Casa de Fuerza:

- interruptor de campo y equipo de des-excitación rápida;
- puente de tiristores;
- equipos de excitación inicial;
- circuitos electrónicos del sistema de excitación.

## **5.2 Características de Operación**

La unidad generadora será operada en modo normal desde la Sala de Mando (y si fuera necesario, desde una estación semejante vía remota por tele-comando). Todos los mandos efectuados vía Sala de Mando pueden ser efectuados de manera remota. El control local de la unidad a partir de los propios equipos auxiliares solamente será posible para fines de pruebas, y falla del sistema remoto.

Las funciones de arranque de excitación, ajuste de tensión, des-excitación, control manual, parada de emergencia serán explicadas adecuadamente en la oferta del fabricante.

## **5.3 Requisitos de Desempeño**

### **5.3.1 Control de Tensión**

El sistema de excitación deberá ser capaz de mantener la tensión del generador dentro de los límites abajo especificados, estando el regulador de tensión en automático, para cualquier temperatura ambiente en el rango de -15°C a 50°C y humedad relativa del aire al 100%.

### **5.3.2 Límite de Tensión**

El límite de tensión positiva no deberá ser inferior a 5.0 PU con respecto a la tensión en línea del entrehierro en vacío a 75°C. El límite de tensión negativa no deberá ser inferior a 4.0 PU.

### **5.3.3 Sensibilidad**

Con el generador operando a frecuencia, tensión y corriente nominales, una variación en escalón de 2% en la tensión de referencia del regulador, deberá hacer que la tensión límite sea alcanzada.

### 5.3.4 Nivel de Ruido

El nivel máximo permisible de ruido no deberá exceder a 65dB, a una distancia de 1m de los cubículos del sistema de excitación, con el sistema forzado de enfriamiento conectado, y todos los demás componentes en operación total.

### 5.3.5 Capacidad Nominal de la Excitación

#### a) Capacidad de Corriente

La capacidad de conducción de Corriente positiva continua no debe ser menor que 110% de la Corriente de excitación necesaria para mantener el generador cargado en potencia máxima continua, a 105% de la tensión nominal, con la temperatura del devanado de campo a 100°C.

#### b) Temperatura de operación

La temperatura de operación, con todos los módulos rectificadores y ventiladores de reserva en operación, cuando la temperatura del aire de refrigeración en la entrada de los rectificadores es de 50°C, debe ser de 10°C abajo del límite especificado por el FABRICANTE.

#### c) Límite de Tensión

límite positivo: no menor que 5,0 pu  
límite negativo: no menor que 4,0 pu

NOTA: 1,0 pu de tensión corresponde a tensión de campo necesaria a generar a tensión nominal en la línea del entrehierro en vacío a 75°C.

#### d) Transformador de excitación

La capacidad continua nominal no debe ser menor que el requerido cuando la excitatriz esté operando continuamente en conducción positiva.

## 5.4 Componentes del Sistema de Excitación

### 5.4.1 Transformador de Excitación

El transformador de excitación deberá ser trifásico, conexión estrella-delta no aterrado, con barreras aislantes entre fases en el lado de alta. La interconexión de la baja tensión con el rectificador deberá ser con cable. El transformador deberá ser del tipo seco, instalado en cubículo adecuado para ventilación natural, con sus arrollamientos encapsulados en resina, de manera que las superficies externas del encapsulamiento sean perfectamente lisas de modo de evitar la deposición de polvo y facilitar la limpieza.

El transformador deberá soportar, sin daños;

- sobretensiones en el generador debidas a todo y cualquier tipo de rechazo de carga con sobrevelocidad en 30s de duración;
- corto-circuito asimétrico total en sus terminales;
- suministro continuo de 110% de la potencia continua máxima de la excitatriz, sin exceder 80°C de elevación de temperatura.

Los TCs deben poseer las siguientes características principales:

- Corriente nominal primaria en un valor a ser confirmado por el fabricante;
- Corriente nominal secundaria de 5A;
- clase de precisión 10B100;
- Corriente soportable de corto-circuito, estática y dinámica, compatible con los niveles de corto-circuito en la barra del generador;

Deberán ser instaladas sondas de temperatura, en los tres arrollamientos secundarios, conectadas a un dispositivo capaz de proveer alarma y bloqueo.

#### **5.4.2 Interruptor de Campo**

Deberá ser instalado en el lado de Corriente Continua. La capacidad nominal continua de sus contactos principales deberá ser mayor que la capacidad de conducción de Corriente positiva continua del campo del generador. Los niveles de tensión deberán ser compatibles con los valores límite de campo. Deberá ser comandado eléctricamente a través de órdenes provenientes del circuito externo. Deberá poseer contactos principales en número suficiente para la inserción del resistor de descarga y para desconectar el campo de la fuente.

#### **5.4.3 Crow-Bar y Resistor de Descarga**

En paralelo con el contacto del interruptor de campo se insertará el resistor de descarga, que deberá ser provisto de un conjunto de dos tiristores, dispuestos en anti-paralelo, para proveer camino para la corriente de campo en casos de sobretensión. Estos tiristores también deberán ser accionados cuando se abre el interruptor de campo de forma de extender la vida útil de los contactos.

El Resistor de Descarga deberá ser de tipo lineal, de capacidad suficiente para disipar la energía almacenada en el arrollamiento de campo.

#### **5.4.4 Excitación Inicial**

El sistema de excitación deberá contener un conjunto independiente de equipos destinados a la excitación inicial del generador, que atienda las siguientes exigencias:

- normalmente deberá ser prevista a partir del sistema de Corriente Alterna. En caso de emergencia el suministro de energía podrá ser prevista desde el sistema de corriente continua o un sistema Black Start de arranque automático ante la ausencia del sistema de corriente alterna.
- los equipos deberán permitir la conexión de la excitación inicial del campo, a partir de un deslizamiento bajo, también como su desconexión automática, sin que la tensión del estator haya alcanzado un nivel adecuado, después de la entrada en servicio de la excitación principal, dentro de un tiempo límite;
- todos los equipos que puedan estar sujetos al límite máximo de tensión de la excitatriz deberán ser sometidos a los mismos ensayos dieléctricos previstos para el circuito de campo;
- El sistema implementado deberá mantener la característica original de la unidad que es la capacidad de la partida en negro (“black-start”);
- El interruptor de alimentación del campo deberá poseer 2 contactos auxiliares libres, siendo 1 (un) NA y 1 (un) NC.

#### **5.4.5 Puente Rectificador**

Los requisitos del puente rectificador son los siguientes:

- los elementos rectificadores de la excitatriz deberán ser montados en puentes trifásicos de tiristores del tipo SCR y deberán estar de acuerdo con los requisitos de la ANSI C34.2;
- la tensión de pico inverso (PIV) de los rectificadores deberá ser compatible con las máximas condiciones de sobretensión esperadas, además el valor nunca será inferior a 2,5 veces del máximo PIV de trabajo;
- deberá ser instalado en el lado de CC del puente rectificador, un dispositivo de supresión de transitorios con energía adecuada a la aplicación;
- la configuración completa del puente rectificador deberá estar constituida de dos (2) puentes rectificadores trifásicos, conectados en paralelo;
- la ventilación deberá ser independiente para cada puente;
- El sistema de enfriamiento deberá garantizar su eficiencia en caso que uno de los puentes rectificadores esté fuera de operación.

#### **5.4.6 Regulador Automático de Tensión y Regulador Manual de la Excitación**

El sistema digital deberá ser del tipo doble canal, cada canal incluyendo regulación automática y regulación manual, de forma que permita que la unidad permanezca operando con la falla en uno de los canales. La conmutación del canal activo para el de reserva, en caso de falla, deberá ser automático y que se realice de forma suave, a través de un circuito de rastreo automático entre los dos canales. La conmutación del canal principal para reserva también se podrá dar de forma manual.

Las ganancias de las mallas de control deben ser ajustables para operación "on-line" y "off-line" (en función del estado del disyuntor del grupo) de forma automática.

a) General

- todos los dispositivos propios del regulador automático de tensión y del control manual de la excitación deberán ser instalados en el Panel de Excitación;
- tanto el canal Principal como el de Respaldo, deberán utilizar todos los módulos de las puentes rectificadores, incluyendo los amplificadores de pulsos de disparo, los demás circuitos de control deberán ser totalmente independientes;
- la alimentación del regulador deberá ser hecha vía CC y CA, de modo que en caso de falla en una de estas fuentes, la alimentación de los módulos sea mantenida sin que ocurra perturbaciones a los circuitos de control;
- las fuentes que alimentan los módulos electrónicos del regulador deberán tener aislamiento galvánico entre entrada y salida, protección contra corto-circuito en la salida e indicación de falla a través de contactos de relés;
- los circuitos de control deberán ser dotados de todos los dispositivos necesarios para satisfacer los requisitos de desempeño y operación especificados, además de atender las exigencias de comando y control externos;
- El regulador deberá ser dotado de puntos de prueba de fácil acceso, para posibilitar ensayos de identificación, ajustes, y facilitar el mantenimiento;
- las tarjetas de circuito impreso deberán tener tratamiento anti-corrosivo, así como todos los contactos y conectores.

b) Regulador Automático de Tensión

- Cada regulador de tensión deberá ser digital y diseñado de modo que una falla en cualquier elemento del circuito de control no provoque operación incontrolada o peligrosa al sistema de excitación;
- Cada Regulador Automático de tensión deberá ser equipado, mínimo, con los siguientes limitadores de actuación continua:

Excitación Mínima, actuando instantáneamente, siempre que el generador alcance un punto de operación fuera del cual la máquina pueda perder el sincronismo, o que sean exigidos sus límites térmicos;

Excitación Máxima, con la función de limitar automáticamente la corriente de campo a un valor máximo permitido para el sistema de excitación y del arrollamiento de campo. Su actuación deberá ser retardada, para

permitir sobrecargas transitorias, para que estas operaciones sobreexcitadas del generador no alcancen los valores establecidos para el arrollamiento de campo, o instantánea, para protección del puente de tiristores; Volts/Hertz, con función de evitar sobreflujo en el generador, transformador elevador y transformador de excitación, causado por sub-frecuencia o sobretensión. La actuación deberá ser instantánea, ajustable de 1 a 1,3pu.

- La actuación de los limitadores deberá ser estable, con buen amortiguamiento y pequeño tiempo de estabilización. Las curvas de actuación, las ganancias, constantes de tiempo, etc., que afectan directamente la actuación de los limitadores, deberán ser ajustables.

- Flexibilidad para instalación futura de un sistema AGC (Control Automático de Generación).

- Compensador de Reactivos

Se deberá suministrar una función de compensación de reactivos, con el objetivo de mejorar la regulación de la barra de la subestación. El grado de compensación deberá ser de 0 a 10% (compensación positiva y negativa).

- Estabilizador de Sistema de Potencia (PSS)

El ESP deberá ser derivado de la potencia de aceleración siendo esta derivada de la potencia eléctrica y velocidad. En caso de utilizar la frecuencia en vez de la velocidad, aquella deberá ser tomada en una barra virtual, sintetizada a través de las tensiones y corrientes en los terminales, que emula la tensión interna de la máquina (tensión alineada con el rotor).

- Función Seguidor (Follow-up)

Se deberá prever una función de acompañamiento, que ajuste continuamente la referencia manual, de modo de garantizar la transición suave del control de la excitación, del modo automático al manual, en el caso de pérdida de la señal de tensión de los transformadores de potencial del generador.

La transferencia del modo manual (control de Corriente de campo) al automático (control de tensión terminal) podrá ser hecha localmente por el operador, o automáticamente por la lógica de control del regulador, cuando la falla que provocó la conmutación a manual haya sido eliminada.

### c) Control Manual de la Excitación

- La selección del tipo de control será efectuada por la llave selectora de modo de operación (manual-automático) del regulador;
- El equipo de control manual de excitación deberá permitir el control de la tensión de campo en el generador, en caso de falla en el regulador automático, o cuando éste es desconectado manualmente;
- El control manual deberá cubrir un rango de 80 a 110% de la tensión nominal del generador en cualquier condición de carga, dentro de la curva de capacidad del generador;
- Durante la realización de ensayos, con alimentación externa, el control de la excitación deberá ser posible a partir de cero, hasta el máximo permisible, debiendo el rango de operación ser restringida por valores límites ajustables.
- Un ejemplo del regulador automático, la función de ajuste de la referencia de variable controlada deberá ser implementada en software, dentro del programa de control del regulador.

#### d) Función de Prueba

Se deberá hacer parte del equipo, una función destinada a mediciones de niveles de señal en los puntos de entrada y salida de los principales módulos electrónicos. Tales mediciones se podrán hacer con el sistema de excitación en operación, sin que haya cualquier posibilidad de que introducir perturbaciones al mismo.

#### e) Transductores

Se deberán prever transductores de medición con salida de 4-20mA en corriente continua, para posibilitar la indicación local y remota de:

- tensión terminal del generador;
- corriente de campo;
- tensión de campo;

Los transductores de potencia activa, potencia reactiva y Corriente de máquina constarán en el suministro del telecomando y automatización de la central.

Los transductores deberán ser suministrados en cajas totalmente cerradas, a prueba de polvo y suciedad. Los transductores que no fueran instalados en el panel deberán ser suministrados en cajas totalmente cerradas a prueba de polvo, gases, vapores y restos de líquidos. Las conexiones deberán ser apropiadas para instalación en raíl.

#### f) Componentes del panel de la sala de comando

Se deberá suministrar e instalar una IHM Gráfica, con monitor touch screen en la sala de comando, donde se podrá:

- visualizar la tensión terminal;
- visualizar la Corriente de campo;
- visualizar la tensión de campo;
- visualizar la temperatura del campo;
- comandar aumentar/disminuir tensión/reactivo;
- visualizar las señalizaciones:

- canal de regulación activo;
- limitador de excitación mínima actuado;
- limitador de excitación máxima actuado;
- limitador Volts-Hertz actuado;
- estabilizador de sistema de potencia activo.
- falla en el sistema de excitación;
- actuación de protección del sistema de excitación.

## **5.5 Protección del Sistema de Excitación**

### **5.5.1 General**

El sistema de excitación deberá ser dotado, mínimo, con los dispositivos de protección del sistema de excitación incluidos en el presente ítem. En caso de necesidad de aumento de algún otro dispositivo o protección, verificado durante a fase del presente concurso, tal dispositivo deberá ser suministrado por el proveedor, sin costos adicionales al precio de la propuesta original.

La operación de cualquier protección deberá ser anunciada en el Tablero de Control y, por tanto, el proveedor deberá suministrar 2 (dos) contactos NA y NC para interrupción de circuitos inductivos de  $125V_{CC}$ .

### **5.5.2 Transformador de Excitación**

Deberá poseer:

- dispositivo para supervisión de la temperatura de los arrollamientos, apropiado para transformador seco, con 2 (dos) niveles de actuación: alarma y desconexión;
- relé de Sobre corriente;
- relé de balance de fases (60).

### **5.5.3 Excitación Inicial**

Deberá poseer:

- dispositivo de supervisión de tiempo excesivo de aplicación;
- dispositivo de protección de la alimentación de la excitación inicial.

#### **5.5.4 Sistema de Enfriamiento de la Excitatriz**

Deberá poseer:

- dispositivo para detectar pérdida de ventilación del puente rectificador;
- protección de los moto-ventiladores contra sobrecargas y cortocircuitos.

#### **5.5.5 Puentes Rectificadores**

Deberán poseer:

- protección de los tiristores contra sobretensiones de corta duración provenientes del sistema, de corrientes de picos de tensión, provocados por maniobras o descargas atmosféricas;
- protección contra sobretensiones inducidas al campo;
- falla en los tiristores, que deberá ser efectuada por la asociación de los siguientes dispositivos:
  - fusibles ultra-rápidos en serie con los tiristores, en el lado CA, dotados con micro-contacts auxiliares para señalización;
  - monitor de conducción del brazo del puente rectificador, dotado de contacto auxiliar para señalización;
  - protección de tierra en el circuito de campo.

#### **5.5.6 Regulador de Tensión - Circuitos de Control**

Deberá poseer:

- detectores de pérdida de fuentes de alimentación;
- detección de falla de CPU
- detección de falla de comunicación;
- transferencia automática para control manual en caso de falla en la medición de la tensión terminal del generador;
- detección de falla en la des-excitación

## **6 REGULACIÓN DE VELOCIDAD**

### **6.1 General**

El sistema de regulación de velocidad deberá estar basado en las características del sistema a ser controlado, con la unidad suministrando energía, tanto para una red eléctrica considerada como barra infinita, como para una red eléctrica aislada, continuamente hasta su valor máximo de potencia garantizada.

La capacidad del sistema de regulación deberá ser suficiente para operar el servomotor del distribuidor de la turbina, con presión y seguridad bajo todas las caídas de agua disponible en la central, asimismo en el extremo mínimo de la presión de aceite de la etapa de potencia del nuevo sistema.

### **6.2 Características de Operación**

La unidad generadora será operada en modo normal desde la Sala de Mando (y si fuera necesario, desde una estación semejante vía remota por tele-comando). Todos los mandos efectuados vía Sala de Mando pueden ser efectuados de manera remota. El control local de la unidad a partir de los propios equipos auxiliares solamente será posible para fines de pruebas, y falla del sistema remoto.

Las funciones de arranque, ajuste de carga, ajuste del limitador de abertura, parada normal, parada de emergencia serán explicadas adecuadamente en la oferta del fabricante.

### **6.3 Requisitos de Desempeño**

#### **6.3.1 Generalidades**

Los párrafos siguientes especifican los requisitos básicos para el diseño, la fabricación, el montaje en la fábrica, las pruebas de fábrica y de campo y la entrega del equipo para regulación de turbinas Francis:

- la unidad turbina-generador será operada remotamente desde la Sala de Comando. Eventualmente, en condiciones de operaciones especiales y pruebas, la unidad será controlada a partir del cuadro de comando local y de los propios equipos auxiliares, (paso a paso);
- El regulador deberá ser del tipo digital, electro-hidráulico, proporcional-integral-derivativo (PID), de tres ganancias con ajustes independientes para la operación en vacío y bajo carga;
- El suministro del regulador comprenderá la parte del controlador digital, la válvula de interfaces con el actuador original y la unidad de suministro de aceite presurizado para la nueva válvula actuadora. Las partes electrónica e hidráulica deberán ser alojadas en cubículos separados. El fabricante presentará las alternativas de ubicación;

- La unidad hidráulica a ser suministrada también deberá ser capaz de suministrar aceite presurizado para la válvula de arranque de la turbina que acciona las bombas de aceite para la etapa hidráulica de potencia (distribuidor de la turbina);
- La presión mínima normal de operación debe ser limitada a 90% (noventa por ciento) de la presión máxima. En tanto, la presión cae a 80% (ochenta por ciento) de la presión máxima normal, la capacidad del sistema será suficiente para cerrar los servomotores de la turbina, desde plena apertura bajo caída máxima del agua.

El fabricante a partir de la visita técnica deberá acomodar sus equipos en un arreglo a ser aprobado por el cliente.

### 6.3.2 Características de desempeño requeridas

Las características básicas de desempeño requeridas para el sistema son:

a) Sensibilidad

El ancho de banda de velocidad no deberá exceder a 0,4% (cuatro décimos por ciento) de la rotación nominal, bajo cualquier apertura del distribuidor de la turbina.

b) Tiempo Muerto

El tiempo muerto desde el inicio de la variación de la señal de carga/frecuencia, hasta el inicio del movimiento del servomotor para una súbita variación de carga mayor del 10% de la potencia nominal de la turbina, no deberá exceder a 0,2s.

c) Ajustes

Los rangos de ajuste del regulador serán los siguientes:

1. Dispositivo de ajuste de velocidad y carga:

$d_n$  = de 90% a 110% de la rotación nominal bajo marcha en vacío

2. Dispositivo de ajuste de estatismo permanente:

$b_p$  = de 0 a 10%

3. Ajustes de ganancias:

Las ganancias proporcionales, integrales y derivativas deberán ser ajustadas independientemente para la operación en vacío y bajo carga con el siguiente rango mínimo de ajuste:

$K_p$  = ganancia proporcional:      cero a 10;  
 $K_i$  = ganancia integral:            cero a  $1 \text{ s}^{-1}$ ;  
 $K_d$  = ganancia derivativa:         cero a 10 s.

d) Tiempos de Apertura y Cierre

1. Tiempo de Apertura:  $TAs$  (30% a 80%);
2. Tiempo de Cierre:             $TF$  s (100% a 0%);

e) Curso del Servomotor: CSmm

La malla de control de velocidad deberá ser construida de manera tal que las tomas de carga presenten características lineales (en rampa), con bajo tiempo de estabilización, sin que se modifiquen los parámetros usuales de la regulación PID. La conmutación de mallas o parámetros no será admitida. Los ajustes de la malla de control deberán estar basados en el criterio de operación aislada.

### 6.3.3 Filosofía de Regulación

El regulador debe operar con doble canal, con conmutación automática de un canal para otro cuando hay fallas o por mando del operador.

Las ganancias de las mallas de control deben ser ajustables para operación "on-line" y "off-line" (en función del estado del disyuntor del grupo) de forma automática.

Los parámetros del regulador de velocidad deben ser fácilmente ajustables a través de un Interface con teclado y "display" de cristal líquido en el cubículo que contiene los módulos electrónicos.

### 6.3.4 Tomas de Carga

Las tomas de carga, deben ser independientes de la regulación de velocidad.

El sistema de regulación de velocidad debe proveer un dispositivo de toma rápida de carga, sin degradación del control de velocidad y con desempeño lineal en todo el rango de potencia. La toma de carga también debe tener ajuste basada en la curva de abertura del actuador por la potencia con parámetros independientes del control de velocidad.

### 6.3.5 Ciclo de Servicio

Para el caso de avería completa del conjunto moto-bomba de la unidad hidráulica, deberá ser previsto una reserva de aceite bajo presión en el acumulador, suficiente para permitir 3 cursos consecutivos del servomotor

(cierra – abre – cierra), entre las presiones de alta intermitencia y mínima del sistema, conforme a las normas IEE e IEC.

#### 6.3.6 Nivel de Ruido

El nivel máximo permisible de ruido no deberá exceder a 65dB, a una distancia de 1m de los cubículos del regulador, con el sistema forzado de enfriamiento conectado, y todos los demás componentes en operación total.

### 6.4 Componentes del Sistema de Regulación de Velocidad

#### 6.4.1 Unidad de Control

El sistema digital deberá ser del tipo doble con dos canales independientes, en forma de permitir que la unidad permanezca operando con la falla de uno de los canales. La conmutación entre los canales, en caso de falla, deberá ser automática y se dará de forma suave, así como también podrá ser de forma manual.

Las ganancias de las mallas de control deben ser ajustables para operación "on-line" y "off-line" (en función del estado del disyuntor 52 del grupo generador) de forma automática.

##### a) General

- todos los dispositivos propios del regulador de velocidad deberán ser instalados en el panel de control, excepto los transductores de posición y dispositivos mecánico-hidráulicos;
- el control de velocidad deberá ser dotado de dos canales independientes;
- los dos canales de regulación deberán utilizar las mismas válvulas y transductores de posición, sin embargo los demás circuitos de control deberán ser totalmente independientes;
- la alimentación del regulador deberá ser hecha vía CC y CA, de modo que en caso de falla en una de estas fuentes, la alimentación de los módulos sea mantenida sin que ocurra perturbaciones a los circuitos de control;
- las fuentes que alimentan los módulos electrónicos del regulador deberán tener aislamiento galvánico entre entrada y salida, protección contra corto-circuito en la salida e indicación de falla a través de contactos de relés;
- los circuitos de control deberán ser dotados de todos los dispositivos necesarios para satisfacer los requisitos de desempeño y operación especificados, además de atender las exigencias de comando y control externos;
- el regulador deberá ser dotado de puntos de prueba de fácil acceso, para posibilitar ensayos de identificación, ajustes, y facilitar su mantenimiento;

las tarjetas de circuito impreso deberán tener tratamiento anti-corrosivo, así como todos los contactos y conectores.

#### b) Regulador Automático de Velocidad/Carga

El regulador de velocidad deberá ser digital y proyectado de modo que una falla en cualquier elemento del circuito de control no provoque operación incontrolada o peligrosa a la máquina;

Las señales de corriente y tensión serán obtenidos a través de transformadores de medición conforme se indica en esta Especificación.

### 6.4.2 Transductores

Los transductores de posición deben ser de gran calidad y linealidad, con vida útil prolongada. Deben ser fijados de forma segura y protegida, que soporte eventuales trabajos mecánicos en el área, no acarreen daños o descalibración. La tecnología utilizada es libre, pudiendo ser adoptados potenciómetros plásticos, encoders, LVDTs, RVDTs.

### 6.4.3 Relés de Velocidad

Los siguientes relés de velocidad deberán ser suministrados e instalados dentro del cubículo del regulador:

- a) un (1) relé de velocidad para ser ajustado entre 140% y 170% de la rotación nominal, para iniciar la parada de emergencia y el cierre de la válvula mariposa en la tubería de presión;
- b) un (1) relé de velocidad para ser ajustado entre 85% a 110% de la rotación nominal, para sincronización, excitación y supervisión de partida;
- c) un (1) relé de velocidad que opere para valores menores que 1% para supervisar los circuitos de parada de la unidad;
- d) un (1) relé de velocidad para ser ajustado entre 50% a 100% de la rotación nominal, para bloquear la excitación por subfrecuencia;
- e) un (1) relé de velocidad para ser ajustado entre 100% a 150% de la rotación nominal, para bloquear la excitación por sobrefrecuencia;
- f) dos (2) relés de velocidad de repuesto.

## 6.5 Unidad Hidráulica

### 6.5.1 Introducción

En líneas generales, el sistema hidráulico deberá contemplar los siguientes equipos: bombas de desplazamiento positivo por engranajes, termostatos, llave de nivel y boquilla con filtro, válvulas para partida de las bombas en vacío, válvulas de seguridad, registros para aislamiento, manómetros, presostatos para lógica de accionamiento de las bombas y alarmas, dos

filtros, con conmutación por válvula de 3 vías, indicación de filtro succión y by pass, acumulador hidro-neumático, actuador utilizando válvula proporcional, válvulas para cierre de emergencia del servomotor del distribuidor.

### 6.5.2 Modos de operación

El modo de operación de la unidad hidráulica deberá ser establecido en función de las características particulares de esta central. El diseño deberá seguir una filosofía modular, o sea, todo lo que sea necesario para la operación y protección de los elementos de la unidad hidráulica que no deberá depender de otros subsistemas de la central.

### 6.5.3 Modo manual

La bomba seleccionada como “Bomba Principal” deberá operar continuamente de acuerdo al sistema de intermitencia. Este modo de operación se deberá emplear durante el comisionamiento o en los mantenimientos, pues es completamente independiente de comandos recibidos del regulador de velocidad. Se utilizará para el movimiento de los servomotores durante el proceso de ajuste de los mecanismos de regulación y de las velocidades máximas de apertura y cierre de los servomotores.

### 6.5.4 Modo automático

Este deberá ser el modo de funcionamiento normal de la unidad hidráulica. La lógica de arranque y parada de las bombas será comandada por el automatismo, implementado en un panel eléctrico fijado en la propia unidad hidráulica. La lógica de funcionamiento del sistema deberá ser como se describe abajo.

Para mejor entendimiento de la operación se define los siguientes niveles de presión del sistema hidráulico:

- Presión de alta intermitencia (presión nominal) – presión en que las bombas trabajan en vacío;
- Presión de baja intermitencia 1 – presión de entrada de la bomba principal;
- Presión de baja intermitencia 2 – presión de entrada de la bomba de respaldo;
- Presión baja – presión de parada de emergencia de la turbina;
- Presión mínima – menor presión del sistema, utilizada para dimensionar el acumulador.

#### **Arranque del grupo turbina-generador:**

En el arranque, la bomba principal será energizada y presurizará el sistema hasta que alcance la presión nominal (Presión nominal o alta intermitencia).

Alcanzada la presión nominal, el solenoide de descarga será desenergizado y la bomba pasará a operar en vacío.

**Reposición de consumo normal:**

En condiciones de operación normal, el consumo de aceite hará que la presión del sistema baje hasta la presión de baja intermitencia 1, el que causará la energización del solenoide de la válvula de descarga, y la bomba presurizará el sistema.

**Normalización de la presión de trabajo:**

Después de alcanzada la presión nominal (Presión nominal o alta intermitencia) con la actuación de la bomba, el presostato comanda la desenergización del solenoide de la válvula de descarga y el ciclo sigue indefinidamente.

**Consumo arriba del normal:**

En la condición de consumo excesivo, la segunda bomba deberá partir y auxiliar en la presurización del sistema.

**Avería completa del conjunto moto-bomba:**

En el caso de avería completa del conjunto moto-bomba de la unidad hidráulica, se deberá prever una reserva de aceite bajo presión en el acumulador, suficiente para permitir 3 cursos consecutivos del servomotor (Cierra – Abre – Cierra), entre las presiones de alta intermitencia y mínima del sistema de acuerdo a las normas IEEE e IEC.

**Grupo turbina-generador parada por largos períodos de tiempo:**

En caso de haber una parada más prolongada de la turbina, las bombas deberán continuar manteniendo la presión del sistema de la siguiente manera: la bomba llamada de “Bomba Respaldo” permanecerá desconectada, hasta que la presión de aceite caiga al nivel de baja intermitencia 2. En tanto, el automatismo comandará el accionamiento del motor eléctrico de la bomba respaldo y energizará el solenoide de descarga, de manera que presurizará el sistema hasta el nivel de la presión nominal o presión de alta intermitencia. Inmediatamente después, la bomba respaldo deberá ser desconectada y el solenoide de la válvula de descarga desenergizado. Vale decir que la bomba denominada “Bomba Principal” nunca deberá entrar en operación en esta condición.

#### 6.5.5 Protecciones y señalizaciones

La unidad hidráulica deberá prever las siguientes protecciones, que deban garantizar la integridad de sus componentes cuando estén sujetos a condiciones adversas de operación.

- Protección eléctrica de los motores con disyuntor motor;
- Protección contra picos en los módulos electrónicos de control;
- Desconexión automática de las bombas, en caso de nivel muy bajo de aceite;

- Válvulas de alivio en las bombas y en el acumulador, ajustadas para operar en una presión 10% arriba de la nominal.

La unidad hidráulica deberá disponer la siguiente señalización, en la forma de contactos secos normalmente abiertos, para Interfaz con sistema de automatización y control de la central.

- Presión baja (bloqueo);
- Nivel de aceite alto (alarma);
- Nivel bajo (alarma);
- Nivel muy bajo (bloqueo);
- Temperatura alta (alarma);
- Temperatura muy alta (bloqueo);
- Filtro de aceite sucio (alarma).

### 6.5.6 Descripción de los componentes

#### **Reservorio (0Z1):**

El reservorio será construido de chapas de acero soldado y será equipado con:

boquilla con filtro, para reposición de aceite; tapa de inspección lateral, próximo a los filtros de succión de las bombas; soporte para acumuladores, cuando sea necesario; válvulas para conexión con sistema externo de filtrado; indicador visual de nivel y temperatura del aceite; pintura conforme especificación.

#### **Filtro de abastecimiento y de respiro (0Z2):**

Cantidad: 1 (uno)

Función: Equilibrar la presión en la parte interna y externa del reservorio en caso de volumen máxima de entrada y salida del aceite de abastecimiento

#### **Válvulas para conexión de sistema externo de filtrado (0V6 y 0V7):**

Cantidad: 2 (dos)

Función: Posibilitar drenaje del aceite del reservorio y conexión de sistema externo de filtrado. El reservorio es construido con una pequeña inclinación en el fondo, haciendo que la válvula de drenaje sea situada en su punto más bajo. La otra válvula es instalada en el lado opuesto superior del reservorio de manera a optimizar el funcionamiento del sistema externo de filtrado.

#### **Panel de control de la unidad hidráulica:**

Cantidad: 1 (uno)

Función: Este panel contiene todos los dispositivos de control, protección e Interfaz de la unidad hidráulica. Están previstos disyuntores, contactores, protección térmica de los motores, módulos controladores / indicadores de presión, relés auxiliares, botones de comando, lámparas de señalización, plaquetas de identificación, reglas de bornes, entre otros. La Interfaz entre la unidad hidráulica y los demás sistemas de la central es hecha a través de una regla de bornes situada en este panel.

**Bombas de desplazamiento positivo (0P1 Y 0P2):**

Cantidad: 2 (dos)

Función: Las bombas de desplazamiento positivo suministran volumen de aceite para el sistema.

**Motores eléctricos (0M1 Y 0M2):**

Cantidad: 2 (dos)

Función: Accionar las bombas de desplazamiento positivo.

**Acumulador (0Z13):**

Cantidad: Varía en función del tamaño de la turbina.

Función: Acumular aceite bajo presión para garantizar el cierre de emergencia de la máquina.

**Filtros de presión (0Z11 Y 0Z12):**

Cantidad: 2 (dos)

Función: Garantizar retención de las partículas sólidas en suspensión en el aceite, protegiendo los demás componentes del sistema hidráulico.

**Válvulas de comando de la intermitencia (0Z5):**

Cantidad: 1 (un) conjunto

Función: Direccionar el volumen de aceite de las bombas. Las válvulas de este sistema direccionan al volumen de aceite para el tanque, o para el acumulador.

**Válvulas de comando de la válvula de adecuación (1Z2):**

Cantidad: 1 (un) conjunto

Función: Comandar la apertura y cierre de las válvulas de adecuación y by-pass.

**Válvula proporcional (1Z1):**

Cantidad: 1 (una)

Función: Control de posición del servomotor del mecanismo de regulación. La válvula proporcional será montada en un bloque múltiple (manifold), donde serán montadas también, una válvula piloto para cierre de emergencia, una válvula piloto para bloqueo de la válvula proporcional y otra electro-válvula que recibirá una señal eléctrica de partida/parada y comandará por presión las válvulas pilotadas.

**Sensor de temperatura del aceite (0Z3):**

Cantidad: 1 (uno)

Función: Indicar la temperatura del aceite.

**Sensor de nivel del aceite (0Z4):**

Cantidad: 1 (uno)

Función: Indicar el nivel de aceite del reservorio.

**Sensor de presión del aceite (0Z15):**

Cantidad: 1 (uno)

Función: Indicar la presión del aceite.

#### **6.5.7 Tuberías y conexiones**

La tubería de retorno de aceite de los componentes montados sobre el reservorio llegará al nivel normal de aceite, excepto los retornos por fuga de fluido por gravedad.

Todas las entradas y salidas de las tuberías de conexión con los equipos deberán ser dispuestas en la parte trasera del reservorio.

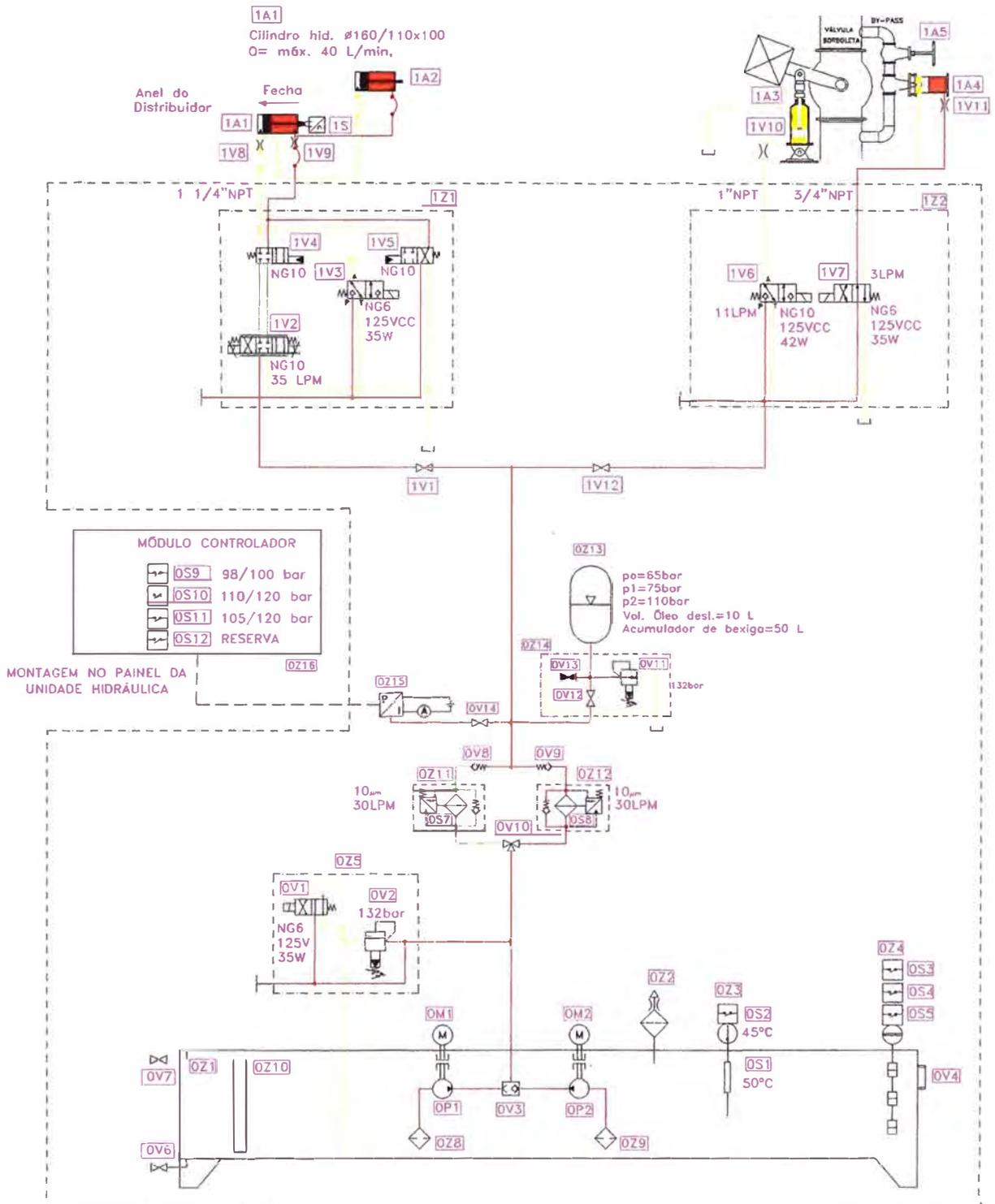
#### **6.5.8 Pintura**

Para la pintura externa e interna, se debe limpiar el metal con un abrasivo hasta que quede blanco, una primera mano con pintura epóxica, con un espesor mínimo según las normas, y dos manos de pintura de acabado.

#### **6.5.9 Tarjeta de identificación**

En general, todos los aparatos deberán tener tarjetas resistentes a la humedad y al aceite, indicando modelo, número de serie, nombre del fabricante y las características técnicas esenciales.

6.5.10 Esquema hidráulico ilustrativo



## **6.6 Protecciones del Sistema de Regulación de Velocidad**

### **6.6.1 General**

EL sistema de regulación de velocidad deberá ser dotado, como mínimo, con los dispositivos de protección incluidos en el presente ítem. La actuación de cualquier protección deberá ser anunciada en la Sala de Comando y, por tanto, El fabricante deberá suministrar 2 (dos) contactos NA y NC con capacidad de 0,3A para interrupción de circuitos inductivos de 125V<sub>CC</sub>, y constante de tiempo de 40 ms.

### **6.6.2 Unidad Hidráulica**

Ver “Protecciones y Señalizaciones” en el capítulo referente a la Unidad Hidráulica.

### **6.6.3 Unidad de Control**

Deberá poseer:

- detectores de pérdida de fuentes de alimentación;
- detección de falla de CPU
- detección de falla de comunicación;
- detección de falla de medición de frecuencia, posición o potencia;
- transferencia automática para el regulador de respaldo en caso de falla del regulador principal, y vice-versa;
- transferencia automática para realimentación de posición en caso de falla en la medición de potencia activa del generador;

### **6.6.4 Sobrevelocidad**

La protección de sobrevelocidad deberá ser hecha por lo menos de dos formas independientes:

- eléctricamente, a través de un relé de sobrevelocidad;
- mecánicamente, a través de un dispositivo que actúe directamente en la unidad hidráulica y provoque el cierre del distribuidor.

La actuación de cualquiera de esta protecciones, también deberá accionar al relé de bloqueo del grupo generador y activar la señalización correspondiente. Para esto deberán estar disponibles contactos secos.

### **6.6.5 Partida**

Deberá ser prevista la supervisión de la partida del grupo, cuando se alcance la velocidad nominal. En caso de tiempo excesivo o partida incompleta, el sistema de regulación deberá emitir una alarma de falla y una orden para el bloqueo del grupo generador.

### 6.6.6 Paradas

Deberá ser prevista la supervisión de la parada del grupo, sea ella parcial o total. En caso de tiempo excesivo en la parada, o proceso incompleto (máquina permanece rodando o con carga, dependiendo del tipo de parada), el sistema de regulación deberá emitir un alarma de falla y una orden para bloqueo del grupo y/o comando de cierre de la válvula mariposa de la tubería de presión.

## 7 PROGRAMABILIDAD

Los Reguladores de Tensión y de Velocidad deberán estar basados en un núcleo tiempo-real de tareas, debiendo ser totalmente programable por el cliente, permitiendo:

- Edición gráfica de diagramas de bloques de las funciones lógicas utilizadas en el regulador;
- organización de los diagramas en tareas (división por frecuencia de ejecución) y programas (división por funcionalidades);
- Programación de la interfaz de la IHM local;
- Programación de entradas y salidas, tanto digitales como analógicas;
- Programación de los paquetes de tareas por el Interfaz de comunicación;
- definición de áreas protegidas;
- captura de registros y de parámetros.

## 8 PROTECCIÓN DEL GRUPO GENERADOR

### 8.1 General

El Cliente sustituirá el actual Cuadro de Relés de Protección por un sistema de protección digital. En caso que el fabricante quisiera aumentar algún dispositivo deberá explicitarlo en su propuesta.

### 8.2 Protecciones Especificadas

Las siguientes protecciones estarán disponibles:

- Protección Diferencial del Generador (87G);
- Protección contra Defecto a Tierra en el Estator (64G);
- Protección Contra Sobretensión en Generador (59G);
- Protección Contra Secuencia Negativa (46);
- Relés Auxiliares de Bloqueo de las Unidades (86);
- Protección de Respaldo (21G);
- Relé Direccional de Potencia (32);

### **8.3 Protecciones del Generador Asociadas a la Excitación**

#### **8.3.1 Protección contra Defecto a Tierra en el Rotor (64F1 y 64F2)**

Esta protección deberá ser suministrada por el FABRICANTE de la excitación.

#### **8.3.2 Protección Contra Falla de TPs o del Transformador de Excitación (60E)**

Esta protección deberá ser suministrada por el FABRICANTE de la excitación y deberá presentar las siguientes características:

- a) Deberá supervisar la tensión de los secundarios de los TP's que alimentan el regulador de tensión y los secundarios del transformador de excitación;
- b) Deberá operar, cuando falla la tensión, accionando contactos diferentes, de modo de identificar el circuito del potencial que provocó su actuación;
- c) Su operación deberá ser suficientemente rápida y su número de contactos suficientes para bloquear la actuación de los relés de protección 21G, y 40G y para transferir el regulador de tensión para control manual;
- d) En caso de falla de fase en el transformador de excitación deberá provocar el bloqueo de la unidad;
- y) Deberá ser montada en el cubículo de la excitación.

#### **8.3.3 Protección Contra Sobre corriente del Transformador de Excitación (51TE)**

Esta protección deberá ser suministrada por el fabricante de la excitación y deberá presentar las siguientes características:

- a) Deberá ser apropiada para la detección de fallas bifásicas y trifásicas en el lado de baja del transformador de excitación;
- b) Será constituida básicamente por un relé de Sobre corriente con característica de tiempo inverso, trifásico, con tiempo de operación ajustable, actuando como respaldo de las protecciones inherentes al sistema de excitación;
- c) Deberá ser montada en el cubículo de la excitación o en el del transformador.

#### **8.3.4 Protección contra Pérdida de Excitación (40G)**

Esta protección deberá ser suministrada por el FABRICANTE de la excitación.

### **8.4 Protecciones de la Turbina Asociadas al Control de Velocidad**

Una válvula de bloqueo manual deberá ser suministrada posibilitando el cierre de la válvula distribuidora en el caso de falla de la válvula solenoide. Deberá ser suministrado un presostato para indicar válvula manual actuada.

Debe existir como seguridad adicional un dispositivo mecánico de sobrevelocidad montado en el eje de la unidad. Ese dispositivo, ajustable entre 140% y 170% de la rotación nominal, iniciará la parada de emergencia actuando directamente sobre la válvula solenoide de bloqueo eléctrico. El dispositivo deberá comandar simultáneamente el cierre de la válvula mariposa de la tubería de presión, por medio de los conjuntos de contactos eléctricos con características idénticas a los relés de velocidad

Deberá ser suministrado un dispositivo sensor de sobrevelocidad mecánico que actuará hidráulicamente sobre la válvula distribuidora. Deberá ser suministrado, un presostato para indicar la actuación de esa protección.

## **9 COMUNICACIÓN**

### **9.1 Interfaz Local**

La Interfaz local debe posibilitar:

- ajuste de todos los parámetros del regulador;
- verificación de mensajes;
- ensayos como la aplicación de escalones en las mallas de control o, eventualmente, la apertura de estas mallas;
- visualización en tiempo real de los valores de las principales características del proceso (velocidad, posición del distribuidor, de válvulas, tensión terminal, corriente de campo, etc.).

Los parámetros, que representan los ajustes de los Reguladores de Tensión y de Velocidad, deben ser guardados en memoria no volátil.

Tal Interfaz deberá ser del tipo gráfico y Touch-Screen y, en este caso, además de las funciones citadas sustituirá otros componentes del panel tales como:

- llaves;
- señalizadores;
- indicadores.

### **9.2 Interfaz Remota**

La Interfaz remota se comunicará con el regulador por vía serial aislada (RS 485), y reproducirá todas las funciones locales.

Alternativamente se podrá utilizar una Interfaz de comunicación Ethernet.

### **9.3 Protocolos de Comunicación**

El regulador deberá tener una Interfaz serial, aislada, con posibilidad de comunicación en los siguientes protocolos estándar.

Adicionalmente, en el caso de comunicación vía Ethernet (compatible con NE200, padrón 10BaseT, UTP), deberá haber la posibilidad de comunicación vía MODBUS TCP slave.

### **9.4 Interfaz de Programación**

El Regulador deberá poseer una Interfaz serial RS232 para conexión de un notebook (PC) para embarque de SW y modelo.

Tales Interfaces, deberán permitir el cambio de parámetros, como en la IHM local, sin que sea necesario recompilar la configuración.

Vía tal Interfaz deberá ser posible la observación de tendencias de variables en tiempo real.

## **10 GENERACIÓN DE REGISTROS**

Deberá ser capaz de generar registros internos de eventos, con base de tiempo en año, mes, día, hora, minuto y segundo. El registrador de eventos deberá generar simultáneamente con el registrador de señales a fin de suministrar datos para mantenimiento del equipo

La base de tiempo para los registros podrá utilizar el reloj interno del regulador y de ser necesario el sincronismo del tiempo, deberá ser realizado por un dispositivo externo a través de la señal de sincronismo por PPS y base de tiempo ajustada vía comunicación ModBus.

El regulador transmitirá los registros, cuando sea solicitado, a una PC conectado a la Interfaz serial RS232. Se deberá prever el suministro de software para la visualización y manipulación de estas curvas en ambiente Windows.

## **11 VISUALIZACIÓN DE SEÑALES EN TIEMPO REAL (ON LINE)**

EL regulador deberá poseer la función de visualización en tiempo real de señales continuas y discretas. En esta funcionalidad el Regulador debe permitir la conexión de un microcomputador a través de la Interfaz serial, mostrando las señales de forma gráfica, sin interrumpir la operación normal del regulador.

## **12 OBTENCIÓN Y PORTABILIDADE DE DATOS**

El regulador deberá permitir la obtención de datos parametrizados en un archivo, permitiendo, así, la generación de informes de parámetros. El archivo de datos podrá ser portable para otro regulador, permitiendo así la reconfiguración de otro regulador semejante o el mismo en la recuperación del regulador dañado. El archivo se deberá obtener por conexión serial de un microcomputador al regulador.

## **13 CUBÍCULOS BLINDADOS**

### **13.1 Generalidades**

El cubículo del Regulador estará previsto para ser instalado en la sala de máquinas. El fabricante a partir de la visita técnica, deberá presentar los arreglos para ser aprobados por el cliente.

El cuadro del regulador deberá contener la parte principal de los equipos eléctricos y electrónicos del regulador, integrados en varias unidades, de preferencia del tipo "plug-in", fácilmente intercambiables y montados en una estructura apropiada dentro del cubículo.

Los circuitos de regulación deben resistir las variaciones de temperatura y de humedad.

Todos los circuitos alimentadores de fuerza deberán ser provistos con mini-disyuntores.

El cubículo debe ser de aspecto externo agradable y debe tener recursos para unir los cuadros con los cuales se debe ensamblar.

### **13.2 Construcción**

El cubículo debe ser completamente cerrado, excepto en la base y debe ser fabricado de chapas de acero lisas, especialmente escogidas, con por el menos 2mm de espesor, con armazón y soportes adecuados para formar una estructura rígida auto-soportante. Donde sea necesario, las aberturas de ventilación deben ser provistas en las superficies verticales y deben ser cubiertas por una tela para evitar la entrada de roedores. El cubículo debe ser adecuado para contener cables de control ingresando por la base.

### **13.3 Puertas**

El cubículo debe poseer puertas articuladas para facilitar el acceso al equipo. Estas puertas deben ser suministradas con bridas ocultas que permitan la remoción de la puerta. Las puertas deben ser equipadas con seguros de tres puntos de trabamiento y canaletas adecuadas con llaves. Todas las cerraduras deben ser suministradas con llaves intercambiables de forma que una llave sirva para todas las puertas.

### 13.4 Aterramiento

Salvo especificación contraria, una barra de cobre para aterramiento de 20x3mm debe correr en el interior y a lo largo del Compartimiento del cubículo y todo equipo eléctrico debe ser aterrado en esta barra. Esta barra de aterramiento debe ser conectada a la red de tierra de la central a través de conectores por cables de aterramiento de calibre 35 a 70mm<sup>2</sup>, incluidos en este suministro.

### 13.5 Identificación

Una placa de identificación metálica deberá ser suministrada y fijada sobre el reservorio de aceite del sistema de regulación, en un lugar de fácil visibilidad y con las siguientes informaciones (en español):

- Nombre del FABRICANTE;
- Número de serie y año de fabricación.

### 13.6 Dispositivos de Control e Instrumentos

Indicadores, llaves de control y botones, deberán ser emulados a través de la IHM, la cual deberá estar montada en la puerta del cubículo de control.

Los siguientes indicadores y llaves de control deberán estar presentes en la IHM:

- indicador de rotación analógico;
- indicador de posición del distribuidor;
- indicador del limitador de apertura;
- indicador de Corriente de campo;
- indicador de tensión de campo;
- indicador de tensión terminal;
- ajuste de referencia de velocidad/potencia;
- ajuste de referencia tensión/reactivo;
- llave de conmutación de los canales principal y respaldo;
- llave de control "LOCAL-REMOTO".
- llave de comando de excitación/des-excitación
- botón de rearme de fallas

El cubículo deberá ser alimentado con dos fuentes: una en CA y otra en 125VCC. En caso de pérdida de ambas las fuentes, el sistema de regulación deberá bloquear el grupo y cerrará el distribuidor.

Deberán estar previstos e instalados en el cuadro del regulador, transductores con salida de 4-20mA para posibilitar la indicación remota en la Sala de Comando o en el Cuadro de Instrumentos de la Unidad lo siguiente:

a) En la Sala de Comando:

- rotación;
- posición del distribuidor;

- posición del limitador de apertura;
- tensión de campo;
- Corriente de campo;
- tensión terminal;

b) En el Cuadro de Instrumentos de la Unidad:

- rotación;
- posición del distribuidor;
- posición del limitador de apertura;
- tensión de campo;
- Corriente de campo;
- tensión terminal;

Deberán ser suministrados dos llaves-límites, que serán montados en un lugar apropiado en el mecanismo del distribuidor para indicación de la posición del distribuidor totalmente cerrada.

### **13.7 Acabado**

Todas las superficies del cubículo que serán pintadas, deben estar totalmente limpias después de la fabricación de área, o por otros medios aprobados por el CLIENTE.

### **13.8 Bloques de Terminales**

Los bloques de terminales deben ser localizados de forma conveniente para permitir una disposición de los cables de entrada ordenada y de buena apariencia. Por lo menos 10% de terminales de reserva deben ser montados en las cajas de terminales para futuros crecimientos y modificaciones.

### **13.9 Cableado**

Todo cableado de los circuitos de control y otros circuitos auxiliares deben ser aisladas para una tensión no inferior a 1000 V y debe ser de conductor de cobre trenzado y estaño.

### **13.10 Características de los Circuitos Electrónicos**

Todos los circuitos electrónicos de los sistemas de control que deberán ser parte integrante de la instalación, deben poseer las características de alta confiabilidad e inmunidad a ruidos alimentados con filtros en cada tarjeta.

## **14 PIEZAS DE REPUESTO**

El FABRICANTE deberá suministrar como piezas de reposición, como placas, fusibles, contactores auxiliares, juego de contactos, sensores, IHM (completa) y

transductores de cada tipo, válvula de cada tipo, módulos de presión y grupo de motobomba.

## **15 INSPECCIÓN DE FÁBRICA**

### **15.1 Generalidades**

El CLIENTE se reserva el derecho de tener inspectores presentes durante los ensayos de fábrica, especiales y de rutina.

### **15.2 Inspección**

Para al menos las siguientes etapas deberán estar sujetas a inspección por el inspector en los estados apropiados durante la fabricación:

- regulador digital de velocidad y tensión;
- unidad hidráulica;
- punto de tiristores;
- interruptor de campo;
- transformador de excitación;
- transductores de medida;
- instrumentos de panel y dispositivos de comando;
- identificadores;
- cableado.

### **15.3 Ensayos de Fábrica**

Todos los ensayos deberán ser ejecutados atendiendo a los requisitos de las normas especificadas, excepto donde sea especificado lo contrario en la Especificación Técnica.

El fabricante deberá preparar un Plan de Inspección y Pruebas (PIP) conteniendo las instrucciones detalladas para la realización de las pruebas de fábrica y encaminar al cliente para la aprobación en el plazo adecuado.

Los ensayos comprenderán:

- Ensayo de Componentes
- Ensayo de los Sistemas de Regulación de Velocidad y de Tensión
  - a) Aislamiento
  - b) Rectificadores Estáticos
  - c) Equipo de Excitación Inicial del Campo
  - d) Ensayo Funcional del Sistema de Regulación Completo
  - e) Desempeño del Regulador Automático de Tensión y del Regulador Manual
  - f) Transformador de Excitación
  - g) Unidad Hidráulica
  - h) Sistema de Protección del Generador

El sistema de protección deberá ser sometido a los siguientes ensayos en la fábrica:

- ensayos dieléctricos;
- ensayos de operación de secuencia de los dispositivos;
- ensayos de operación mecánica;
- ensayos de polaridad.

## **16 ENTRENAMIENTO**

### **16.1 Entrenamiento en Fábrica**

#### **16.1.1 Entrenamiento en Hardware**

El FABRICANTE deberá dar entrenamiento en fábrica a dos (2) personas sobre los temas relacionados con el funcionamiento y reparación de los Reguladores de Tensión y de Velocidad a nivel de curso y taller y de los componentes de la etapa hidráulica y convertidor.

#### **16.1.2 Entrenamiento en Software**

El FABRICANTE deberá dar entrenamiento en fábrica a dos (2) personas sobre todos los aspectos relacionados con la programación del sistema propuesto, así como los relativos a red y protocolos utilizados. Especial énfasis deberá ser dado a la descripción de las aplicaciones desarrolladas específicamente para esa instalación. Todos los costos de entrenamiento correrán por cuenta del FABRICANTE. Los costos de transporte, impuestos, hospedaje y alimentación serán por cuenta del Cliente.

#### **16.1.3 Entrenamiento en Instalación y Configuración**

El FABRICANTE deberá dar entrenamiento en fábrica para dos (2) personas sobre los temas relacionados con la instalación y configuración del sistema propuesto.

El FABRICANTE deberá suministrar para todos los entrenamientos, separatas de entrenamiento para cada participante.

### **16.2 Entrenamiento en Campo**

#### **16.2.1 Entrenamiento en Hardware, Software y Configuración**

Los entrenamientos realizados en fábrica deberán ser integralmente repetidos en campo para un grupo de seis (6) personas.

#### **16.2.2 Entrenamiento en Operación**

El FABRICANTE deberá dar entrenamiento en campo a seis (6) personas, en todo que se relacione con la operación del sistema y diagnósticos de fallas.

### **16.2.3 “On the Job Training”**

Este tipo de entrenamiento consiste en permitir la participación de funcionarios del CLIENTE durante los servicios de instalación y ensayos del sistema en el campo, iniciando un proceso de familiarización con los productos y técnicas utilizados.

## **17 EMBALAJE**

El FABRICANTE deberá preparar todos los materiales, componentes y sistemas para el embarque de tal forma que debe protegerlos de daños en el tránsito terrestre, ferroviario, marítimo o aéreo o de las inclemencias del clima.

El FABRICANTE será responsable por cualquier daño debido al embalaje inadecuado, por manejo de la carga y transporte.

## **18 MONTAJE**

### **18.1 Servicios de Desmontaje**

Los servicios de desmontaje de los sistemas de control de tensión y velocidad originales incluidos en este suministro son los siguientes:

- desconexión de los cables de interconexión existentes entre los cubículos de los reguladores de tensión y velocidad actuales y los demás sistemas de la central;
- retirar todos los cables que no serán aprovechados por el nuevo sistema, que interconectan los cubículos de los reguladores actuales con los demás sistemas de la central;
- retirar todos los cables de interconexión de la excitatriz rotativa, que será desactivada;
- retirar todos los componentes del panel de comando relacionados con los sistemas de excitación y de regulación de velocidad originales, permitiendo la instalación de los nuevos componentes.

### **18.2 Servicios de Montaje**

El FABRICANTE deberá suministrar todas las herramientas, dispositivos e instrumentos especiales que específicamente mencionados en él o en otra parte de esta Especificación - necesarios para la montaje, instalación, ensayos, preparación para la operación y partida inicial de los generadores con todas sus pertenencias y accesorios y todos los otros equipos asociados y materiales pertinentes incluidos en esta Especificación.

El FABRICANTE, actuando a través de su supervisor o supervisores de Montaje en el Campo, deberá asumir total responsabilidad por la dirección, supervisión y verificación de la corrección, precisión técnica y adecuada de todos los trabajos desarrollados por el Montador.

### **18.3 Interconexión con El Campo del Generador**

La interconexión entre el interruptor de campo y las escobillas será hecha a través de un cable con aislamiento de 1,0 kV, debiendo ser suministrada por el FABRICANTE.

La interconexión entre el cubículo de la excitación y el campo del generador será hecha a través de cables y será suministrada por el FABRICANTE.

### **18.4 Instalación del Transformador de Excitación**

El FABRICANTE deberá conectar el transformador de excitación con el rectificador a través de cables. Estos deberán ser conducidos por canaletas, por debajo de la celda del transformador de excitación, y deberán presentar aislamiento igual o superior a aquel definido para los cables que interconectan el interruptor de campo con las escobillas.

La interconexión entre las barras del estator del generador y el transformador de excitación será efectuada a través de cables con aislamiento clase 15kV, suministrados por el FABRICANTE.

### **18.5 Cronograma**

Será muy importante el cronograma de trabajo propuesto, es conveniente la visita a la central para presentar sus mejores propuestas.

El CLIENTE dispondrá la parada por vez de un solo grupo de generación para los trabajos de desmontaje, montaje, pruebas, puesta en servicio, etc., de los Regulador de Voltaje y de Velocidad. Entrarán en operación comercial cuando el CLIENTE verifica si se cumplieron todos los puntos del comisionamiento.

## **19 COMISIONAMIENTO (PUESTA EN MARCHA)**

### **19.1 Generalidades**

Este Capítulo tiene por objetivo especificar los requisitos para el establecimiento de las performances de los sistemas de regulación, basadas en los pruebas de campo. Estas pruebas serán supervisadas por el CLIENTE y El FABRICANTE las ejecutará de acuerdo con las normas aplicables y suministrará el personal necesario para la realización de las mismas.

El FABRICANTE deberá preparar un Plan de Comisionamiento conteniendo las instrucciones detalladas para la realización de las pruebas de campo.

Los dispositivos, instrumentos y equipos necesarios para la realización de los ensayos de campo deberán ser proveídos por el FABRICANTE. Esos equipos serán devueltos después de la ejecución de los ensayos.

## **19.2 Pruebas Pre-Operacionales**

Después de la conclusión del montaje de la unidad serán efectuadas las pruebas operacionales de los sistemas de regulación bajo la orientación y supervisión del ingeniero de Comisionamiento del FABRICANTE.

Serán verificadas todas las características de funcionamiento, indicadas por el FABRICANTE en las memorias de cálculo, diseños, manuales de operación y catálogo de equipo o de sus componentes. Será verificado todos los componentes, mecánicos, eléctricos o hidráulicos, de los equipos que trabajan bajo las condiciones normales de operación, definidas en documentos o en normas técnicas aplicables.

Todas las tuberías que serán instaladas deberán ser probadas con una presión 50% arriba de la máxima presión de operación.

Después de la instalación de los equipos deberán ser ejecutados los siguientes ensayos para cada unidad como verificación de las condiciones de los equipos de los Reguladores de Tensión y de Velocidad:

- verificación de todas las conexiones del cableado hechas en la obra;
- verificación de la operación del equipo de enfriamiento;
- verificación de todos los relés, alarmas y controles.

## **19.3 Pruebas de Desempeño**

Los siguientes ensayos de comisionamiento deberán ser ejecutados en los Reguladores:

- ensayos funcionales por inyección de señal;
- controles manual y automático con alimentación por el generador;
- desempeño del sistema bajo condiciones extremas para verificar la operación de los limitadores;
- verificación de la operación de los dispositivos de protección;
- transferencia de control manual al automático de los controladores, y vice-versa bajo condiciones especificadas;
- verificación del tiempo de respuesta de la tensión del sistema de excitación;
- verificación de la sensibilidad del sistema de excitación;
- verificación de la capacidad de tensión límite del sistema de excitación;
- verificación del valor de la Corriente del sistema de excitación bajo condiciones especificadas;
- verificación del desempeño especificado de los Reguladores bajo rechazo de carga.

Las pruebas en condiciones estacionarias se deberán probar la operatividad del Regulador de Tensión y de Velocidad al rechazo de carga, realizadas por lo mínimo en 25%, 50%, 75% y 100% de la potencia máxima, bajo la caída de agua disponible.

Las pruebas de rechazo para las fracciones de potencia arriba establecidas deberán ser efectuadas a través de la apertura del interruptor principal del generador, con la unidad girando bajo el control del regulador de la turbina, y también en las secuencias de parada normal y automática, como también parada de emergencia, para comprobar que todas estas secuencias funcionen normalmente. Para la mitad de la potencia y para la potencia máxima, las pruebas de rechazo de carga deberán ser repetidas a través de cierre de emergencia de la válvula mariposa de la unidad, desconectando el generador de la red, cuando la potencia llega a cero.

#### **19.4 Respuesta Dinámica**

El sistema de regulación deberá ser sometido a pruebas completas de respuesta dinámica.

#### **19.5 Resultados de los Pruebas**

Después de haber comprobado que todos los equipos suministrados están en perfecto funcionamiento y atendiendo las exigencias contractuales, se deberá suscribir un protocolo por el CLIENTE y por el ingeniero de comisionamiento del FABRICANTE y la unidad será colocada en operación comercial a partir de esa fecha.

#### **19.6 Informe de Pruebas**

El informe suministrado por el FABRICANTE deberá incluir todos los datos e informaciones necesarias al entendimiento y análisis de los resultados obtenidos, incluyendo en lo mínimo lo siguiente:

- hoja de datos con las mediciones efectuadas y la identificación de los instrumentos utilizados, inclusive calibración de los instrumentos;
- análisis de las mediciones obtenidas;
- registro de todos los datos importantes que hayan ocurrido durante los pruebas.

Todos los boletines de las pruebas de campo deberán estar debidamente firmados por el personal del CLIENTE y el responsable del comisionamiento.

## **20 DIAGRAMA DE BLOQUES Y MODELADO**

El FABRICANTE deberá suministrar un modelo de las mallas de control de tensión y velocidad para uso en programas de estabilidad.

El modelo deberá ser presentado de forma gráfica en diagramas de bloques, con la función de transferencia indicada en cada bloque.

Incluido en el diagrama de bloques deberán ser suministrados los siguientes valores:

- Todas las constantes de tiempo en segundos.
- Todas las ganancias en p.u. y en unidades reales.
- Todas las no-linealidades (límites, zonas muertas, etc.) serán en p.u. y en unidades reales.
- Rangos de ajuste de todas las ganancias, constantes de tiempo, límites, etc., en p.u. y en unidades reales. Cualquier interacción de los ajustes deberá ser indicada.

Tal modelo estará acotado a los controladores (incluidos el sistema hidráulico – válvulas, servomotores, etc., que son suministrados) y deberán presentar los valores de ganancias, constantes de tiempo, y demás parámetros calibrados en el comisionamiento.

## 21 DOCUMENTACIÓN

El FABRICANTE deberá someter a aprobación del CLIENTE, los datos y diseños abajo especificados.

Tales diseños y datos deben ser considerados básicos para el desenvolvimiento del PROYECTO.

Además de los documentos citados, El FABRICANTE deberá suministrar para aprobación, de otros documentos considerados necesarios para el completo esclarecimiento del PROYECTO, y/o instrucciones de montaje y mantenimiento, en caso de duda o mala interpretación por ambas partes.

El proveedor deberá presentar una lista preliminar de diseños y documentos para aprobación del CLIENTE después de la firma del contrato.

Estos diseños deberán incluir, además de los Diseños de Fabricación, Memorias de Cálculo Ilustrativos, Memorias Descriptivas, Manuales de Montaje, Manuales de Operación, Manuales de Mantenimiento o Documentos que se fueran necesarios para la aprobación del PROYECTO, los siguientes Diseños de Conjunto y Diseños de Detalles:

- Diagramas de Bloques.
- Manuales de Montaje, Operación y Mantenimiento de los Reguladores (Tensión y Velocidad) y de los Dispositivos Electrónicos del Sistema.
- Sistema de Regulación.
- Detalles de las Tuberías.
- Detalle del Interface Hombre-Máquina en el que tenga las facilidades de ajustes y alteraciones funcionales y paramétricas.
- Diseños considerados "Como Construido" que eventualmente hubieran sufrido alteraciones durante el período de garantía.
- Manuales de Montaje, Operación y Mantenimiento de los equipos.

Manuales de Montaje, Operación y Mantenimiento de los Reguladores y de los Dispositivos Electrónicos del Sistema.

Documentación del "Software", incluyendo los modelos de varias funciones, también como del programa principal.

- Diseños del "hardware" que se presten para la ejecución de mantenimientos futuros, los cuales consisten, diagrama electrónico completo, distribución de componentes en las tarjetas con su identificación y la lista de los componentes electrónicos utilizados.

La documentación deberá ser presentada con textos en lengua española.

## 22 GARANTIA

El FABRICANTE es responsable por el suministro de todo el material necesario para la implantación de los reguladores de velocidad y de tensión así como, por todo el servicio de instalación del nuevo sistema, comisionamiento, ensayos complementarios y por el entrenamiento en fábrica y en el campo.

El fabricante deberá presentar en su propuesta, de forma explícita, la garantía sobre el material y servicio, no siendo admitido un período inferior al de 1 (un) año.

El participante debe adjuntar a su información detallada acerca de lo siguiente:

Características del Sistema de Calidad implantado dentro de su empresa para la fabricación de los Reguladores de Tensión y Velocidad del tipo requerido en estas especificaciones.

El número de años que le fabricante viene realizando el diseño y la fabricación de los Reguladores de Tensión y Velocidad del tipo y magnitudes similares a los requeridos en estas especificaciones.

La oferta debe de presentar una relación de los principales compradores de los Reguladores de Tensión y Velocidad similares a los requeridos, indicando países, año de entrega, número de grupos, potencia de cada grupo, valores de estadismo alcanzados, etc.

## 23 EXCEPCIONES

Estas especificaciones técnicas formarán parte de la oferta del proveedor. No se hará ninguna excepción o desviación de las mismas, a menos que el comprador en forma escrita renuncie o modifique algún requerimiento en particular. La propuesta del vendedor debe contener una declaración de que cumplirá sin excepciones las especificaciones técnicas contenidas en este documento. O si las hubiera, el vendedor debe dar una lista en la que describa en detalle las excepciones, a continuación de esta lista debe declarar que no existen más excepciones.

Sin embargo, estas especificaciones no son limitativas, pues no pretenden cubrir total y exactamente todos los requerimientos. Cualquier adición, mejora o aplicación de

nuevos diseños y tecnologías, serán tomadas en cuenta para la evaluación de las ofertas.

#### **24 DATOS TÉCNICOS GARANTIZADOS.**

El proveedor necesariamente emitirá documentación, indicando los datos técnicos garantizados. Estos cuadros, conjuntamente con el resto de la información representa la oferta del postor y en estas especificaciones, servirán para la evaluación técnico – económico de la oferta presentada y posterior control de los suministros.

Se recomienda que las especificaciones sean ordenadas, legibles y serán equipo por equipo.

#### **25 LUGAR DE ENTREGA**

Todos los equipos serán entregados en ..... en coordinación con la Gerencia de Servicios y Logística del CLIENTE.

**ANEXO D**  
**ENSAYOS EN CARGA Y DE RECHAZO DE CARGA DE LA PUESTA EN**  
**SERVICIO DE LOS REGULADORES DE TENSIÓN Y VELOCIDAD**

## **ENSAYOS EN CARGA Y DE RECHAZO DE CARGA DE LA PUESTA EN SERVICIO DE LOS REGULADORES DE TENSIÓN Y VELOCIDAD**

Parte del Informe de Puesta en Servicio

### **ÍNDICE**

1.2	Información General sobre los Equipos para los Ensayos Realizados	173
7.	ENSAYOS EN CARGA – REGULADOR DE VELOCIDAD	174
7.1	Ajustes de la Malla de Potencia	174
7.2	Rechazos de Carga	176
8.	ENSAYOS EN CARGA – REGULADOR DE TENSIÓN	178
8.1	Ajustes de la Malla de Tensión en Carga	178
8.2	Limitador de Máxima Corriente de Campo en Carga	181
8.3	Limitador de Máxima Corriente del Estator	182
8.4	Limitador de Mínima Excitación	184
8.5	Estabilizador de Sistemas de Potencia	185

## 1.2 Información General sobre los Equipos para los Ensayos Realizados

### 1.2.1 Sistema de Regulación

SISTEMA DE REGULACIÓN - CONTROL	
Año de Fabricación:	2005
Canales de regulación:	02 (principal, retaguardia)
Modos de control RT:	02 (tensión terminal, corriente de campo)
Modos de control RV:	03 (Apertura ; Potencia ; Frecuencia)

SISTEMA DE REGULACIÓN - POTENCIA	
Capacidad nominal de cada puente:	350A
Tiristores utilizados:	SEMIKRON SKKT330/12E
Refrigeración de los puentes de tiristores:	Forzada a través de ventiladores y exaustores
Shunt (Relación)	500A/60mV

### 1.2.2 Generador

GENERADOR			
Potencia nominal del generador	17	MVA	
Tensión nominal de la unidad	6900	V	
Frecuencia nominal	60	Hz	
Corriente de campo línea entrehierro	122	A	
Tensión de campo línea entre hierro	98	V	
Corriente de campo en vacío	132,5	A	
Tensión nominal en vacío	112	V	
Corriente de campo nominal $V_T=1.05$ PU	288	A	
Tensión de campo nominal $V_T=1.05$ PU	250	V	
Resistencia de campo	0,845	R	calculado
T <sub>do</sub>	5,0	s	supuesto
X <sub>d</sub>	1,05	pu	
X' <sub>d</sub>	0,33	pu	
X'' <sub>d</sub>	0,33	pu	
X <sub>q</sub>	0,65	pu	
Potencia de corto-circuito	250	MVA	

### 1.2.3 Valores base adoptados

GRANDEZA	VALOR BASE
Tensión terminal	6,9kV
Corriente de campo	122Acc
Tensión de campo	98Vcc
Potencia activa – Pe	17MW
Potencia reactiva – Q	17MVA <sub>r</sub>
Frecuencia	60Hz
Presión	115pis
Caudal	20 m <sup>3</sup> /s

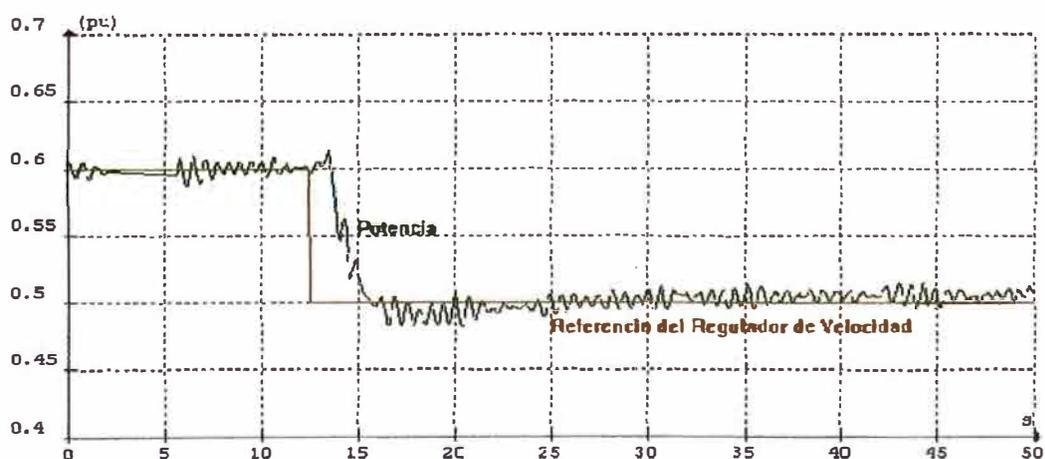
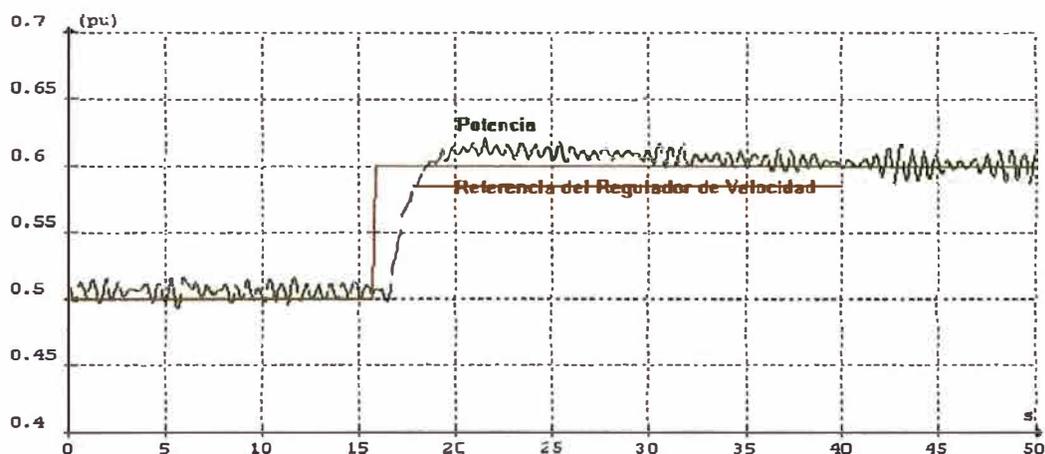
### 1.2.4 Ajuste de los limitadores del regulador de tensión

LIMITADORES	SET POINT
Máxima corriente de campo en vacío	1,08pu
Máxima corriente de campo en carga	2,4pu
Máxima corriente de campo Térmico	2,36pu
Relación del limitador Volts/Hertz	1,07 pu/pu
Máxima corriente del estator	1,0pu
Limitador de mínima excitación	$KV_t=1$ ; $Kix=2,833$ ; $Kir=0$

## 7. ENSAYOS EN CARGA – REGULADOR DE VELOCIDAD

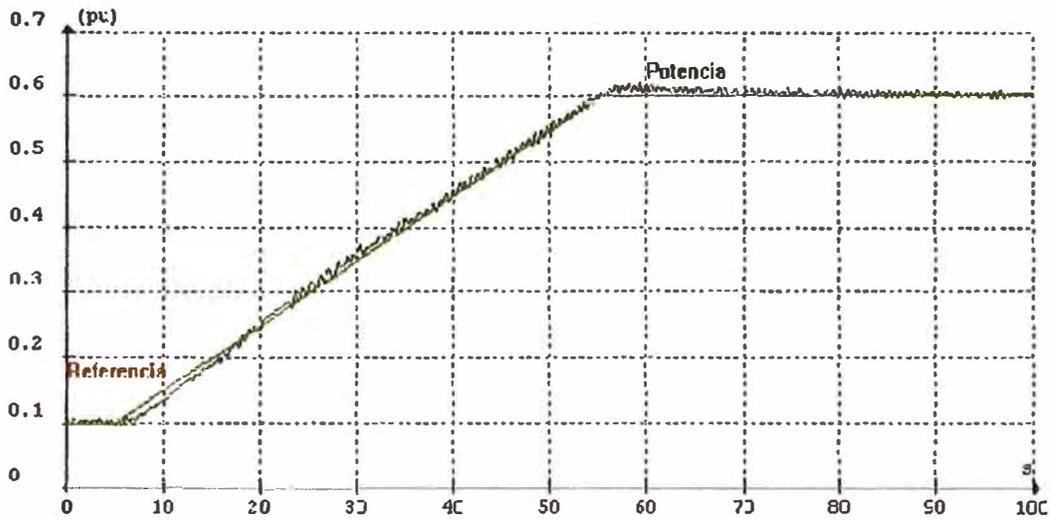
### 7.1 Ajustes de la Malla de Potencia

#### 7.1.1 Dinámica del control de Potencia – Respuesta al escalón



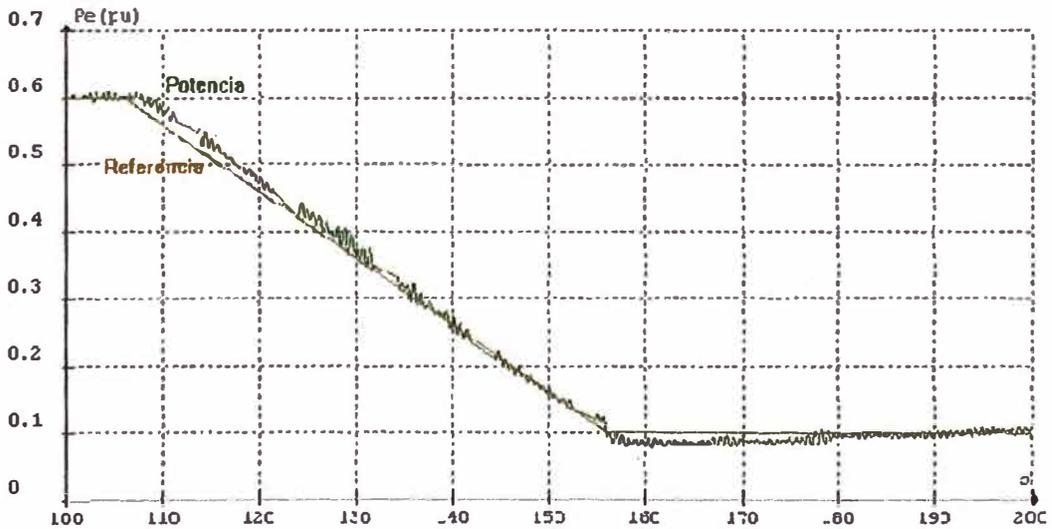
Escalón	0,1pu
Comentarios:	Se tiene una respuesta al escalón sin overshoot y con tiempo de estabilización de 3 segundos.

### 7.1.2 Dinámica del control de potencia – Toma de carga



<b>Ref. Inicial</b>	0,1 pu
<b>Ref. Final</b>	0,6 pu
<b>Comentarios:</b>	Toma de carga con tasa de referencia de potencia en 1%/s.

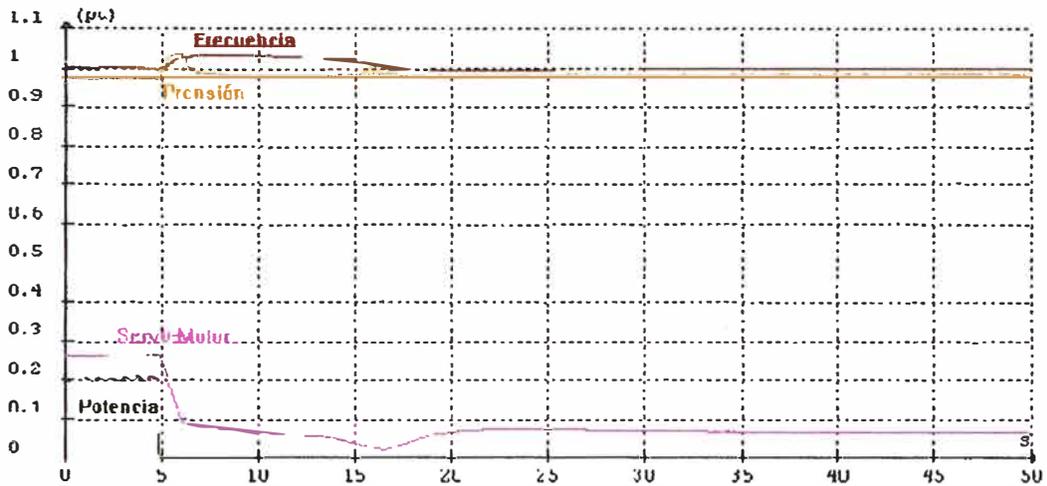
### 7.1.3 Dinámica del control de potencia – Retiro de carga



<b>Ref. Inicial</b>	0,6 pu
<b>Ref. Final</b>	0,1 pu
<b>Comentarios:</b>	Retiro de carga con tasa de referencia de potencia en 1%/s.

## 7.2 Rechazos de Carga

### 7.2.1 Rechazo de carga – 25% de potencia mecánica



<b>SV</b>	3,2%
<b>TRV</b>	25s
<b>TTC</b>	11,5s
<b>TCFL</b>	0,99s
<b>TMRV</b>	0,1s
<b>PC</b>	6,6%
<b>Comentarios:</b>	El regulador se muestra eficiente en todos los aspectos del rechazo.

#### Leyenda:

Sobrevelocidad (SV),

Tiempo para restablecimiento: (TRV),

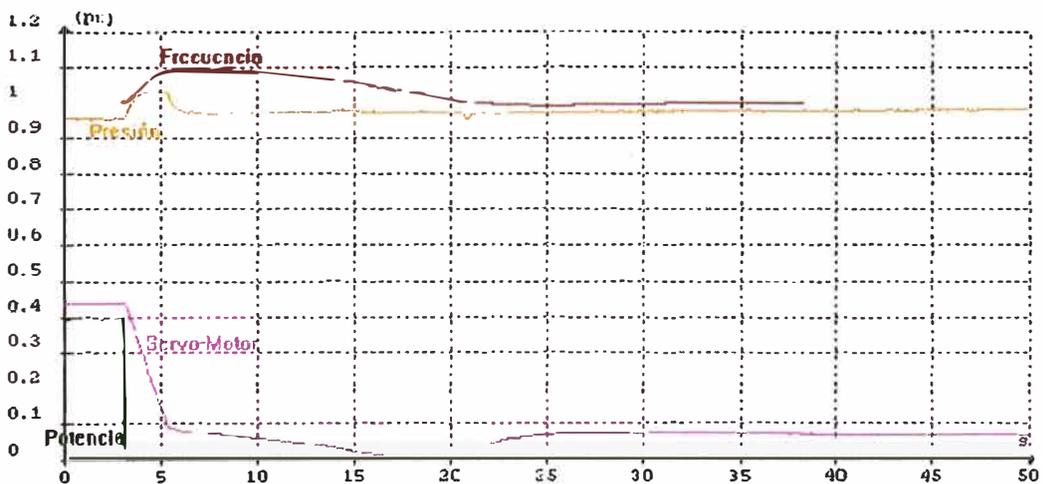
Tiempo total de cierre del servo-motor (TTC),

Tiempo de cierre del servo-motor en la faja linear (TCFL),

Tiempo muerto del Regulador de Velocidad (TMRV),

Sobrepresión del conducto (PC).

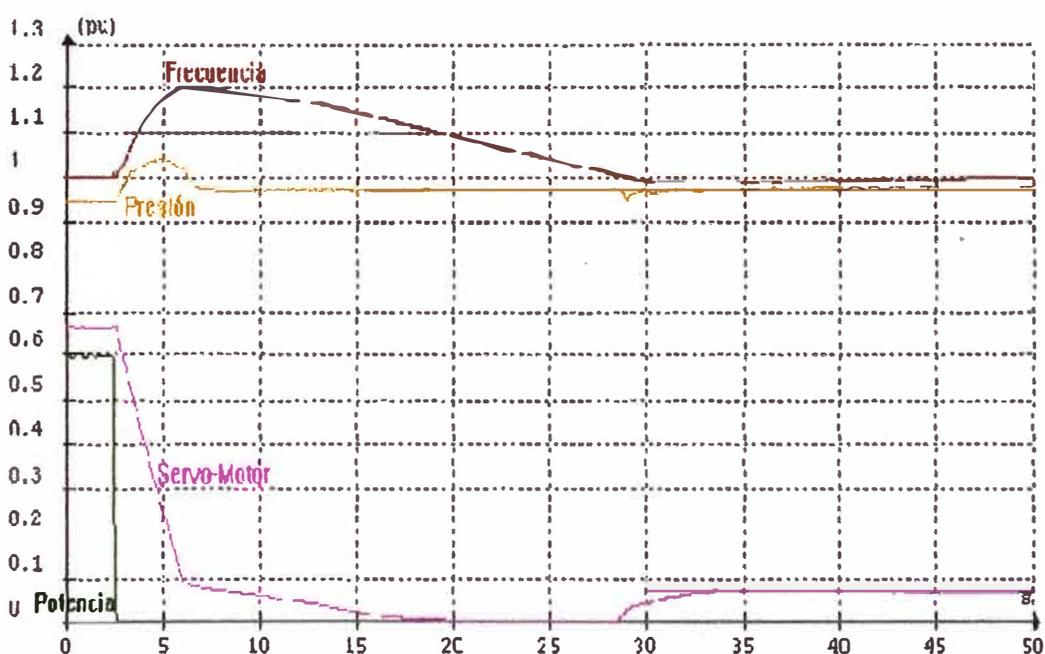
### 7.2.2 Rechazo de carga – 50% de potencia mecánica



SV	9,3%
TRV	35,2s
TTC	16,26s
TCFL	2,17s
TMRV	0,1s
PC	8,2%
Comentarios:	El regulador se muestra eficiente en todos los aspectos del rechazo.

**Leyenda:** Sobrevelocidad (SV), Tiempo para restablecimiento: (TRV), Tiempo total de cierre del servo-motor (TTC), Tiempo de Cierre del servo-motor en la faja lineal (TCFL), Tiempo muerto del Regulador de Velocidad (TMRV), Sobrepresión del conducto (PC).

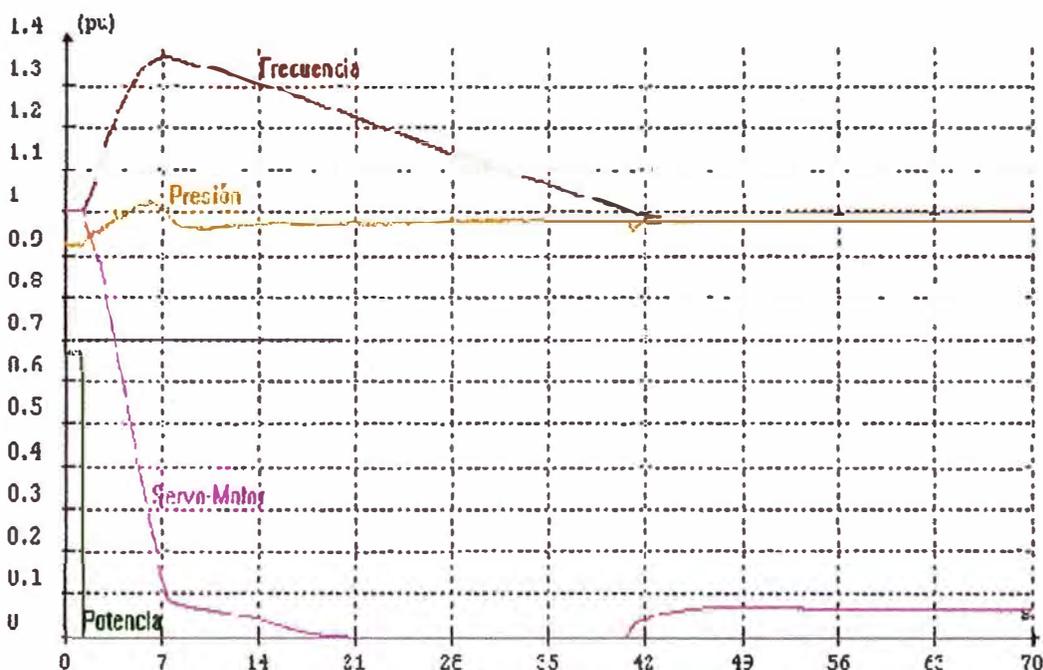
### 7.2.3 Rechazo de carga – 75%de potencia mecánica



SV	20%
TRV	44,2s
TTC	17s
TCFL	3,44s
TMRV	0,1s
PC	9,85%
Comentarios:	El regulador se muestra eficiente en todos los aspectos del rechazo.

**Leyenda:** Sobrevelocidad (SV), Tiempo para restablecimiento: (TRV), Tiempo total de cierre del servo-motor (TTC), Tiempo de Cierre del servo-motor en la faja lineal (TCFL), Tiempo muerto del Regulador de Velocidad (TMRV), Sobrepresión del conducto (PC).

### 7.2.5 Rechazo de carga – 100%del servo-moto



SV	40,4%
TRV	64,7s
TTC	23,8s
TCFL	6,02s
TMRV	0,1s
PC	10,9%
Comentarios:	El registro demuestra la eficacia en la acción del regulador en el momento del rechazo de carga, cuando comanda el cierre del distribuidor en máxima velocidad, de manera a atenuar la sobrevelocidad a valores inferiores al límite de trip, sin sobrepresión de la caja espiral causada por el cierre brusco del distribuidor.

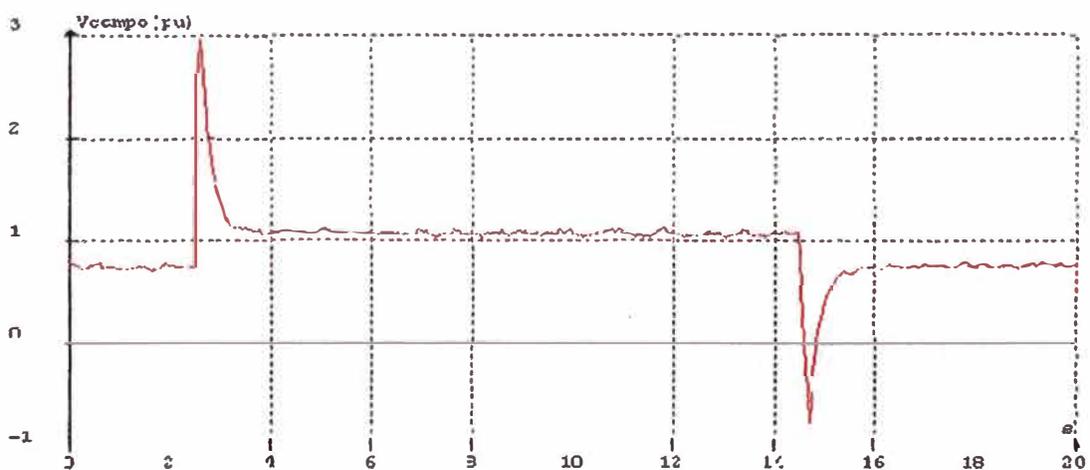
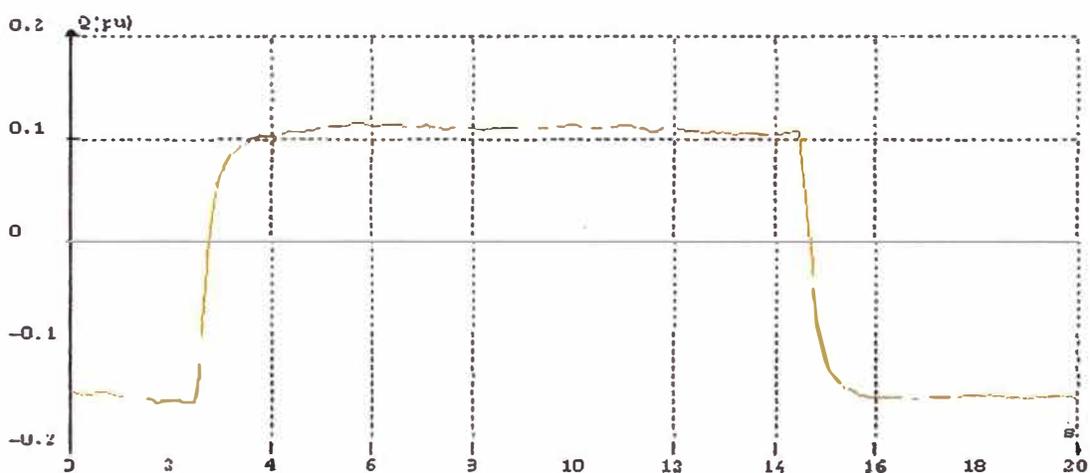
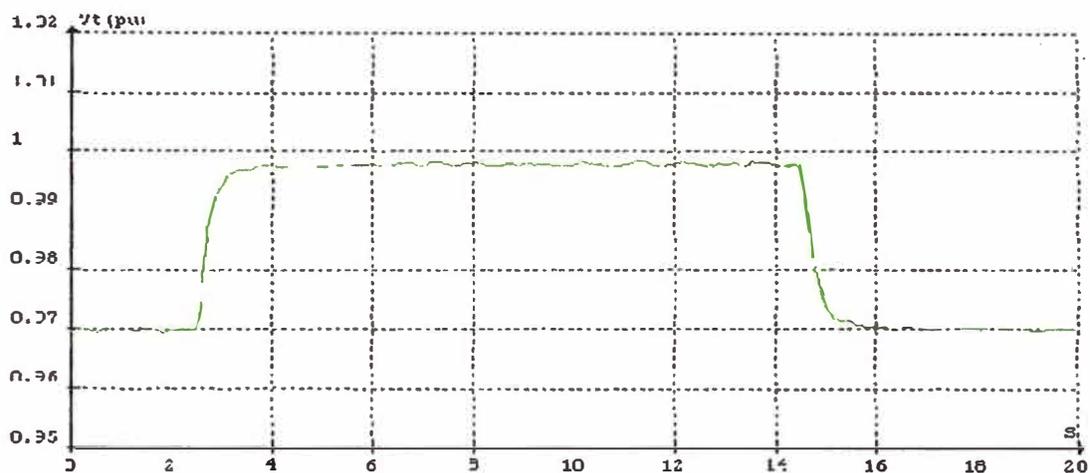
## 8. ENSAYOS EN CARGA – REGULADOR DE TENSIÓN

### 8.1 Ajustes de la Malla de Tensión en Carga

Con el grupo sincronizado, se efectuó el ajuste de la malla de control en carga. La metodología utilizada fue la aplicación de escalones en la referencia.

#### 8.1.1 Dinámica del control de tensión en carga - Respuesta al escalón

Con el grupo generador en  $V_t=0.97pu$ , se aplicó un escalón de  $0,03pu$  en la referencia de tensión. Los registros abajo muestran la respuesta al estímulo, siendo adquiridas las señales de Tensión de Salida, Tensión de Campo y Potencia Reactiva.

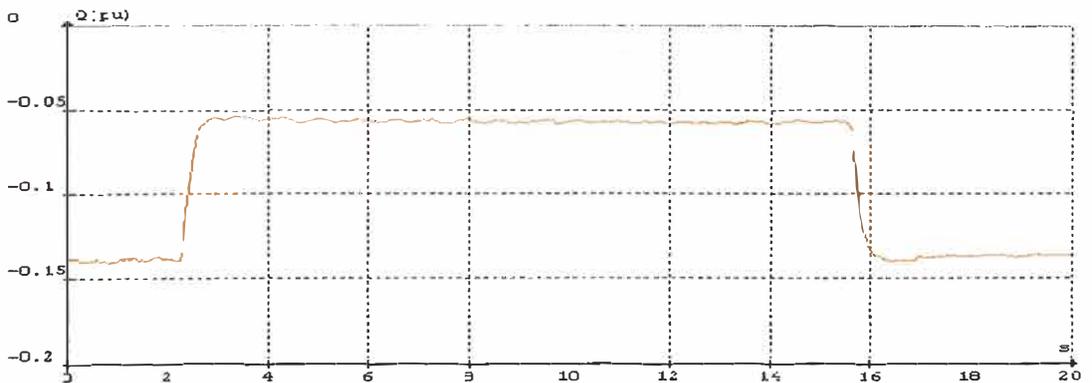
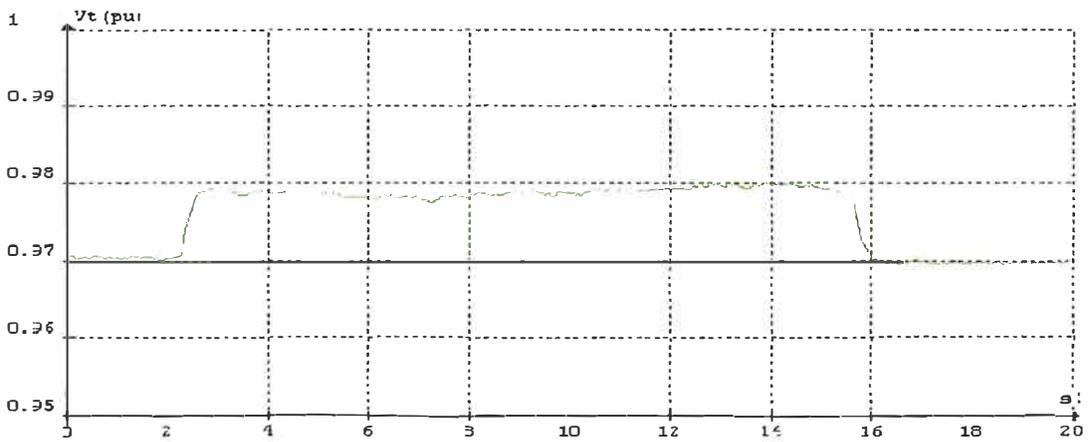
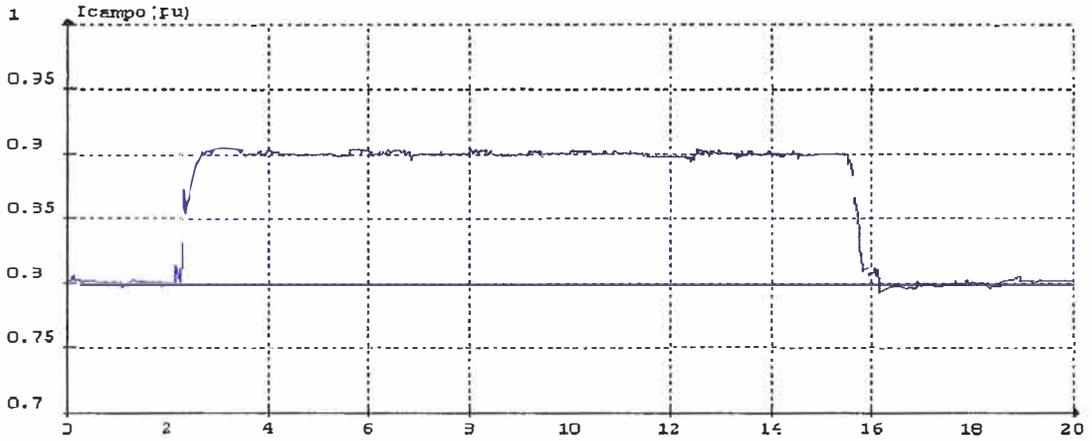


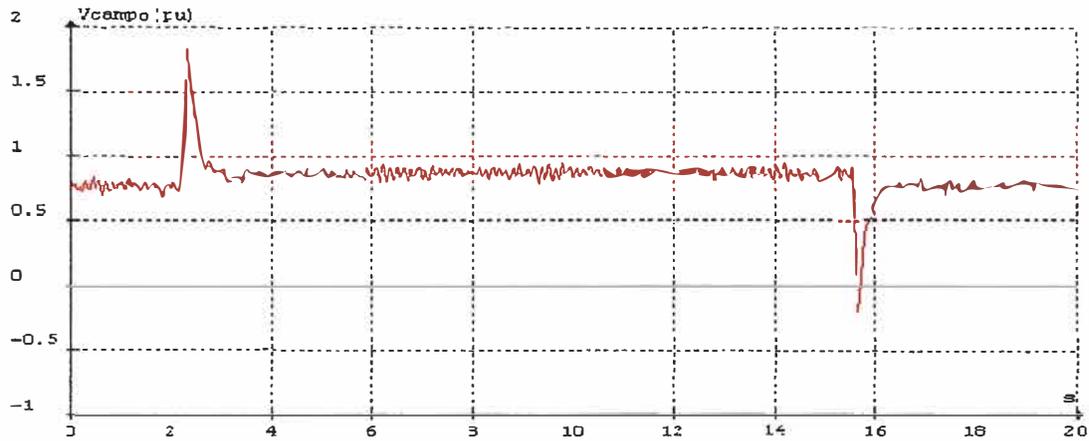
Escalón	0,03pu
Comentarios:	Las curvas demuestran la respuesta al estímulo, sin sobreseñal en la señal de tensión de salida

### 8.1.2 Dinámica del control de corriente en carga - Respuesta al escalón

La variable de control seleccionada es la corriente de campo ( $I_{fd}$ ). Este modo de control puede ser utilizado en la eventual pérdida de la información de tensión de salida de la unidad.

Abajo se registra un escalón de  $+0.2\text{pu}$  en la referencia de corriente de campo, siendo el punto de operación  $0.8\text{pu}$ .





<b>Escalón</b>	+0,2pu
<b>Comentarios:</b>	Se observa una respuesta rápida y estable de la corriente de campo con señal de tensión de salida también estable.

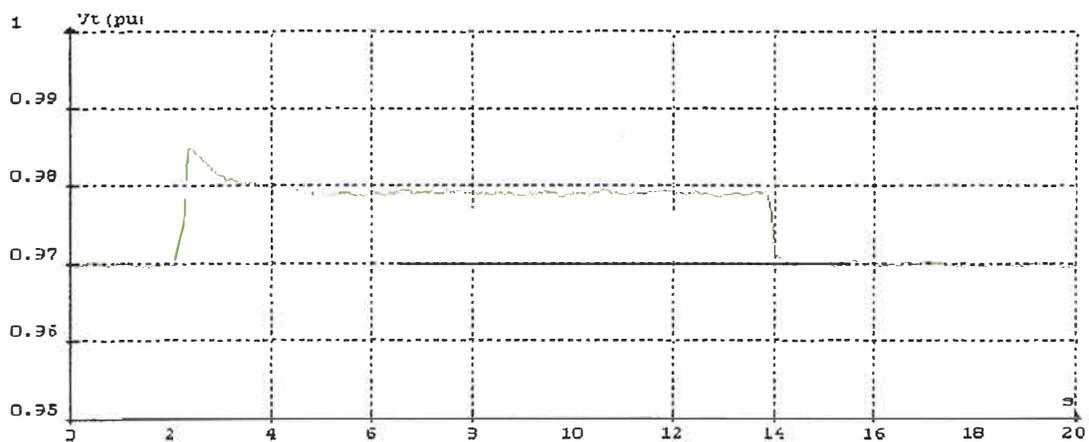
## 8.2 Limitador de Máxima Corriente de Campo en Carga

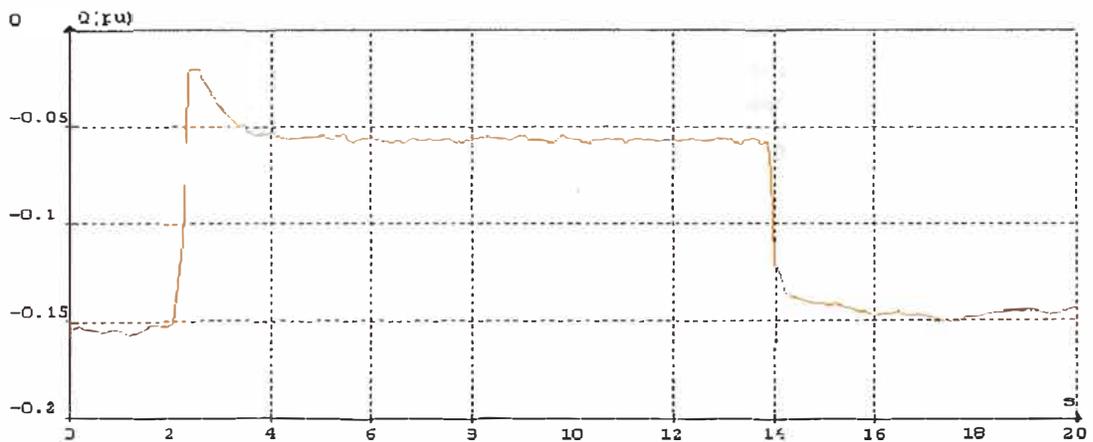
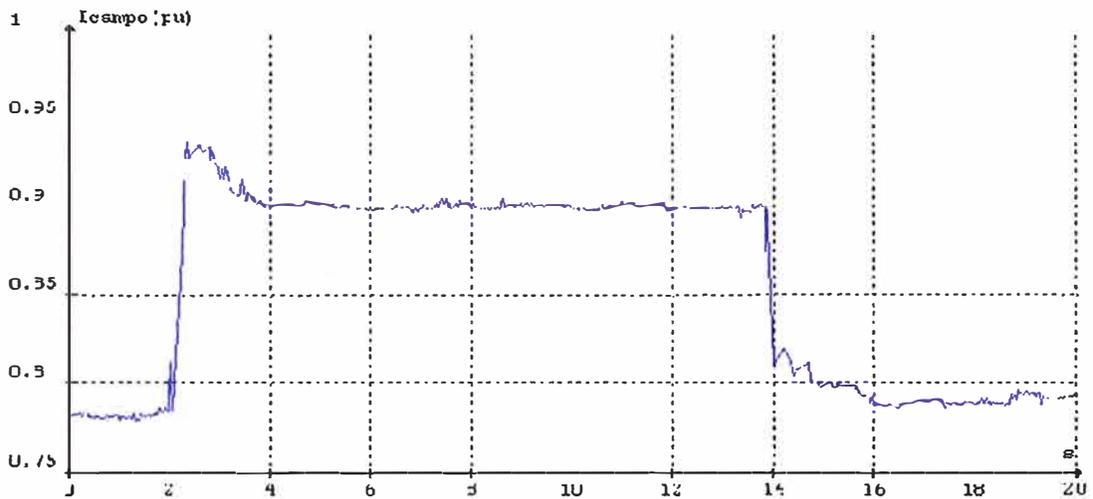
La malla de control del Sistema de Excitación contempla 2 niveles de ajustes para el limitador de máxima excitación, siendo en vacío y en carga.

La prueba de la rutina de limitación fue idéntica a la efectuada en el limitador de máxima excitación en vacío, o sea, aplicación de escalón en la referencia de tensión terminal conjugado con el ajuste del set point de limitación en carga para valores próximos al punto de operación.

Al final de los ensayos el limitador fue ajustado para su valor definitivo; 2,36pu (287,92Acc).

### 8.2.1 Actuación del limitador





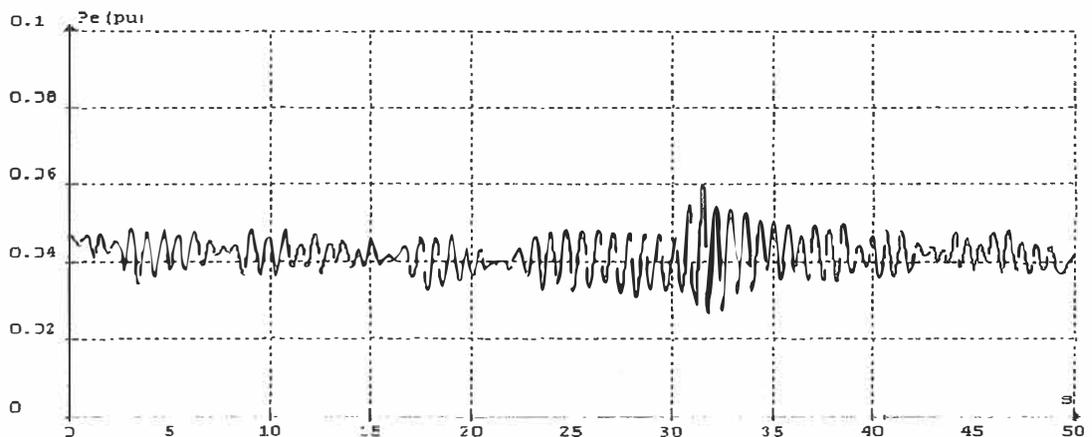
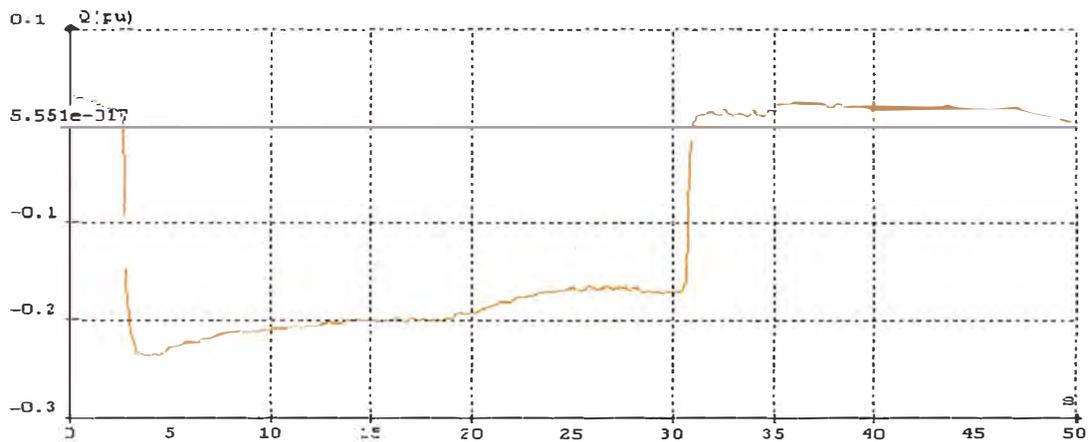
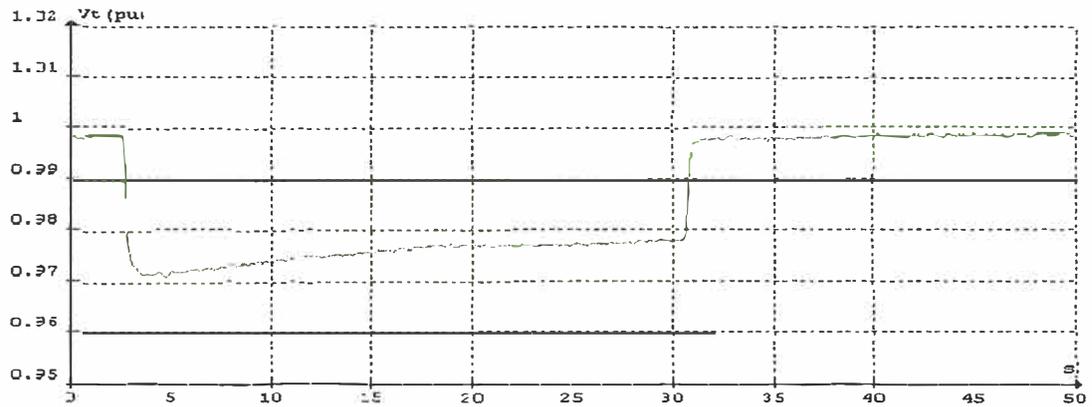
<b>Escalón</b>	0,03pu
<b>Ajuste Limitador</b>	0,9pu
<b>Comentarios:</b>	Se efectuó un escalón de 0,03pu en la referencia de tensión de salida, siendo ajustado el set point de limitación para 0,9pu. Se observa una limitación efectiva y rápida, alrededor de 2 segundos y sin pérdida del punto de operación.

### 8.3 Limitador de Máxima Corriente del Estator

Este ensayo valida la actuación correcta del limitador de máxima corriente del estator garantizando la protección del estator de la máquina, manteniendo la corriente del estator dentro de los límites admitidos por el generador.

Al final de los ensayos el limitador fue ajustado para su valor definitivo: 1,0pu (1422,46A)

### 8.3.1 Actuación del limitador de sub-excitación



<b>Escalón</b>	-0,03pu
<b>Ajuste Limitador</b>	0,175pu
<b>Comentarios:</b>	Analizando las curvas presentadas arriba podemos verificar la actuación estable y precisa del limitador de máxima corriente del estator, con escalón negativo aplicado, actuando con la máquina sub-excitada.

## 8.4 Limitador de Mínima Excitación

El objetivo de este limitador es el de prevenir la pérdida del sincronismo de la unidad generadora principalmente en variaciones impuestas por el sistema. En estos casos, o a través de mandos voluntarios para disminuir la excitación, el limitador de mínima excitación garantiza que el punto de operación del generador quede dentro de los valores preestablecidos por la curva de capacidad y la protección de la unidad (relé 40).

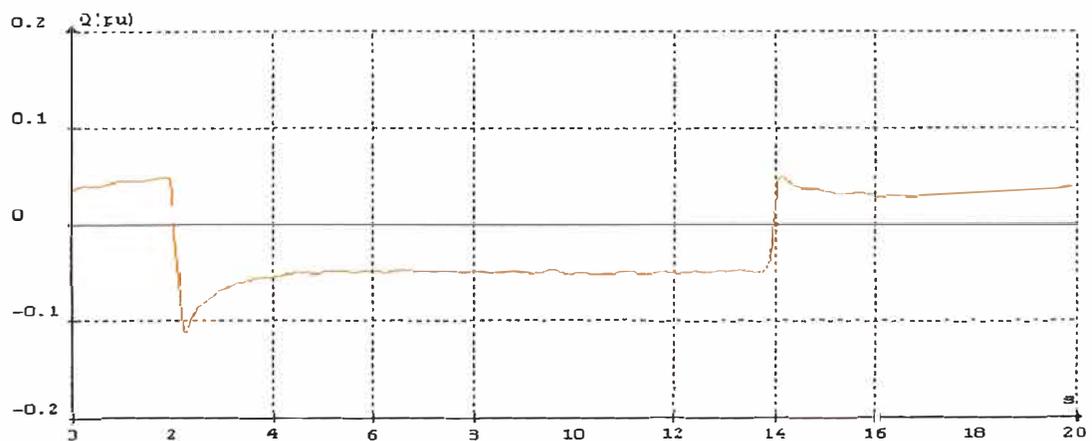
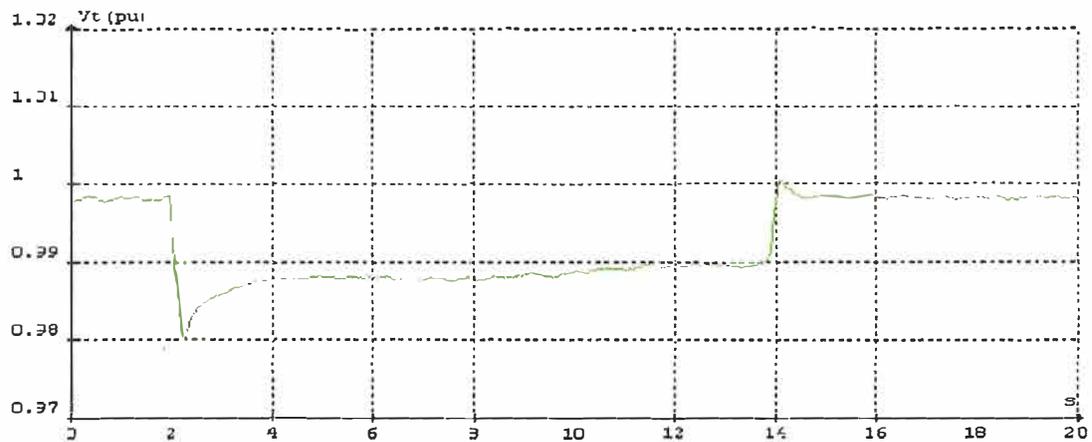
Abajo, se muestran los registros relativos a un escalón de  $-0,03$  pu en la referencia de tensión, estando el limitador de mínima excitación ajustado para limitar de acuerdo con la Ecuación (4.1), con los siguientes parámetros:  $K_{vt} = 1$  pu;  $K_{ir} = 0$  pu y  $K_{ix} = 20$  pu.

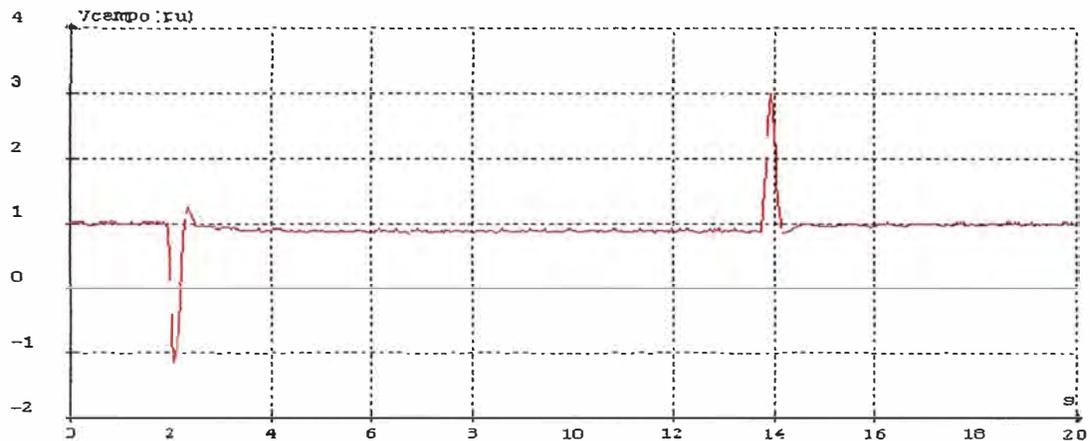
$$-K_{vt} \cdot V_t + K_{ir} \cdot I_r + K_{ix} \cdot I_x = 0 \quad \text{Ecuación (1)}$$

Al final de los ensayos el limitador fue ajustado para su valor definitivo:

LSE:  $K_{vt} = 1$  pu;  $K_{ir} = 0$  pu y  $K_{ix} = 2,833$ pu;

### 8.4.1 Actuación del limitador





<b>Escalón</b>	-0,03pu
<b>Ajuste Limitador</b>	$K_{vt}=1\text{ pu}$ $K_{Ir} = 0\text{ pu}$ $K_{Ix} = 20\text{ pu}$
<b>Comentarios:</b>	De acuerdo con las curvas de arriba, se pueden observar los valores de los parámetros en cuestión, confirmando la Ecuación (1). $Q = -0,05\text{ pu}$ , $V_t = 0,99\text{ pu}$ Se observa que la curva de tensión de salida alcanza su límite de mínima excitación de modo rápido.

### 8.5 Estabilizador de Sistemas de Potencia

El objetivo del Estabilizador de Sistema de Potencia es amortiguar oscilaciones electromecánicas. Por tanto se utiliza la señal derivada de la integral de la potencia acelerante, la cual es procesada y aplicada al sumador del regulador de tensión.

El Estabilizador de Sistema de Potencia posee funciones parametrizables de filtro rastreador de rampa, para evitar variaciones de la tensión y potencia reactiva ante variaciones de potencia mecánica y de oscilaciones de frecuencia eléctrica del sistema (modo lento de la regulación de velocidad); Reset no lineal para garantizar contribuciones al amortiguamiento en grandes disturbios evitando desconectar el generador por la acción de la protección 40;

Además posee protecciones inteligentes para desactivar y reactivar el estabilizador sin perjudicar la operación del generador y, aún, compensación de la reactancia sincrónica de eje en cuadratura ( $x_q$ ) del generador.

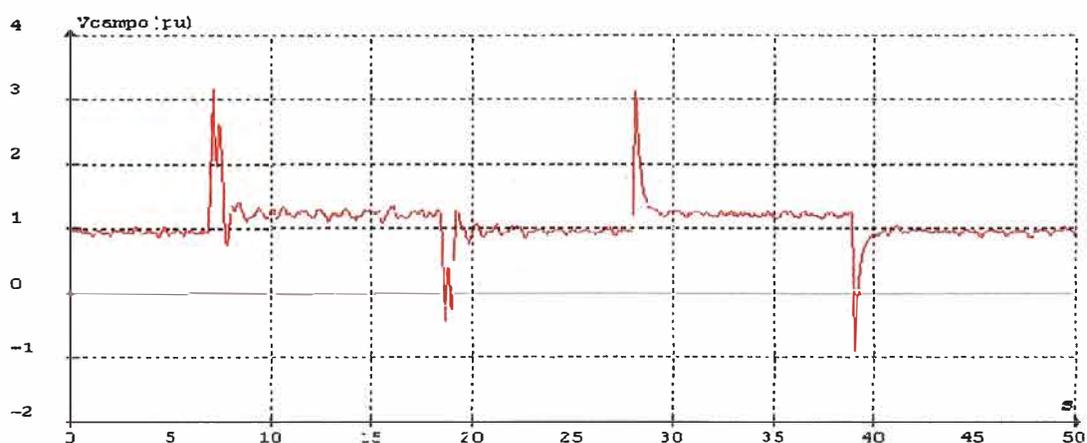
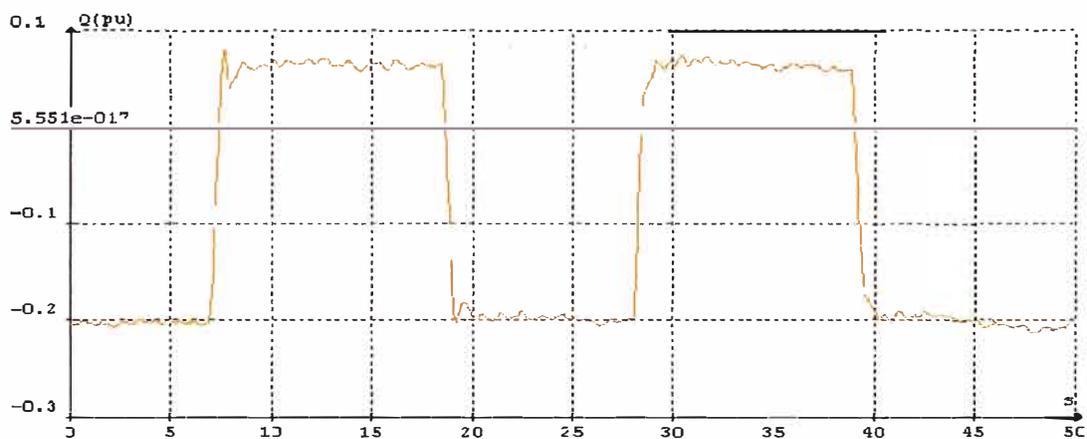
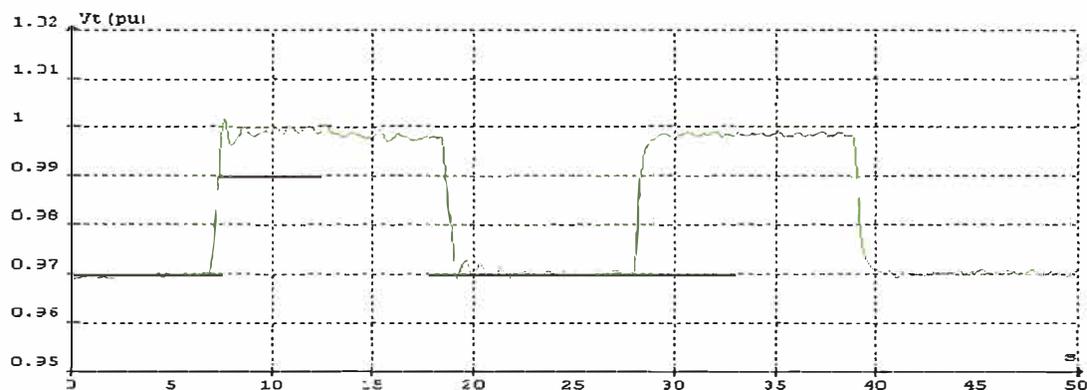
Para ajustar el Estabilizador de Sistema de Potencia, se aplica un escalón en la referencia de tensión del regulador vigilando el comportamiento del transitorio causado en la potencia eléctrica del generador. Se actúa sobre los compensadores de avance y ganancia, para alinearlos desvíos de tensión con los desvíos de frecuencia, de manera que

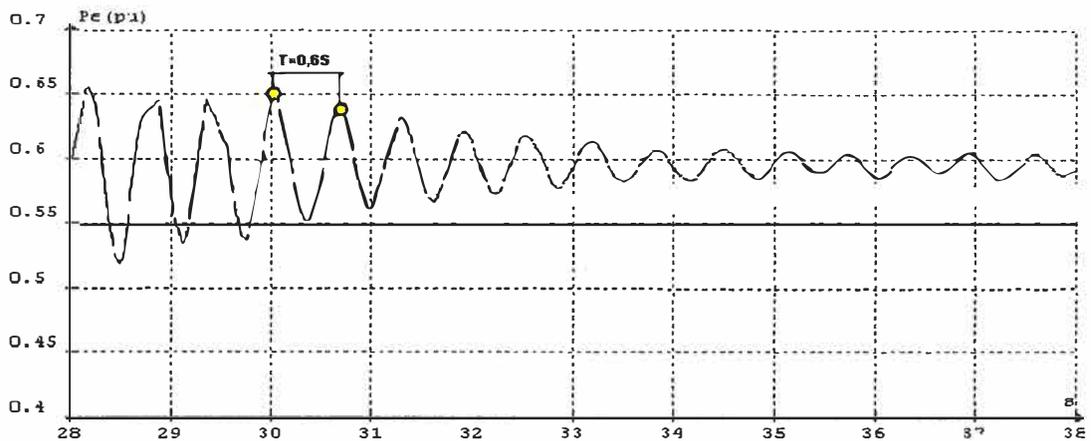
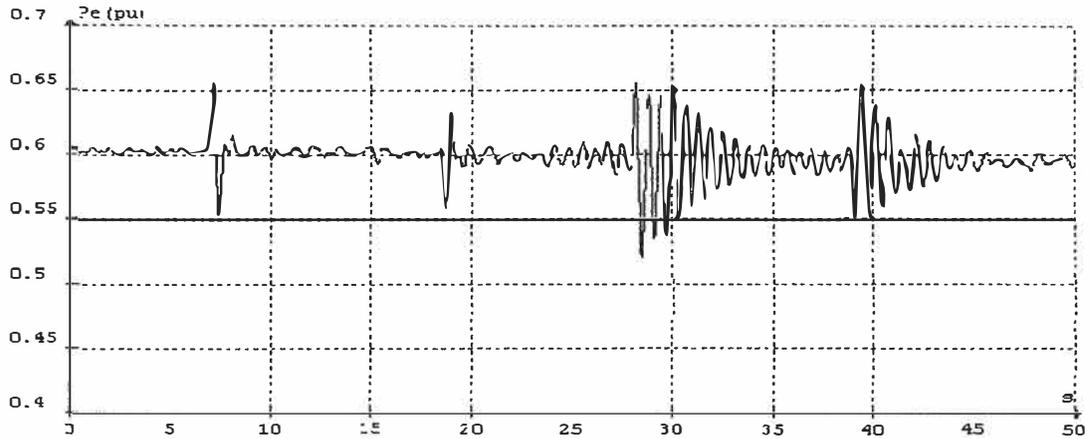
genere amortiguamiento de las oscilaciones electromecánicas.

Los registros abajo demuestran lo expuesto arriba: se aplicó un escalón en la referencia del regulador de tensión con el Estabilizador de Sistema de Potencia, y sin ESP.

Se puede observar la actuación efectiva de la función.

### 8.5.1 Escalón en la referencia de tensión ESP ( $P = 10,2 \text{ MW}$ )





<b>Escalón</b>	0,03pu
<b>Comentarios:</b>	<p>En el primer instante, con escalón aplicado y desaplicado, se puede observar la actuación del estabilizador de potencia en la tensión de campo, lo cual compensa la oscilación electromecánica a través de la tensión de salida. En el segundo instante, con escalón aplicado y desaplicado, se puede observar la estabilidad de todas las señales del regulador de tensión cuando la malla del estabilizador de potencia no es utilizada, y de las oscilaciones de potencia eléctrica cuando es sometida al escalón de tensión de salida. La oscilación de la señal de potencia eléctrica compensada por el Estabilizador fue alrededor de 1,67Hz, como se indica en la figura de arriba, que caracteriza oscilaciones entre máquinas de una misma central.</p>

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEEE WORKING GROUP ON COMPUTER MODELLING OF EXCITATION SYSTEMS, Excitation System Models for Power System Stability Studies, IEEE Transactions on PAS, vol 100, no 2, 494-509, February 1981.
- [2] PELLY, P.R., Thyristor Phase Controlled Converters and Cyclo Converters: Operation, Control and Performance, 1a ed., John Wiley & Sons, New York, 1971.
- [3] RUBENSTEIN, A.S. & WALKLEY, W.W., Control of Reactive KVA with Modern Amplidyne Voltage Regulators, Transactions of AIEE, vol 76, Parte III, 961-970, December 1957.
- [4] DE MELLO, F.P.; HANNETT, L.H.; UNDRIL, J.M., Practical Approaches to Supplementary Stabilizing from Accelerating Power, IEEE Transactions on PAS, vol 97, no 5, 1515-1522, 1978.
- [5] KEAY, F.W. & SOUTH, W.H., Design of a Power System Stabilizer Sensing Frequency Deviation, IEEE Transactions on PAS, vol 90, no 2, 707-713, 1971.
- [6] LEE, D.C.; BEAULIEU, R.E.; SERVICE, J.R., A Power System Stabilizer Using Speed and Electric Power Inputs: Design and Field Experience, IEEE Transactions on PAS, vol 100, no 9, 4151-4157, 1981.
- [7] KUNDUR, P., Development and Application of Power System Stabilizers at Ontario Hydro, I SEPOPE, Rio de Janeiro, 1987.
- [8] LARSEN, E.V. & SWAMM, D.A., Applying Power System Stabilizers: Parts I, II, III, IEEE Transactions on PAS, vol 100, no 6, 3017-3046, Jun 1981.
- [9] LEE, D.C.; BEAULIEU, R.E.; SERVICE, J.R., A Power System Stabilizer Using Speed and Electric Power Inputs: Design and Field Experience, IEEE Transactions on PAS, vol 100, no 9, 4151-4157, 1981.
- [10] NAI - ELETROBRAS, Nacionalização de Sistemas de Excitação Estática, NAI-ELETROBRAS, GT-5, 1984.
- [11] ZENI Jr., N., Controle da Excitação de Geradores de Usinas Hidrelétricas: Modelagem, Identificação, Ajustes e Ensaios de Campo, Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, Outubro de 1987.
- [12] VU, H., AGEE, J.C., Comparison of Power System Stabilizers for Damping Local

Mode Oscillations, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol 8, no 3, 533-538, Setembro de 1993.

- [13] IEC – 308 International Electrotechnical Commission, que trata de requisitos de ensayos y desempeño.
- [14] IEC – 255 que trata de aislamiento, programabilidad y compatibilidad electromagnética;
- [15] IEEE - 125 Institute of Electrical and Electronics Engineers, que trata, principalmente de aspectos de dimensionamiento y definiciones.
- [16] CEI-IEC – 61362-1998 – Guía para la especificación de los sistemas de regulación de las turbinas hidráulicas.