



**Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica**

**SISTEMAS DIGITALES DE CONTROL DE CARGA Y  
REGULACIÓN DE VELOCIDAD (DIGIPID), PARA LA  
ESTABILIDAD DE FRECUENCIA EN PEQUEÑAS  
CENTRALES HIDROELÉCTRICAS**

**Herson David Rivera Torres**

**Asesorado por el Ing. Carlos Francisco Gressi López**

**Guatemala, septiembre de 2006**

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**SISTEMAS DIGITALES DE CONTROL DE CARGA Y  
REGULACIÓN DE VELOCIDAD (DIGIPID), PARA LA  
ESTABILIDAD DE FRECUENCIA EN PEQUEÑAS  
CENTRALES HIDROELÉCTRICAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN  
PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA POR

**HERSON DAVID RIVERA TORRES**  
**ASESORADO POR EL ING. CARLOS FRANCISCO GRESSI LÓPEZ**

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2006



## UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



### FACULTAD DE INGENIERÍA

#### NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

<b>DECANO:</b>	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
<b>VOCAL I:</b>	Inga. Glenda Patricia García Soria
<b>VOCAL II:</b>	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
<b>VOCAL III:</b>	Ing. Julio David Galicia Celada
<b>VOCAL IV:</b>	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
<b>VOCAL V:</b>	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
<b>SECRETARIA:</b>	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

#### TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

<b>DECANO:</b>	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
<b>EXAMINADOR:</b>	Ing. Armando Gálvez Castillo
<b>EXAMINADOR:</b>	Ing. Marvin Marino Hernández Fernandez
<b>EXAMINADOR:</b>	Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
<b>SECRETARIO:</b>	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **SISTEMAS DIGITALES DE CONTROL DE CARGA Y REGULACIÓN DE VELOCIDAD (DIGIPID), PARA LA ESTABILIDAD DE FRECUENCIA EN PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 28 de marzo de 2005.

**Herson David Rivera Torres**



## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** A ti Padre Santo porque tú eres el dador de la sabiduría y la inteligencia y pude ver tu amor durante todo este tiempo, este título es para ti.
- Mis padres** Moisés, por la oportunidad de estudio y el apoyo que brindó. Aminta, por sus cuidados, atenciones y por instruirme en el camino de la verdad.
- Mis Hermanos** Omar, por ser mi amigo y estar siempre para mí en el momento en el que te necesité. Gressia, por el cariño y apoyo brindado.
- Mis Amigos** Por todo el apoyo que percibí de ustedes, porque siempre me han brindado su cariño incondicional.
- Mis compañeros universitarios** Por todo el tiempo y las experiencias que compartimos en las aulas de la universidad.



## **AGRADECIMIENTOS**

- Ing. José Carlos Orellana**      Por su disposición y apoyo incondicional durante el desarrollo de este trabajo de graduación.
- Ing. Francisco Gressi,**      por su disposición en el asesoramiento de este trabajo de graduación y por contribuir en mi formación profesional.
- Ing. Luís Quiñónez,**      por la ayuda brindada durante el desarrollo de éste y otros trabajos.
- Benigno Siliézar Ruiz,**      por el apoyo brindado para la realización de este trabajo de graduación.

# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	VII
<b>GLOSARIO</b>	XI
<b>RESUMEN</b>	XV
<b>OBJETIVOS</b>	XVII
<b>INTRODUCCIÓN</b>	XIX
<b>1. GENERALIDADES</b>	<b>1</b>
1.1 Función de la regulación de carga y velocidad	1
1.2 Sistemas de regulación de velocidad tradicionales	2
1.2.1 Sistema mecánico	2
1.2.1.1 Dispositivo sensible a la velocidad	2
1.2.1.2 Elemento de potencia	3
1.2.1.3 Dispositivo compensador	3
1.2.2 Sistema eléctrico	5
1.2.3 Sistema electrónico	7
1.3 Principios de los sistemas digitales de control de carga y regulación de velocidad DIGIPID	8
1.4 Estabilidad de frecuencia	11
<b>2. MODELADO DEL SISTEMA DIGITAL DE CONTROL DE CARGA Y REGULACIÓN DE VELOCIDAD (DIGIPID)</b>	<b>15</b>
2.1 Organización del modelo matemático	16
2.2 Golpe de ariete en el conducto	17
2.3 Turbina hidráulica	18
2.4 Servomotor	20
2.5 Regulador de velocidad	23

2.5.1	Regulación dinámica	23
2.5.2	Regulación estática	24
2.6	La red eléctrica	25
2.7	Determinación de los parámetros PID	26
<b>3.</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DIGITAL DE REGULACIÓN DE VELOCIDAD (DIGIPID 1000)</b>	<b>29</b>
3.1	Presentación global del sistema	29
3.1.1	Especificaciones generales del DIGIPID 1000	30
3.1.1.1	Especificaciones de funcionamiento	30
3.1.1.2	Especificaciones de utilización	31
3.1.2	Estructura del DIGIPID 1000	31
3.1.2.1	Regulador DIGIPID 1000	31
3.1.2.2	Caja del DIGIPID 1000	31
3.2	Características generales del DIGIPID 1000	34
3.2.1	Alimentación	34
3.2.2	Salida de potencia	34
3.2.3	Entradas/salidas de bajo nivel	34
3.2.4	Características de uso	35
3.2.5	Normas	35
3.2.6	Visualización de la información	35
3.2.7	Herramientas y conexión informática	36
3.2.8	Retroalimentación	36
3.2.9	Dimensiones físicas principales	36
3.3	Características funcionales	38
3.3.1	Bucles de regulación	38
3.3.2	Medición de frecuencia	38
3.3.3	Regulación de velocidad	39
3.3.4	Regulación de posición	40

3.3.5	Consignador	40
3.3.6	Limitación de apertura del cilindro del distribuidor	41
3.3.6.1	Limitación interna	41
3.3.6.2	Limitación regulable	41
<b>4.</b>	<b>FUNCIONES DE OPERACIÓN</b>	<b>43</b>
4.1	Principio general	43
4.2	Secuencia estándar o secuencia tipo	45
4.2.1	Configuración del regulador antes del arranque del grupo	45
4.2.2	Arranque automático normal del grupo	45
4.2.2.1	Preparación	45
4.2.2.2	Aceleración	47
4.2.2.3	Regulación	48
4.2.3	Arranque automático por retroalimentación de voltaje o en funcionamiento isla	49
4.2.3.1	Preparación	50
4.2.3.2	Condición de arranque	50
4.2.4	Sincronización	50
4.2.5	Acoplamiento	51
4.2.6	Toma de carga	52
4.2.6.1	Modalidad manual	53
4.2.6.2	Modalidad automática	54
4.2.7	Apertura del disyuntor	54
4.2.8	Paro del grupo	55
4.2.8.1	Paro normal	55
4.2.8.2	Paro de emergencia por fallo eléctrico	56
4.2.8.3	Paro de emergencia por fallo mecánico	56
4.3	Histogramas de operación (bitácoras)	56

4.4	Conjugación	57
4.5	Parámetros para el usuario	58
<b>5.</b>	<b>FUNCIONAMIENTO Y PUESTA EN SERVICIO DEL DIGIPID 1000</b>	
	<b>EN LA RED</b>	<b>61</b>
5.1	Datos de la turbina hidráulica	61
5.2	Datos del generador síncrono	62
5.3	Principales parámetros de programación	62
5.3.1	Ajuste de los parámetros	62
5.3.2	Hipótesis de cálculo	63
5.3.3	Cálculo del valor de los principales parámetros	63
5.3.4	Potenciómetro de regulación “global” de estabilidad	66
5.4	Puesta en marcha del regulador DIGIPID 1000	67
5.4.1	Verificaciones	67
5.4.1.1	Verificaciones previas	67
5.4.1.2	Verificación del cableado	67
5.4.1.3	Verificación de la alimentación	68
5.4.1.4	Verificación de la configuración	68
5.4.1.5	Verificación del captador de posición	68
5.4.2	Puesta en tensión del regulador	68
5.4.3	Corte de la alimentación del regulador	69
5.4.4	Seguridad del control del accionador	70
5.4.5	Seguridad del DIGIPID 1000 por perro guardia	70
5.5	Ajustes previos al arranque del grupo	71
5.5.1	Ajuste de la señal captadora de posición del Servomotor	71
5.5.1.1	Función de los potenciómetros P01 y P02	72
5.5.2	Ajuste del tope de cierre	73
5.5.3	Ajuste del tope de apertura	74

5.6	Pruebas a la unidad de generación gobernada por el DIGIPID 1000	75
5.6.1	Pruebas comunes	75
5.6.1.1	Prueba con máquina parada	75
5.6.1.2	Pruebas con la unidad en marcha	76
5.6.2	Pruebas específicas	76
5.6.2.1	Funcionamiento en posicionador	77
5.6.2.2	Preposicionamiento del servomotor (opcional)	77
5.6.2.3	Prueba de sobre velocidad	78
5.6.2.4	Operación de secado del generador	80
5.7	Operación de la unidad en régimen permanente	81
5.7.1	Gráficos de frecuencia y potencia activa de las unidades de generación	81
5.8	Operación de la unidad en régimen transitorio	84
5.8.1	Gráficos de frecuencia y potencia activa de las unidades de generación	85
<b>6.</b>	<b>PROGRAMAS DE MANTENIMIENTO</b>	<b>87</b>
6.1	Normas de seguridad	87
6.2	Mantenimiento preventivo	87
6.3	Mantenimiento correctivo	89
6.3.1	Tipos de fallos	89
6.3.1.1	Fallos mayores	89
6.3.1.2	Fallos menores	89
6.3.2	Listado de fallos	91
6.3.2.1	Fallo unidad de cálculo (mayor)	91
6.3.2.2	Fallo alimentación (mayor)	91

6.3.2.3	Fallo tacómetro (mayor/menor)	92
6.3.2.4	Fallo captador servomotor (mayor)	92
6.3.2.5	Memoria EEPROM virgen	93
6.3.2.6	Fallo consigna analógica 4	93
6.3.2.7	Fallo consigna analógica 1 (menor)	94
6.3.2.8	Fallo consigna analógica 2 (mayor/menor)	94
6.3.2.9	Detección de velocidad (mayor)	95
6.3.2.10	Sobrecarga térmica (menor)	95
6.3.2.11	Fallo memoria parámetro (mayor)	95
6.3.2.12	Fallo seguimiento servomotor (menor)	95
6.3.2.13	Fallo del <i>watch dog</i> (mayor)	96
6.3.2.14	Fallo escritura EEPROM (mayor)	96
6.3.2.15	Ausencia señal de velocidad (fallo mayor/menor)	96
6.3.2.16	Fallo captador EANA 5 (menor)	97
6.3.2.17	Ausencia tacómetro auxiliar (fallo mayor/menor)	97
6.3.3	Soluciones para las anomalías más comunes	97
6.3.4	Cancelación de fallos	100
6.3.4.1	Fallos mayores	100
6.3.4.2	Fallos menores	101
6.4	Recambio del DIGIPID 1000	101
6.4.1	Desmontaje	101
6.4.2	Montaje	102
	<b>CONCLUSIONES</b>	105
	<b>RECOMENDACIONES</b>	107
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	109

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1	Sistema regulador de velocidad mecánico – hidráulico	4
2	Diagrama esquemático del sistema regulador eléctrico - hidráulico	6
3	Esquema del funcionamiento del DIGIPID	10
4	Curva de velocidad – potencia para un motor primario típico	13
5	Curva resultante de frecuencia – potencia del generador	14
6	Esquema del modelo matemático del DIGIPID 1000	17
7	Curvas características o colinas de rendimiento de las turbinas hidráulicas	20
8	Esquema del servomotor controlado con un accionador ED	21
9	Diagrama de bloques del servomotor controlado con un accionador ED	22
10	Diagrama de bloques del DIGIPID 1000	23
11	El DIGIPID 1000 y su entorno	30
12	Vista en perspectiva de la caja del DIGIPID 1000	32
13	Parte delantera del DIGIPID 1000	33
14	Dimensiones del DIGIPID 1000	37
15	Funcionamiento del DIGIPID 1000 en su cofre	43
16	Funcionamiento del DIGIPID 1000	44
17	Curva de aceleración en tiempo mínimo	47
18	Curva de acoplamiento y modalidades del consignador de carga	53
19	Régimen permanente, gráfico de frecuencia contra tiempo	82

20	Régimen permanente, gráfico de velocidad de rotación contra tiempo	83
21	Régimen permanente, potencia activa contra tiempo	83
22	Régimen permanente, posición de distribuidor contra tiempo	84
23	Régimen transitorio, gráfico de frecuencia contra tiempo	86
24	Régimen transitorio, gráfico de potencia activa contra tiempo	86
25	Régimen transitorio, gráfico de posición del distribuidor contra tiempo	87

## **TABLAS**

I.	Relaciones entre P2, LOFAV y el limitador de apertura	49
II.	Parámetros de la consigna carga/frecuencia	58
III.	Parámetros del limitador de apertura	58
IV.	Parámetros de la regulación de velocidad (disyuntor cerrado) juego S1: red infinita – juego S3: red aislada	59
V.	Parámetros de la regulación de velocidad (disyuntor abierto)	59
VI.	Parámetros de la regulación de potencia	59
VII.	Parámetros del funcionamiento del posicionador	60
VIII.	Parámetros del sistema	60
IX.	Parámetros de medición de la velocidad	60
X.	Parámetros PID de regulación	66
XI.	Listado de códigos y mensajes de errores visualizables en el visualizador local o por STATUS	92

XII. Anomalías – soluciones que se pueden presentar en el DIGIPID 1000	100
XIII. Anomalías – soluciones que se pueden presentar en el DIGIPID 1000 (continuación)	101
XIV. Anomalías – soluciones que se pueden presentar en el DIGIPID 1000 (continuación)	102



## GLOSARIO

<b>Alternador</b>	Generador de electricidad que transforma la energía mecánica de rotación en energía eléctrica de corriente alterna.
<b>Amortiguador</b>	Es un dispositivo que absorbe energía, utilizado normalmente para disminuir las oscilaciones no deseadas de un movimiento periódico o para absorber energía proveniente de golpes o impactos.
<b>Disyuntor</b>	Interruptor automático por corriente diferencial. Se emplea como dispositivo de protección contra los contactos indirectos, asociado a la puesta a tierra de las masas.
<b>Estatismo permanente</b>	Se define como la variación de velocidad entre una condición de plena carga y vacío, para el mismo ajuste del regulador de carga. Si existe una relación lineal entre las variaciones de frecuencia y la potencia, resultará este estatismo igual al efectivo en la banda de regulación.
<b>Estatismo transitorio</b>	Se define como la variación de velocidad entre una condición de plena carga y vacío al momento de cambiar el ajuste del regulador de carga.

**Golpe de ariete**

Se define como una fuerza dinámica adicional que se súper impone a la presión estática normal que existe en una tubería de conducción. Esta fuerza dinámica es el resultado de una transformación súbita de la energía cinética producida por la masa móvil del agua, en energía de presión. Esta transformación se produce generalmente por el cierre de algún artefacto instalado en la terminal de la línea, válvula, bomba, etc., creándose de inmediato una onda de presión que tiene cierta velocidad y que oscila de uno a otro extremo de la tubería de conducción.

**Golpe de ariete de masa**

Es el golpe de ariete que toma en cuenta fundamentalmente las fuerzas provocadas por la masa del agua que se tiene presente en la tubería en estudio.

**Golpe de ariete de onda**

Es el golpe de ariete que toma en cuenta principalmente las fuerzas provocadas por las ondas de presión producidas por la transformación súbita de la energía cinética producida por el agua en movimiento, en energía de presión.

**Led**

Diodo emisor de luz. Diodo semiconductor, normalmente de arseniuro de galio, cuya unión P-N emite luz de una frecuencia fija cuando por ella circula una corriente de suficiente magnitud.

<b>Potencia activa</b>	Es la potencia en que el proceso de transformación de la energía eléctrica se aprovecha como trabajo. Los diferentes dispositivos eléctricos existentes convierten la energía eléctrica en otras formas de energía, tales como: mecánica, lumínica, térmica, química, etc. Esta potencia es la realmente consumida por los circuitos.
<b>Potenciómetro</b>	Es un resistor al que se le puede variar el valor de su resistencia. De esta manera indirectamente se puede controlar la intensidad de corriente que hay por una línea si lo conectamos en serie o la diferencia de potencial de hacerlo en paralelo. Normalmente los potenciómetros se utilizan en circuitos con poca corriente, para potenciar la corriente, pues no disipan mucha potencia.
<b>Relé</b>	Dispositivo diseñado de manera que el efecto eléctrico, magnético o térmico producido al aplicar energía eléctrica al mismo, genere un cambio brusco y predeterminado en uno o más circuitos eléctricos. Puede ser del tipo electromecánico o electrónico.
<b>Salto hidráulico o caída neta</b>	Es la diferencia de niveles entre la cámara de carga y el canal de fuga a la salida del tubo de aspiración, es la energía que por kilogramo de agua se pone a disposición de la turbina.
<b>Transductor</b>	Dispositivo que, bajo la influencia de una variación de

energía de una forma o en un sistema, produce una correspondiente variación de nivel de otra forma de energía o en otro sistema.

## RESUMEN

Se describe la función del sistema de regulación en una unidad de generación, los tipos y características de los sistemas de control de carga y regulación de velocidad, así como la evolución experimentada a través de los años; además, se indica qué es la estabilidad de frecuencia y las características que la definen.

En el modelado del sistema de regulación, se desarrolla el modelo matemático que rige el funcionamiento del DIGIPID, se calcula la estabilidad de regulación de velocidad y se determinan los parámetros PID de funcionamiento.

La descripción del sistema digital de regulación de velocidad, presenta la forma en la que interactúa el DIGIPID con todo el sistema de generación, además describe todas las características y especificaciones del sistema de regulación.

Se indica el funcionamiento del DIGIPID 1000 en su caja y se dan las secuencias estándar o tipo para el arranque y paro de las unidades de generación en las que participa el regulador digital para el control del automatismo de las pequeñas centrales hidroeléctricas, además se muestran los parámetros a los que tiene acceso el usuario.

El funcionamiento y puesta en servicio del sistema de regulación en la red, muestra el cálculo de los principales parámetros de programación del regulador, proporciona todas las verificaciones previas al arranque de la unidad y enlista las pruebas o ensayos que se le practican a la unidad gobernada por el

DIGIPID 1000. Luego se muestran gráficas que indican el comportamiento de la unidad de generación operando tanto en régimen permanente como en régimen transitorio.

Para reducir el riesgo de mal funcionamiento del sistema digital de control de carga y regulación de velocidad, se dan a conocer los programas de mantenimiento que deben realizarse y cuales son y cómo se solucionan las fallas mas comunes que pueden presentarse en la operación de las unidades de generación gobernadas por el DIGIPID 1000.

# OBJETIVOS

## General

Definición y análisis de las funciones de operación de los sistemas digitales de control de carga y regulación de velocidad (DIGIPID) y establecimiento de los límites de operación de las funciones mencionadas para asegurar la estabilidad de la frecuencia en las pequeñas centrales hidroeléctricas.

## Específicos

1. Descripción de la función básica de un sistema regulador de velocidad digital en las unidades de generación turbina-generador.
2. Determinación de los diferentes valores y funciones que pueden tomar los parámetros de control del sistema regulador digital para la correcta operación de la unidad de generación.
3. Establecimiento del comportamiento de la frecuencia obtenida con los sistemas reguladores de velocidad digitales (DIGIPID), y su característica de potencia.
4. Desarrollo de los procedimientos adecuados para poder llevar a cabo el mantenimiento del sistema gobernador de carga y regulador de velocidad.



## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, han sido desarrollando nuevos sistemas de control de carga y regulación de velocidad para las unidades de generación de energía eléctrica; con la introducción de sistemas computarizados para el control de las funciones en las máquinas eléctricas se han desarrollado sistemas de control de carga y regulación de velocidad de tipo digital, los cuales basados en circuitos integrados y microprocesadores y, con la ayuda de distintas herramientas -como el caso del algoritmo PID-, permiten implementar estrategias de control bastante complejas de una forma más sencilla.

La importancia de estos sistemas digitales de control de carga y regulación de velocidad deriva en que es necesario que un generador eléctrico pueda mantener casi constante su frecuencia de generación, no importando la cantidad de potencia real que se le este demandando y, que con los distintos cambios de carga que pueda sufrir se pueda mantener la frecuencia en un rango bastante estrecho -estabilidad de frecuencia-.

Para cumplir con las características de sincronización y las normas de coordinación del Administrador del Mercado Mayorista (A. M. M.) referentes a la regulación de velocidad de las unidades de generación, es fundamental el correcto cálculo y programación de los principales parámetros de control del sistema digital de control de carga y regulación de velocidad (DIGIPID).

Con lo descrito es posible saber la importancia que tienen en la actualidad estos sistemas de control de carga y regulación de velocidad en las unidades de generación.

Como caso de estudio y aplicación se analizará el sistema de regulación de las unidades de generación de la central hidroeléctrica Poza Verde; para describir las funciones que desempeña el DIGIPID 1000 durante el proceso de sincronización, control de frecuencia y entrega de potencia activa al sistema nacional interconectado.

# 1. GENERALIDADES

## 1.1 Función de la regulación de carga y velocidad

Las unidades de generación están equipadas con gobernadores de carga que regulan la velocidad de la turbina, la función de estos es medir continuamente la velocidad turbina-generador y controlar la posición de la compuerta (para el caso de estudio de las pequeñas centrales hidroeléctricas) en respuesta a los cambios de frecuencia del sistema, teniendo como característica principal la curva velocidad contra potencia de salida que un incremento en la carga viene acompañado de un decremento de la velocidad; el fin de un sistema de control de carga y regulación de velocidad, es que a pesar de los cambios de carga que sufra la unidad de generación se pueda mantener la frecuencia lo mas estable posible para así evitar perturbaciones en el sistema interconectado.

La función básica de un gobernador es controlar la velocidad y la carga de la unidad de generación. La función del control primario velocidad/carga involucra una retroalimentación de la señal de velocidad para controlar la posición del distribuidor.

Para asegurar que la operación en paralelo de múltiples unidades de generación sea satisfactoria y estable, el regulador de velocidad debe estar provisto con una característica de caída. El propósito de la caída es asegurar el compartimiento equitativo de carga entre las unidades de generación. Típicamente, la caída en estado estacionario es ajustada al rededor del 5%, lo que significa que una desviación de 5% en la velocidad causaría un cambio de

100% en la potencia de salida, ésta función se conoce con el nombre de característica de caída de velocidad.

## **1.2 Sistemas de regulación de velocidad tradicionales**

Durante los últimos tiempos los sistemas de regulación de velocidad del complejo turbina – generador han ido evolucionando en pro de que el funcionamiento de éstos sea más sencillo y fácil de implementar. Los sistemas de regulación pueden clasificarse de acuerdo al desarrollo tecnológico que se ha venido observando.

### **1.2.1 Sistema mecánico**

Llamado sistema regulador clásico, se puede observar en unidades de generación antiguas en las cuales la función de la regulación de velocidad y el control de la carga es realizada a través de componentes mecánicos e hidráulicos. La medición de la velocidad, la retroalimentación permanente de la caída de velocidad y las funciones de ajuste son realizadas a través de los componentes mecánicos, las funciones que requieren de mayor potencia son realizadas con los componentes hidráulicos.

Las partes de este sistema consisten en un dispositivo sensible a la velocidad, un elemento de potencia y un dispositivo compensador.

#### **1.2.1.1 Dispositivo sensible a la velocidad**

Originalmente está formado por un par de bolas de regulador accionadas por resortes y montadas directamente sobre el eje de la turbina o impulsada desde el eje por bandas o engranajes, o bien por un motor eléctrico que recibe

su potencia desde la línea colectora principal o desde un generador independiente impulsado por el eje del generador de la turbina principal.

### **1.2.1.2 Elemento de potencia**

Este elemento, bien conocido como unidad de potencia hidráulica, esta constituido por robustos cilindros de potencia operados por aceite o servomotores que operan las compuertas (también llamadas paletas directrices) de la turbina. Tanto las bombas de aceite como el tanque de presión o acumulador mantienen el suministro de aceite.

Una válvula operada por el sensor de la velocidad controla el flujo de aceite a los servomotores o actúa como una válvula piloto que controla una válvula relevadora mayor, que a su vez, controla el flujo de aceite a los servomotores.

La capacidad de la bomba es usualmente tres volúmenes de servomotor por minuto. La capacidad del tanque de presión se hace generalmente 20 veces el volumen del servomotor, lo que permite 8 volúmenes de aceite y 12 volúmenes de aire.

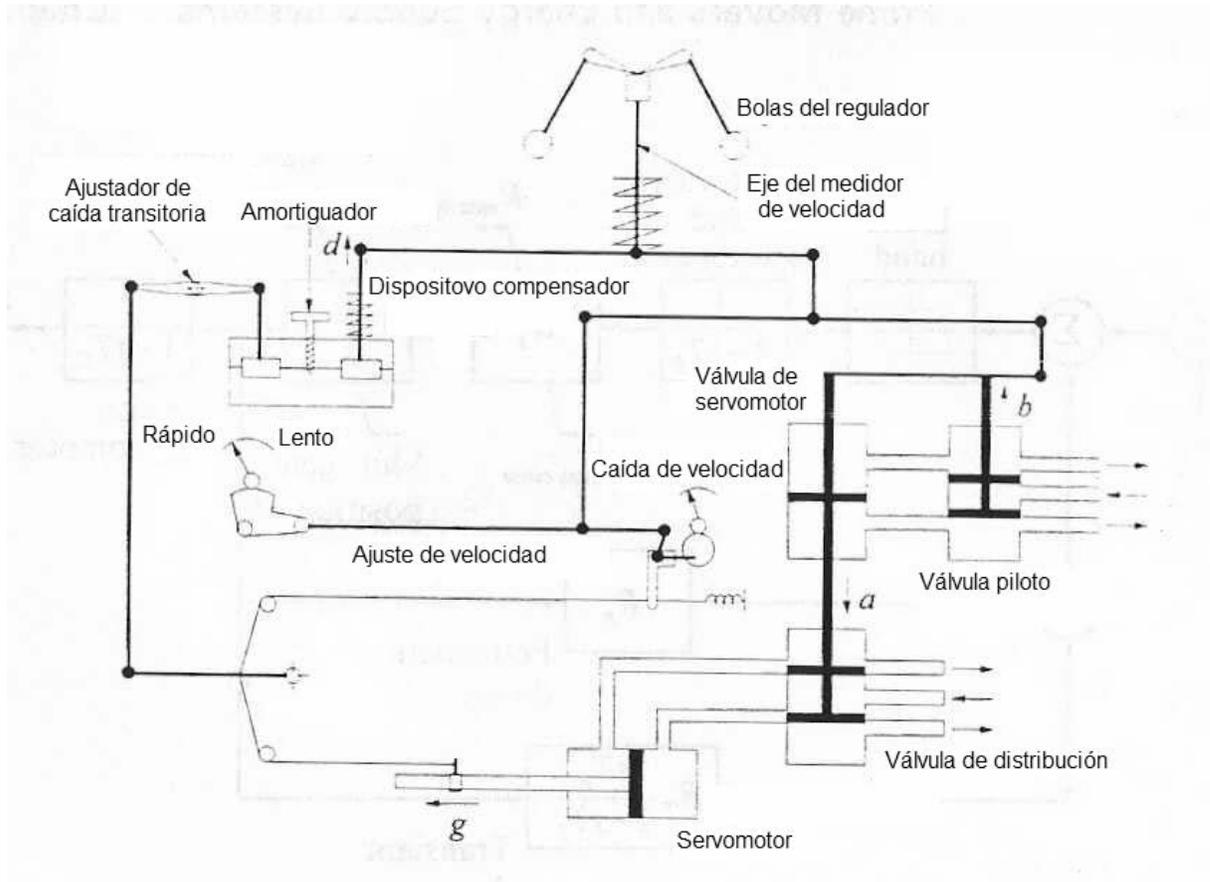
La velocidad del aceite en las tuberías se mantiene inferior a 5 m/s. cuando se usan servomotores individuales en cada compuerta, estos valores suelen incrementarse en un 50% para equilibrar el efecto usual de amortiguamiento del sistema masivo común de dos servomotores.

### **1.2.1.3 Dispositivo compensador**

Conecta el cilindro de potencia del servomotor a la válvula de control, en general, a través de un amortiguador, y ocasiona que el movimiento de las compuertas se detenga cuando se han movido lo suficiente para compensar el cambio de carga.

El tiempo para una carrera completa del regulador es controlado por la razón de flujo del aceite a los servomotores, la mayoría de los reguladores tienen dispositivos para variar este tiempo. La abertura de la compuerta cambia a razón uniforme en la porción mayor de la carrera y a una razón menor en los extremos de ella. El tiempo muerto del regulador, o sea, el tiempo transcurrido desde el cambio inicial de velocidad al primer movimiento de las compuertas, es normalmente menor que 0.2 segundos.

**Figura 1. Sistema regulador de velocidad mecánico – hidráulico**



Fuente: Kundur Prabha, Power system stability and control, página 397.

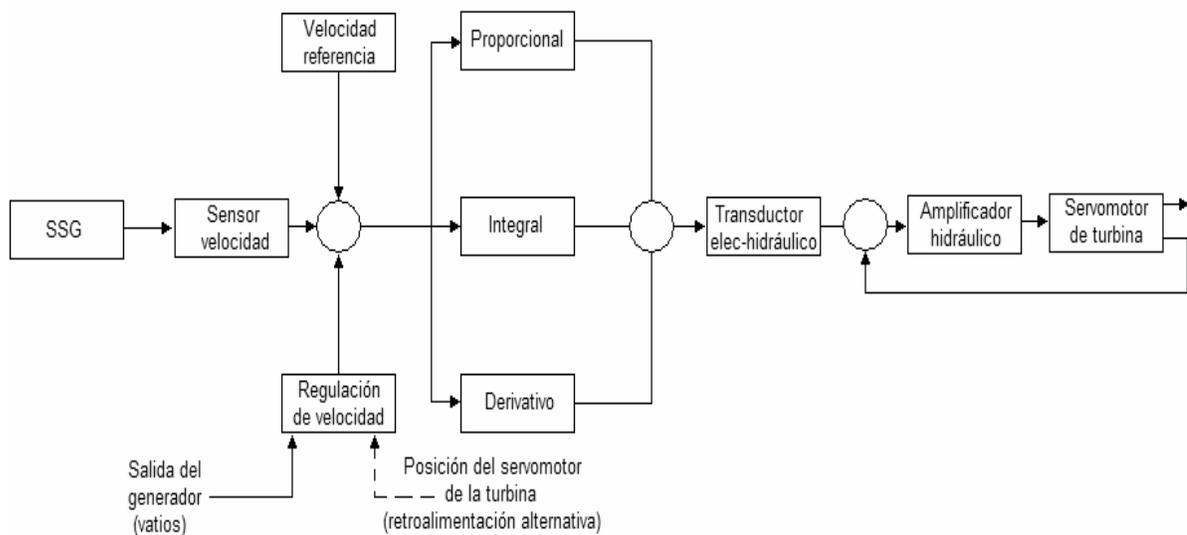
### 1.2.2 Sistema eléctrico

En años recientes, los requisitos funcionales impuestos a los reguladores de las turbinas hidráulicas han aumentado hasta el punto de que el control eléctrico de las turbinas hidráulicas es atractivo debido a la simplicidad con que las señales eléctricas se pueden manipular.

Los sistemas modernos de regulación de velocidad para turbinas hidráulicas usan sistemas eléctrico hidráulicos, funcionalmente, su operación es bastante similar a la de los sistemas mecánico hidráulicos. La medición de velocidad, retroalimentación de la caída permanente y transitoria de velocidad, otras medidas y funciones de ajuste son hechas de forma eléctrica.

Los componentes eléctricos proveen mayor flexibilidad y aportan un mejor desempeño ya que las bandas muertas y los tiempos de retardo se reducen. Las características dinámicas de los sistemas reguladores eléctricos usualmente son ajustadas para ser esencialmente similares a los sistemas mecánico – hidráulicos, la siguiente figura muestra el diagrama de un sistema regulador eléctrico típico

**Figura 2. Diagrama esquemático del sistema regulador eléctrico - hidráulico**



**Fuente: Fink Donald/Beaty Wayne, Manual de ingeniería eléctrica, página 9-31.**

Los elementos básicos que conforman un sistema de regulación eléctrico hidráulico son:

- Generador de imán permanente: o equivalente, se utiliza para medir la velocidad de la turbina y los dispositivos necesarios útiles para la transmisión de las señales a la porción eléctrica del regulador.
- Circuito eléctrico: debe ser sensible a variaciones de velocidad respecto a un punto de referencia ajustable.
- Circuitos amplificadores: sirven para convertir cambios respecto a la velocidad de referencia, señales de error en la velocidad y señales auxiliares en una corriente eléctrica útil.
- Transductor eléctrico hidráulico: utilizado para transformar las señales eléctricas de entrada en señales hidráulicas de salida.
- Equipo hidráulico amplificador: proporciona la potencia requerida y la señal deseada a los servomotores de las compuertas como función de la salida del transductor eléctrico hidráulico.
- Dispositivos de potencia: tanto para las porciones eléctricas como para las hidráulicas de control.

### **1.2.3 Sistema electrónico**

Con el advenimiento de las mini computadoras, microprocesadores y controladores lógicos programables, muchas de las funciones mecánicas tradicionales en el regulador de velocidad de una turbina hidráulica, han tenido que ser reemplazadas electrónicamente.

En tanto, los elementos básicos del regulador de velocidad siguen siendo los mismos, el uso de la electrónica en los circuitos de control y sensores de

retroalimentación ha reducido considerablemente el tamaño y complejidad mecánica de esas unidades.

Los elementos básicos que conforman el sistema moderno de regulación electrónica son:

- Captadores inductivos o bien generadores magnéticos permanentes o equivalentes para la medición de velocidad del complejo generador y así transmitir la información al procesador.
- Circuitos electrónicos para establecer la función de control de la velocidad de regulador (compuesta por circuitos integrados o bien por programación digital), consistente en su forma básica por una función proporcional, un circuito integrador y una función derivativa.
- Una servoválvula o equivalente para la traducción de la señal electrónica de procesador a una señal hidráulica.
- Donde sea necesario, un dispositivo para amplificar hidráulicamente la salida de la servoválvula de manera que sea posible la transmisión de un nivel de potencia adecuado a los servomotores de la compuerta y paletas directrices.
- Equipo auxiliar que es requerido en forma de generadores de potencia, utilizado únicamente como apoyo al sistema.

### **1.3 Principios de los sistemas digitales de control de carga y regulación de velocidad**

Lo último en el desarrollo de sistemas de control de carga y regulación de velocidad para complejos de generación, es la introducción de tecnología digital. Control, protección y funciones lógicas han sido implementadas

digitalmente, duplicando esencialmente las funciones proporcionadas por circuitos análogos.

Estos sistemas tienen la ventaja de ser más flexibles, permiten la sencilla implementación de más estrategias de control complejo, y además interactúan fácilmente con otros controles y funciones protectoras del complejo de generación.

El sistema digital contiene las siguientes partes principales: Fuente de potencia, medidor de frecuencia, control y monitoreo de secuencia, interfase del servo, control automático de admisión de agua a la turbina, control del rotor, opciones como control de nivel de agua, entre otros.

Dos sensores detectan un segmento de disco anclado al eje de la turbina, o bien del generador, esto permite que la frecuencia sea medida. Las señales medidas son transformadas a un código digital por el circuito de medición de frecuencia, existe una relación lineal entre el valor medido y el tiempo del ciclo de la unidad de frecuencia. De manera alternativa la medición de la frecuencia puede ser tomada por medio de un generador de imán permanente. Excepto por la forma de medir la señal no existe diferencia entre el DIGIPID 1000 y los controladores analógicos (respecto a medición de frecuencia.)

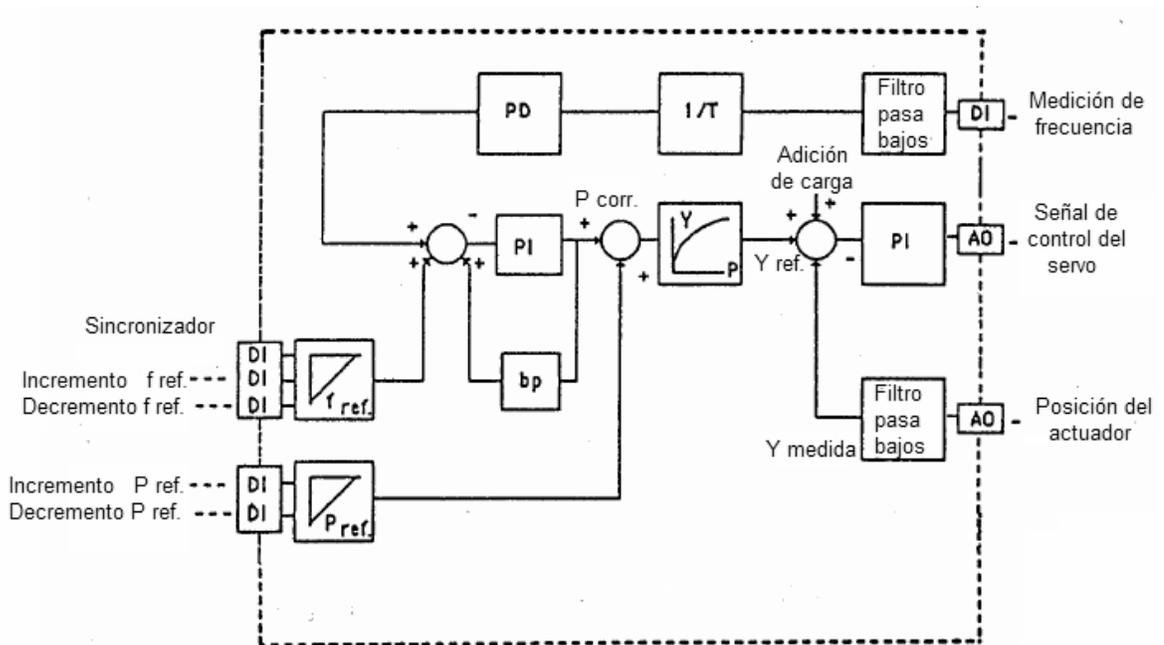
Como se mencionó, el funcionamiento del DIGIPID 1000 está basado en un sistema de microprocesador. El *hardware* del DIGIPID 1000 está hecho de componentes estándar, mientras que las funciones de control son realizadas por un programa específico; el programa del controlador incluye las siguientes funciones:

- Algoritmo de control
- Secuencias de control para arranque, paro, interconexión, etc.
- Monitoreo del proceso de generación y monitoreo propio.

El DIGIPID tiene incorporada la función de control PID. Cada parámetro puede ser ajustado dentro de un gran rango de valores, el ajuste de un parámetro no ejerce influencia alguna en los otros.

La siguiente figura muestra el esquema básico del funcionamiento del DIGIPID 1000.

**Figura 3. Esquema del funcionamiento del DIGIPID**



Fuente: GEC Alsthom, Manual de usuario STATUS, página 27.

La interfase del servo, es la unión entre la parte electrónica digital y la parte de potencia hidráulica del gobernador, en otras palabras, es el control de posición electrohidráulica del actuador, obsérvese que el lazo está cerrado en el procesador.

Como se puede observar el DIGIPID 1000 está constituido por una serie de bloques continuos, cada bloque dispone de parámetros característicos de ajuste y de puntos de prueba por lo que el conjunto de los puntos de control suministra así una matriz que se encarga de rastrear el proceso realizado.

La modificación de los parámetros de control y el control del tiempo real de los puntos de prueba corroboran con precisión la eficacia del ciclo de regulación.

#### **1.4 Estabilidad de frecuencia**

Para que la operación de un sistema de potencia sea satisfactoria, la frecuencia debería permanecer casi constante. Un minucioso control de frecuencia asegura la constancia de velocidad de motores síncronos y de inducción, que la velocidad de los motores permanezca constante es particularmente importante para que el desempeño de las unidades de generación sea satisfactorio.

En un sistema de potencia, una considerable caída de frecuencia puede ocasionar altas corrientes de magnetización en motores de inducción y en transformadores. El extenso uso de relojes eléctricos y el uso de la frecuencia para otros propósitos (siempre relacionados con el tiempo), requieren de un mantenimiento adecuado del tiempo síncrono el cual es proporcional a la

integral de frecuencia. Como consecuencia, es necesario regular no solo la frecuencia misma sino que también su integral.

La frecuencia de un sistema de potencia también depende del balance de la potencia activa. Como la frecuencia es un factor común a través del sistema, un cambio en la demanda de potencia activa en un punto cualquiera es reflejado en el sistema por un cambio en la frecuencia.

Debido a que hay muchos generadores suministrando potencia al sistema, éstos deben poseer métodos de protección para permitir el cambio en la demanda de potencia.

Un gobernador (controlador de carga y regulador de velocidad) en cada unidad de generación provee tanto la regulación primaria de frecuencia como el control de carga del generador. El control de generación y frecuencia es comúnmente llamado control carga-frecuencia (LFC por sus siglas en ingles.)

La frecuencia se debe mantener en todo momento dentro de los límites de calidad de servicio requeridos por el administrador del sistema de potencia. Para ello, las unidades de generación deberán contar con equipos que permitan una regulación automática de su producción, para equilibrar los requerimientos variables de consumo, a esta regulación se le denomina “regulación primaria de frecuencia”.

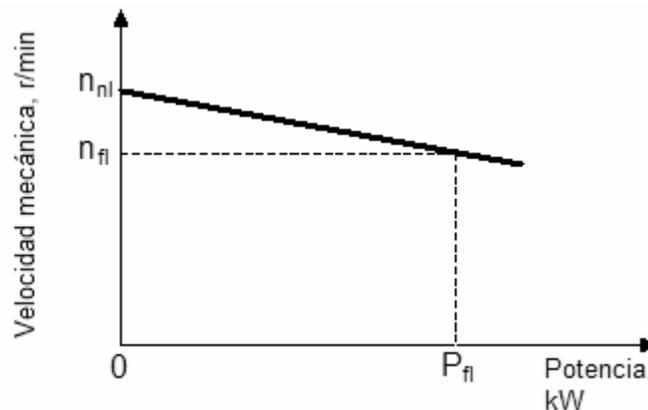
Un complejo de generación está conformado por un generador y por un motor primario o primotor que es la fuente de potencia mecánica del generador. Independientemente de la fuente original de potencia, todos los motores primarios tienden a comportarse de manera similar: cuando la potencia tomada de ellos se incrementa, decrece la velocidad a la cual giran. Como esta

disminución de velocidad, en general, no es lineal, usualmente se incluye alguna forma de mecanismo gobernador para hacerla lineal con el incremento de potencia demandada.

Cualquiera que sea el mecanismo gobernador presente en el motor primario, siempre se ajusta para suministrar una característica de caída suave con el incremento de la carga, la mayoría de motores primarios tienen una caída de velocidad de 2 a 5%; además, la mayoría de los gobernadores tienen algún tipo de ajuste del punto fijado para permitir que varíe la velocidad de vacío del motor primario.

La figura 4 muestra un esquema típico la característica velocidad – potencia del motor primario (para el caso de estudio sería la turbina hidráulica.)

**Figura 4. Curva de velocidad-potencia para un motor primario típico**



**Fuente: Chapman Stephen, Máquinas eléctricas, página 311.**

La caída de velocidad (SD) de un motor primario se define mediante la ecuación

$$SD = \frac{n_{nl} - n_{fl}}{n_{fl}} \times 100\%$$

en donde  $n_{nl}$  es la velocidad del motor primario en vacío y  $n_{fl}$  es su velocidad a plena carga.

Puesto que la velocidad del eje está relacionada con la frecuencia eléctrica resultante por la ecuación

$$f_e = \frac{n_m P}{120}$$

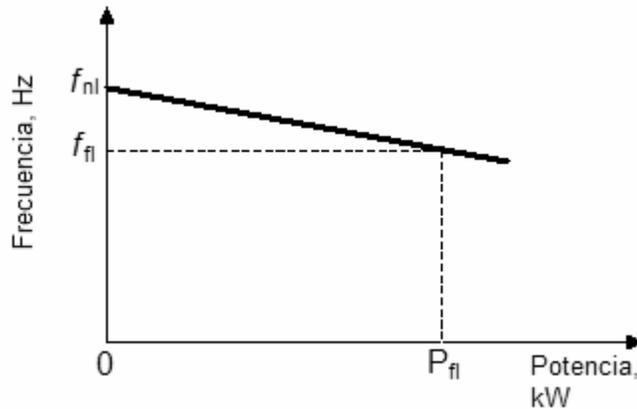
la potencia de salida de un generador sincrónico está relacionada con su frecuencia, donde

$n_m$  = velocidad mecánica de rotación

P = número de polos del generador

La figura 5 muestra un ejemplo de la característica frecuencia contra potencia. Las curvas características de frecuencia – potencia de este tipo cumplen un papel esencial en la operación en paralelo de los generadores sincrónicos y en esencia de los complejos de generación.

**Figura 5. Curva resultante de frecuencia – potencia del generador**



**Fuente: Chapman Stephen, Máquinas eléctricas, página 311.**

Como se observa las gráficas anteriores son prácticamente idénticas, la razón de esto es que la velocidad mecánica de rotación está ligada a la frecuencia a través del número de polos y un factor divisor constante, por lo tanto son directamente proporcionales entre sí, de aquí que las gráficas sean prácticamente idénticas.

Por último, la relación entre frecuencia y potencia puede describirse cuantitativamente por la ecuación

$$P = s_p (f_{nl} - f_{sis})$$

- donde
- P = potencia de salida del generador
  - $f_{nl}$  = frecuencia del generador en vacío
  - $f_{sis}$  = frecuencia de operación del sistema
  - $s_p$  = pendiente de la curva, kW/Hz o MW/Hz



## **2. MODELADO DEL SISTEMA DIGITAL DE CONTROL DE CARGA Y REGULACIÓN DE VELOCIDAD (DIGIPID)**

Los modelos matemáticos de los sistemas de control de carga y regulación de velocidad son necesarios para que se asegure la obtención de los requerimientos de las funciones del sistema regulador, para el diseño y coordinación de controles auxiliares y circuitos protectores, y además, para observar el posible comportamiento de las unidades de generación de una pequeña central hidroeléctrica dentro del sistema de potencia.

El controlador digital de carga y regulador de velocidad DIGIPID 1000, posee distintas funciones dependiendo el modo de operación de la unidad, estos modos pueden ser:

- Marcha en vacío, arranca la unidad y estabiliza cerca de la velocidad de sincronismo para permitir el acople a la red.
- Red aislada, adapta la potencia producida a la potencia consumida para así asegurar que la frecuencia de la red permanezca constante.
- Conectado a la red general, participa en la estabilidad de ésta, ajusta la potencia producida a una consigna externa (llamada consigna de potencia o de apertura del distribuidor), y queda listo para estabilizar la frecuencia en caso de paso a red aislada.

Los modos de operación anteriores necesitan juegos de parámetros distintos en marcha en vacío y con la unidad acoplada, puesto que el comportamiento dinámico del conducto depende en gran proporción del caudal.

En marcha en vacío, el juego de parámetros es determinado por el operador quien efectúa ensayos sucesivos al efecto de conseguir un rápido acople.

En red aislada, sería también posible determinar el juego de parámetros óptimos de modo manual, pero no siempre es posible funcionar en red aislada en el momento deseado porque en raras ocasiones se puede contar con el disyuntor del grupo cerrado en una línea fuera de tensión. Por tal motivo, estos parámetros se determinan por medio de un programa de simulación.

El *software* de simulación utilizado, modela una turbina hidráulica que alimenta una red aislada. La simulación toma en cuenta:

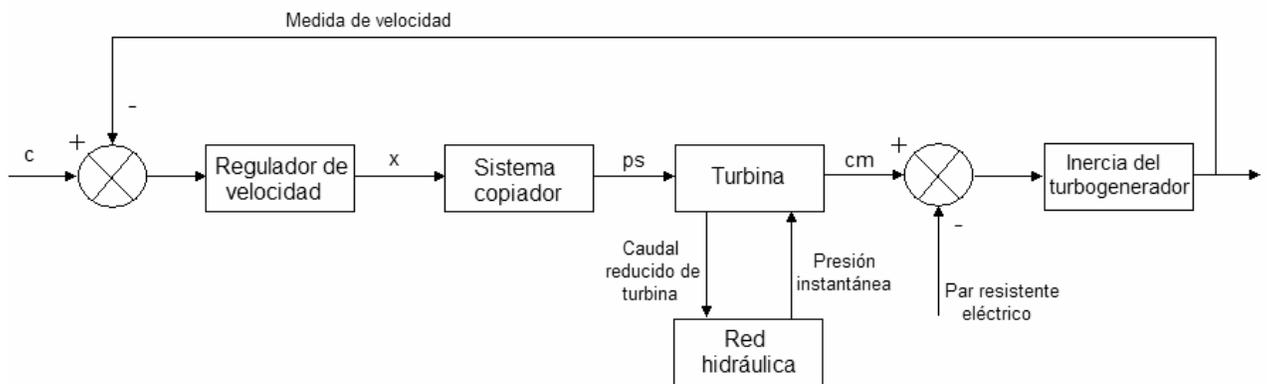
- El golpe de ariete de onda en la tubería de conducción
- La turbina hidráulica, función de sus curvas características caudal – velocidad – presión.
- El o los servomotores con retroalimentación de posición (también llamado sistema copiador). Los tiempos de accionamiento (velocidades límite) en gran movimiento también son incluidas en el modelo.
- El regulador de velocidad.
- La red eléctrica, con un coeficiente de autorregulación que puede variar entre 0 y 1.

El siguiente modelo está basado en el sistema digital de control de carga y regulación de velocidad DIGIPID 1000.

## 2.1 Organización del modelo matemático

El esquema que a continuación se muestra, indica la forma en la cual esta organizado el lazo de simulación.

**Figura 6. Diagrama de bloques del modelo matemático del DIGIPID 1000.**



**Fuente: GEC Alstom, Cálculo de estabilidad de la regulación de velocidad, página 5.**

donde:

c	Consigna de velocidad
x	Consigna de posición
ps	Medida de posición
cm	Par motor hidráulico

Los parámetros PID de la regulación de velocidad son determinados en un modelo de turbina simplificado del modelo completo. La regulación se define con una garantía del margen de ganancia y de fase.

El modelo completo permite verificar la estabilidad de la regulación de velocidad durante variaciones de carga de fuerte amplitud.

## 2.2 Golpe de ariete en el conducto

La tubería de conducción se reduce a un conducto rectilíneo de sección constante. Por otra parte, se admite que cada turbina es alimentada por un conducto especial.

Respecto a la primera hipótesis, es posible determinar un conducto rectilíneo equivalente a un conducto de sección variable, desde el punto de vista dinámico de la columna de agua. Por ejemplo, en un conducto cónico de longitud  $L$ , con sección de entrada  $S_1$  y sección de salida  $S_2$ , la relación “ $L/S$  equivalente” de esta tubería se calcula de la siguiente forma:

$$(L/S)_{eq} = \frac{L}{\sqrt{S_1 \cdot S_2}}$$

La  $L/S$  de un conducto completo se define como la suma de las  $L/S$  de cada tramo identificable. Respecto a las cajas espirales, se dispone de valores estadísticos en función del diámetro de salida del rodete.

En el caso frecuente de instalación de varias unidades en un mismo conducto, se demuestra que el caso más desfavorable ocurre cuando todas las unidades funcionan simultáneamente en una misma red aislada, pudiendo considerarse que cada unidad es alimentada por su columna de agua específica y determinándose cada sección de conducto mediante un reparto proporcional que depende de la potencia de cada unidad.

## 2.3 Turbina hidráulica

Desde el punto de vista hidráulico, la turbina actúa como una válvula, definida por su caudal reducido

$$Q/\sqrt{H}$$

siendo Q el caudal y H el salto o caída neta de la turbina.

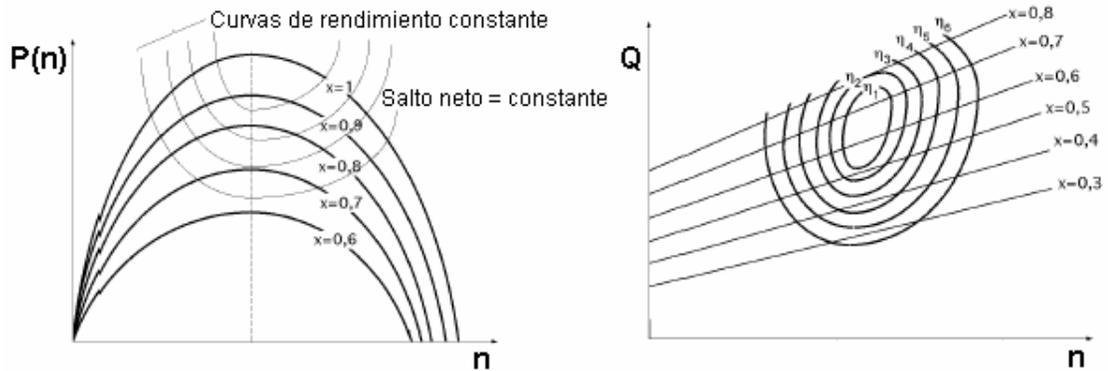
La hipótesis más sencilla consiste en suponer que el caudal reducido es función solamente de la posición de los álabes móviles. No obstante, procede tomar también en cuenta las sobrepresiones, sobrevelocidades, así como el coeficiente de corte de los deflectores para una turbina pelton.

El rendimiento hidráulico es también función del caudal, de la presión y de la velocidad. El *software* utilizado para la determinación del modelo entero, interpola a cada instante de cálculo en tablas de datos que contienen las curvas características (colina) de la turbina.

Las curvas colina, también llamadas en concha, se obtienen a partir de una serie de ensayos elementales, al ser constante el salto neto el rendimiento o eficiencia será una función simultánea de las variables P (potencia) y n (velocidad) ó de Q (caudal) y n.

La representación espacial de estas funciones es una superficie que puede representarse en el plano, para cualquiera de los dos casos, cortándola por planos de rendimiento constante ( $\eta$ ), equidistantes y proyectando las intersecciones obtenidas sobre los planos (P, n) ó (Q, n), quedando de esta forma representada la colina de rendimientos, por las curvas de igual rendimiento de la figura 7. Éstas curvas pueden ingresarse manualmente o determinarse automáticamente por medio del programa de modelado a partir de datos estadísticos.

**Figura 7. Curvas características o colinas de rendimiento de las turbinas hidráulicas**



Fuente: Daugherty Robert. Turbinas hidráulicas, página 355.

## 2.4 Servomotor

Un servomotor con retroalimentación de posición controlado por una o dos válvulas de regulación se denomina un “sistema copiador”, ya que su finalidad es la de obedecer a una consigna de posición externa. Tal sistema copiador tiene un comportamiento no lineal.

Con pequeños movimientos alrededor de una posición de equilibrio, el caudal enviado al servomotor varía de modo bastante lineal con la posición de las correderas de distribución. El sistema copiador puede por lo tanto asimilarse a un sistema pasa – bajo del primero o del segundo orden según que el servomotor sea controlado directamente por el accionador o a través de una válvula de amplificación controlada hidráulicamente.

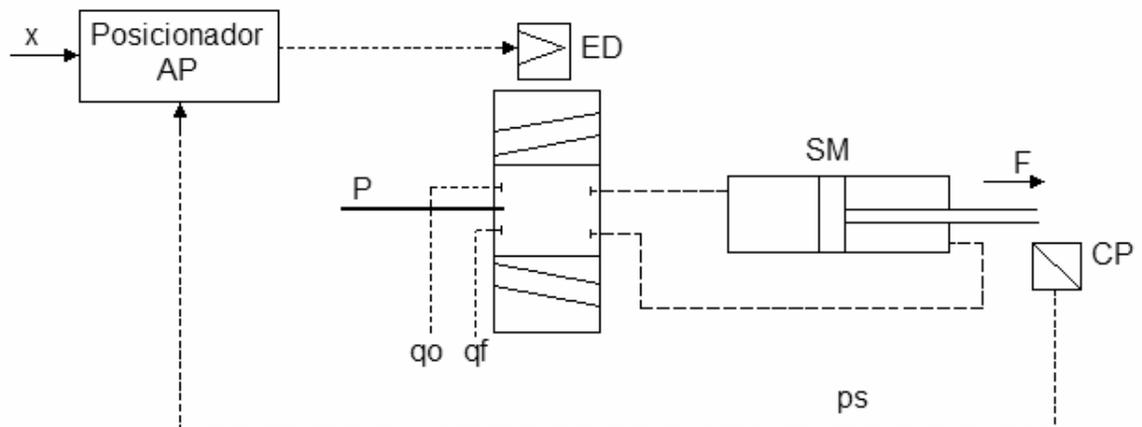
Cuando se da un movimiento amplio, el flujo de aceite queda limitado por diafragmas, con lo cual se definen tiempos de accionamiento para la apertura y el cierre.

Una confusión frecuente, consiste en asimilar la banda pasante del sistema copiador, o “constante de tiempo” y los tiempos de accionamiento para la apertura y el cierre. Al ser la banda pasante  $f$  de alrededor de una unidad de Hertz, la constante de tiempo  $T$  (período) de un sistema copiador es de alrededor de 0.2 segundos (se sabe que  $T=1/(2\pi f)$ ), mientras que los tiempos de accionamiento sobrepasan a menudo los 10 segundos.

El servomotor debe ser controlado por un accionador, el accionador puede ser del tipo ED o del tipo TR.

El accionador utilizado en la presente aplicación es del tipo ED. El esquema CETOP que se presenta a continuación, representa a un servomotor controlado por un accionador del tipo ED.

**Figura 8. Esquema del servomotor controlado con un accionador ED.**

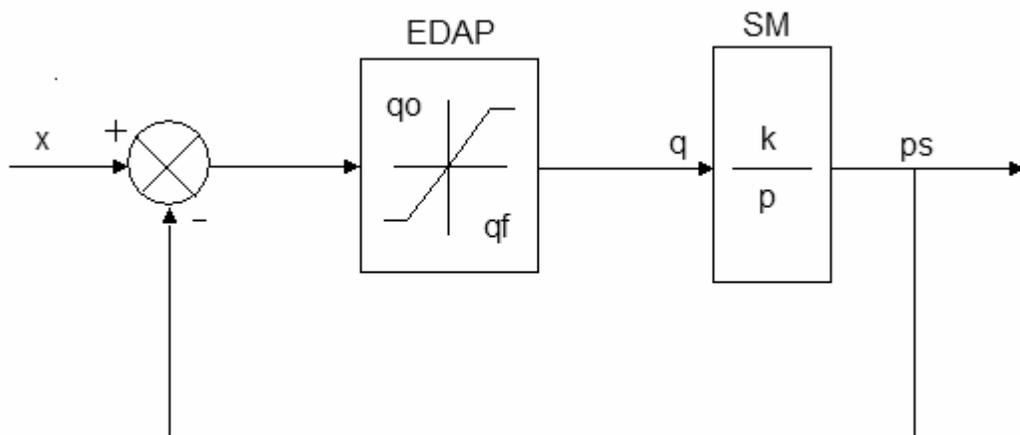


Fuente: GEC Alsthom, Cálculo de estabilidad de la regulación de velocidad, página 8.

Donde:	ED	Accionador
	SM	Servomotor
	CP	Captador de posición
	F	Sentido de cierre
	P	Presión de trabajo
	qo	Flujo de apertura
	qf	Flujo de cierre
	ps	Medida de posición del servomotor
	x	Consigna de posición

El siguiente diagrama de bloques representa la modelación del conjunto anterior en el *software* de modelado.

**Figura 9. Diagrama de bloques del servomotor controlado con un Accionador ED.**



Fuente: GEC Alsthom, Cálculo de estabilidad de la regulación de velocidad, página 8.

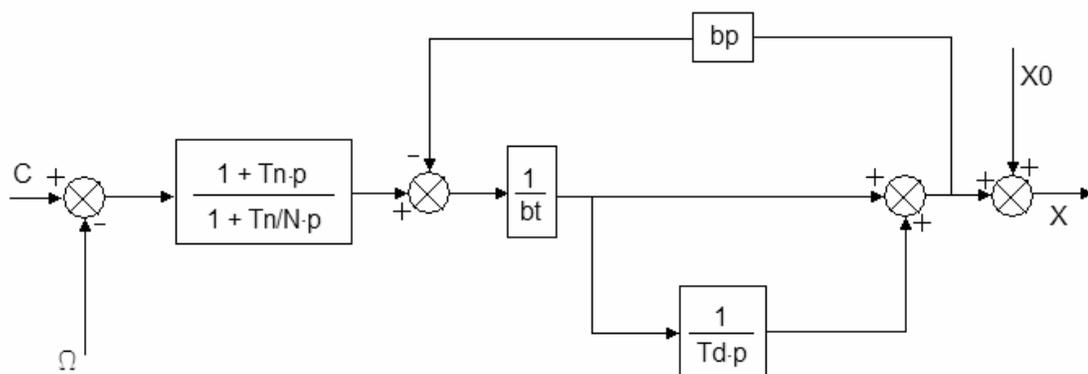
Donde:	EDAP	Accionador con retroalimentación de posición
	k	Sección reducida del servomotor
	p	Variable de Laplace
	q	Flujo reducido de aceite

## 2.5 Regulador de velocidad

### 2.5.1 Regulación dinámica

El esquema funcional del regulador de velocidad (DIGIPID 1000) cuando el interruptor está cerrado, está compuesto en su esencia por un bloque proporcional derivativo y por otro bloque proporcional integral, como se puede apreciar en el siguiente diagrama de bloques.

**Figura 10. Diagrama de bloques del DIGIPID 1000**



Fuente: GEC Alsthom, Cálculo de estabilidad de la regulación de velocidad, página 10.

Donde:	C	Consigna de velocidad
	$\Omega$	Medida de velocidad
	XO	Consigna de apertura
	X	Consigna de posición hacia el sistema copiator
	p	Variable de Laplace
	Tn	Constante derivativa
	N	Ganancia del derivador
	bt	Estatismo transitorio
	Td	Constante integral
	bp	Estatismo permanente

Los parámetros Tn, Td y bt son determinados por el programa útil para la modelación. N es un valor fijo, el cual debe ser el mayor posible para que se pueda obtener una acción derivativa eficaz. En el regulador DIGIPID 1000, y tomando en cuenta específicamente la calidad de la medida de velocidad, se utiliza corrientemente el valor de N=10.

### 2.5.2 Regulación estática

El parámetro bp no tiene ninguna función en el régimen transitorio. En régimen permanente, tiene una función importante en servicio con varias máquinas.

Según el esquema funcional, tenemos la relación:

$$bp(X - X_0) = C - \Omega$$

Si la red es muy grande, entonces la unidad de generación no tiene incidencia sobre la frecuencia de la red. Si el valor del estatismo permanente es el mismo para todas las máquinas de la red (4% por ejemplo), la simple lectura de la frecuencia de la red indica, al ente administrador de la misma, la potencia total consumida en el instante presente.

En una red con varias máquinas, es decir una red pequeña,  $b_p$  permite hacer participar más o menos la unidad considerada en la estabilidad de la red.

Si  $b_p$  es pequeño, la unidad reacciona con fuerza a una desviación de frecuencia. Si  $b_p$  es grande, la unidad obedece sobre todo a su consigna de carga.

## **2.6 La red eléctrica**

La red eléctrica está representada por un coeficiente de autorregulación que puede variar de modo continuo entre 0 y 1.

Si la autorregulación es nula, se supone que la red está a potencia constante. Este es el caso de una red constituida únicamente por resistencias. Tal situación es desestabilizante ya que el par eléctrico disminuye al aumentar la velocidad de la unidad de generación.

Si  $A=1$ , el par eléctrico es independiente de la frecuencia y la potencia crece con la velocidad de la unidad de generación.

Haciendo la salvedad de que se especifique lo contrario, el cálculo de estabilidad se efectúa con un coeficiente de autorregulación cero.

## 2.7 Determinación de los parámetros PID

El *software* utilizado para la modelación, dispone de dos métodos de cálculo de los parámetros PID.

La optimización de los parámetros es un método paso a paso tendiente a mejorar la respuesta temporal del lazo de regulación a un pequeño escalón de potencia en red aislada. El criterio de calidad de la respuesta es:

$$I = \int_0^{\infty} \left[ (C - \Omega) + m \cdot \left( \frac{dX}{dt} \right)^2 \right] dt$$

donde m es un coeficiente de ponderación que permite afectar un margen a la regulación optimizada.

El *software* utilizado, determina el juego de parámetros ( $T_n$ ,  $T_d$  y  $b_t$ ) que minimiza I, con la ayuda de un algoritmo de programación no lineal.

El segundo método utiliza una función de transferencia de la turbina, función que es deducida del modelo completo y que utiliza las constantes  $T_a$ ,  $T_w$ , y R.

$T_a$ , el tiempo de arranque mecánico está dado por:

$$T_a = \frac{J\Omega^2}{W}$$

Donde	J	Inercia MR <sup>2</sup>
	W	Potencia máxima
	$\Omega$	Velocidad de rotación

$T_w$ , el tiempo de arranque hidráulico está dado por:

$$T_w = \frac{QL}{gHS}$$

Donde	Q	Caudal máximo
	L	Longitud del conducto equivalente
	g	Aceleración de la gravedad
	H	Salto o caída neta nominal
	S	Sección del conducto equivalente

R, el parámetro de Alievi viene dado por:

$$R = \frac{Qa}{2gHS}$$

Donde	a	Celeridad de las ondas del conducto equivalente
-------	---	---

El parámetro de Alievi es utilizado para determinar el comportamiento del agua dentro de la tubería de conducción. Si R es superior a 1, el agua en el conducto tiene un comportamiento de golpe de ariete de masa. Si R es inferior a 1, el agua presenta un comportamiento de golpe de ariete de onda.

La determinación de la regulación se hace en el campo frecuencial (plano de Nyquist), en forma de garantizar la estabilidad del lazo cerrado con márgenes de ganancia y de fase especificadas, siendo éste el método más utilizado.

Como se indicó al principio del capítulo, la regulación obtenida por cualquier método se introduce seguidamente en el modo completo a efecto de controlar la estabilidad en grandes movimientos. En el modelo completo se trata siempre el caso general del golpe de ariete de onda.

### **3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DIGITAL DE REGULACIÓN DE VELOCIDAD (DIGIPID 1000)**

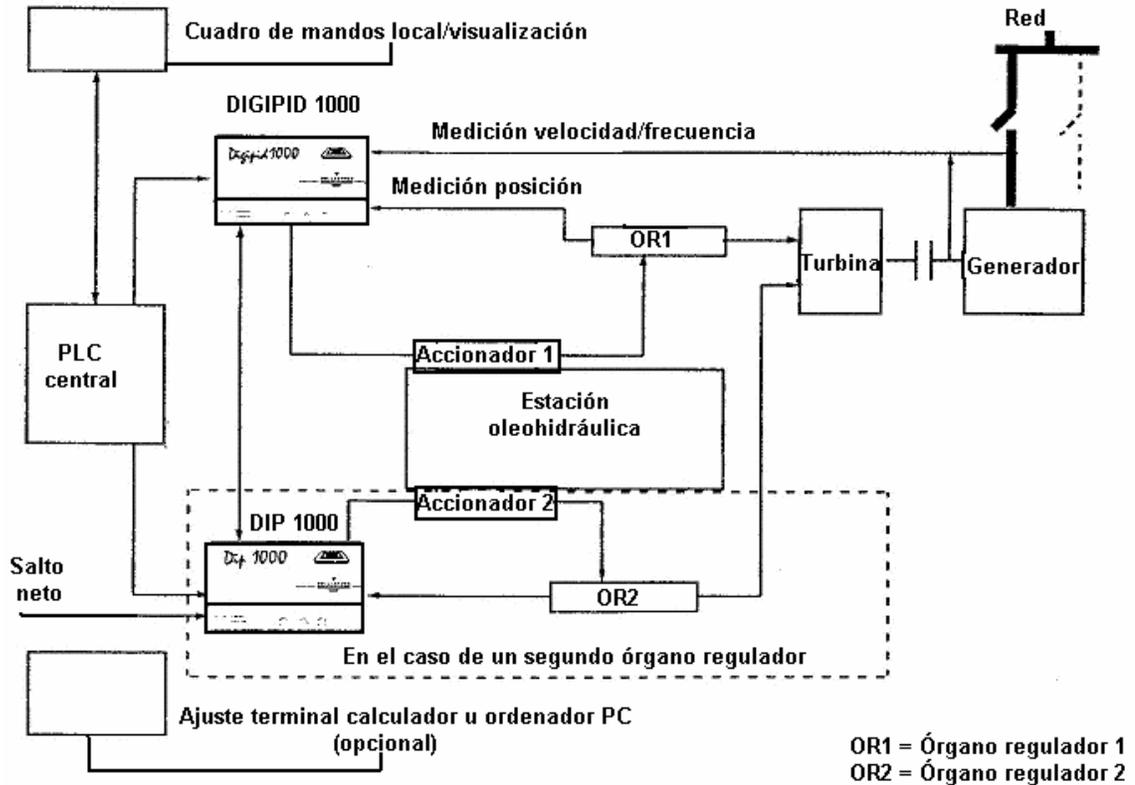
#### **3.1 Presentación Global del sistema**

El DIGIPID 1000 es un regulador numérico de velocidad y carga, mediante acción proporcional integral derivada (PID), destinado al pilotaje de las turbinas hidráulicas. Acciona la apertura del órgano que regula la turbina por medio de un accionador. En el caso de máquinas con diversos órganos reguladores, se asocian al regulador DIGIPID 1000 otros tantos módulos (pudiendo ser estos DIGIPID 1000) adicionales que se utilizan como posicionador del órgano regulador (DIP 1000.)

El órgano principal de funcionamiento del DIGIPID 1000 es el microcontrolador. Éste presenta las siguientes ventajas:

- Gran precisión de respuesta.
- Fiabilidad de uso.
- Velocidad de adquisición muy elevada.

**Figura 11. El DIGIPID 1000 y su entorno**



Fuente: GEC Alsthom, Manual de descripción y funcionamiento DIGIPID 1000, página 4.

### 3.1.1 Especificaciones generales del DIGIPID 1000

#### 3.1.1.1 Especificaciones de funcionamiento

- Dos bucles de regulación distintos (velocidad + posición del servomotor.)
- Arranque del grupo mediante operaciones automáticas (en arranque normal.)
- Control de parada total o mediante retorno a marcha en vacío.

- Acoplamiento por sincronización en consigna de frecuencia ajustable.
- Después del acoplamiento, realimentación del grupo en la apertura, con o sin estatismo permanente.

### **3.1.1.2 Especificaciones de utilización**

- Control de todo tipo de máquinas hidráulicas (turbinas tipo francis, pelton, kaplan, etc.)
- Compatible con los controladores lógicos programables (PLC's) de las centrales de generación (electromecánicas o computadoras.)
- Posibilidad de pilotaje de la máquina hidráulica mediante el distribuidor de carga.
- Especialmente diseñado para mantener constante la velocidad de la unidad a pesar de los cambios de carga presentados.

## **3.1.2 Estructura del DIGIPID 1000**

### **3.1.2.1 Regulador DIGIPID 1000**

Es un conjunto electrónico encargado de asegurar la función de regulación, es decir, la caja del DIGIPID 1000 y el cofre personalizado donde está integrada la caja.

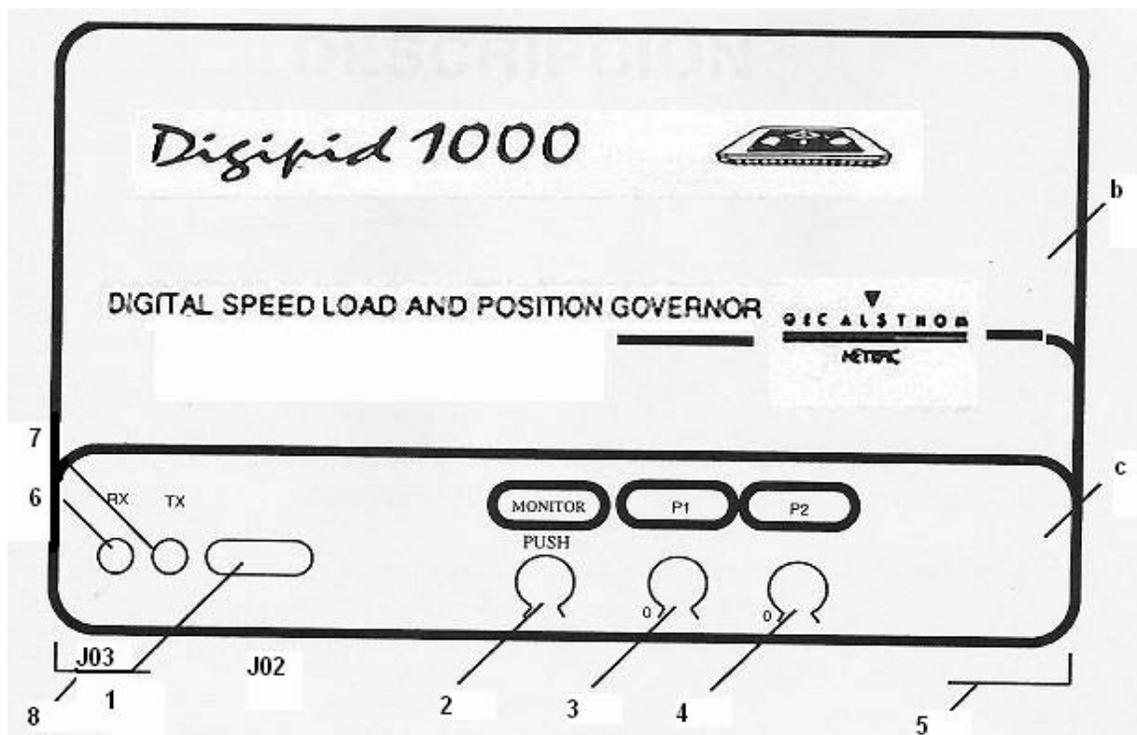
### **3.1.2.2 Caja del DIGIPID 1000**

Es la parte central del regulador, en ésta se incluyen las tres tarjetas electrónicas, es decir, la tarjeta unidad central que incluye el microcontrolador, las memorias RAM, EPROM y EEPROM, las interfaces de entradas/salidas lógicas (TOR) y analógicas, así como la conexión en serie; la tarjeta



- h: Bornera del mando accionador.
- i: Bornera de alimentación.
- j: Caja DIGIPID 1000.

**Figura 13. Parte delantera del DIGIPID 1000**



**Fuente: GEC Alsthom, Manual de descripción y funcionamiento DIGIPID 1000, página 7.**

- 1: Visualizador local (4 dígitos.)
- 2: Pulsador (selección visualizador.)
- 3: Potenciómetro 1: Estabilidad.
- 4: Potenciómetro 2: Limitador de apertura.
- 5: Bornera J02 (33 bornes extraíbles.)
- 6: Led modalidad de recepción (conexión en serie.)
- 7: Led modalidad transmisión (conexión en serie.)

- 8: Bornera J03 (conexión en serie.)
- b: Cara delantera (policarbonato.)
- c: Zona de diálogo.

## **3.2 Características generales del DIGIPID 1000**

### **3.2.1 Alimentación**

- Fuente de alimentación: corriente continua 24/48 V +/- 10% o 72/125 V +/- 10% (se debe precisar que fuente es la que se necesita para la aplicación específica, esta depende del suministro disponible en el lugar a instalar.)
- Consumo máximo, 170 vatios.
- Consumo en reposo, 25 vatios (accionador no pilotado.)
- Seguridad, un fusible de protección del circuito potencia/alimentación.
- Enfriamiento, ventilación por convección natural.

### **3.2.2 Salida de potencia**

Amplificador de potencia de corte personalizado en función del accionador dirigido.

- Frecuencia de 16 Khz. (casi inaudible)
- Conectado directamente con la fuente de alimentación del DIGIPID 1000.
- Seguridad, protección contra los cortocircuitos de línea.

### **3.2.3 Entradas/salidas de bajo nivel**

- Entradas lógicas TOR, señal de 0 – 12 V (contacto seco)
- Entradas analógicas, señales de 0 – 12 V en tensión y de 4 – 20 mA en corriente.
- Salidas lógicas TOR, señal de 12V/100 mA en transistor de colector abierto.
- Salidas analógicas, señal de 4 – 20 mA en corriente.

### **3.2.4 Características de uso**

- Temperatura de operación de 0 a 55 grados centígrados.
- 85% de humedad sin condensación.
- Posee aislamiento eléctrico para tensiones hasta 2000 V, 50/60 Hz.
- Índices de estanqueidad, IP 00 sólo la caja del DIGIPID 1000 e IP 55 para el cofre del DIGIPID 1000.

### **3.2.5 Normas**

- Pasa los niveles 8kV y 15 kV (prueba CEI 801-2, descargas electrostáticas.)
- Clase 3 (prueba CEI 801-4.)

### **3.2.6 Visualización de la información**

El regulador está provisto de un visualizador local compuesto de cuatro caracteres electro luminescentes (LED). El usuario puede seleccionar la variable a visualizar por acción sobre el pulsador de la cara delantera, la

visualización de los mensajes se efectúa por desenrollamiento; se puede visualizar la magnitud seleccionada en la lista usual.

En caso de fallo del regulador, el visualizador parpadea y señala el tipo de fallo.

### **3.2.7 Herramientas y conexión informática**

El DIGIPID 1000 es configurable en la fábrica en función de las opciones elegidas. Está provisto de un juego de parámetros correspondiente a cada función de regulación; la regulación de estos parámetros se lleva a cabo por telecarga mediante una conexión serie, ello gracias a la utilización de un terminal de mantenimiento o de un ordenador mediante el programa de *software* STATUS, que permite realizar las operaciones de regulación, de vigilancia y de ayuda al mantenimiento.

### **3.2.8 Retroalimentación**

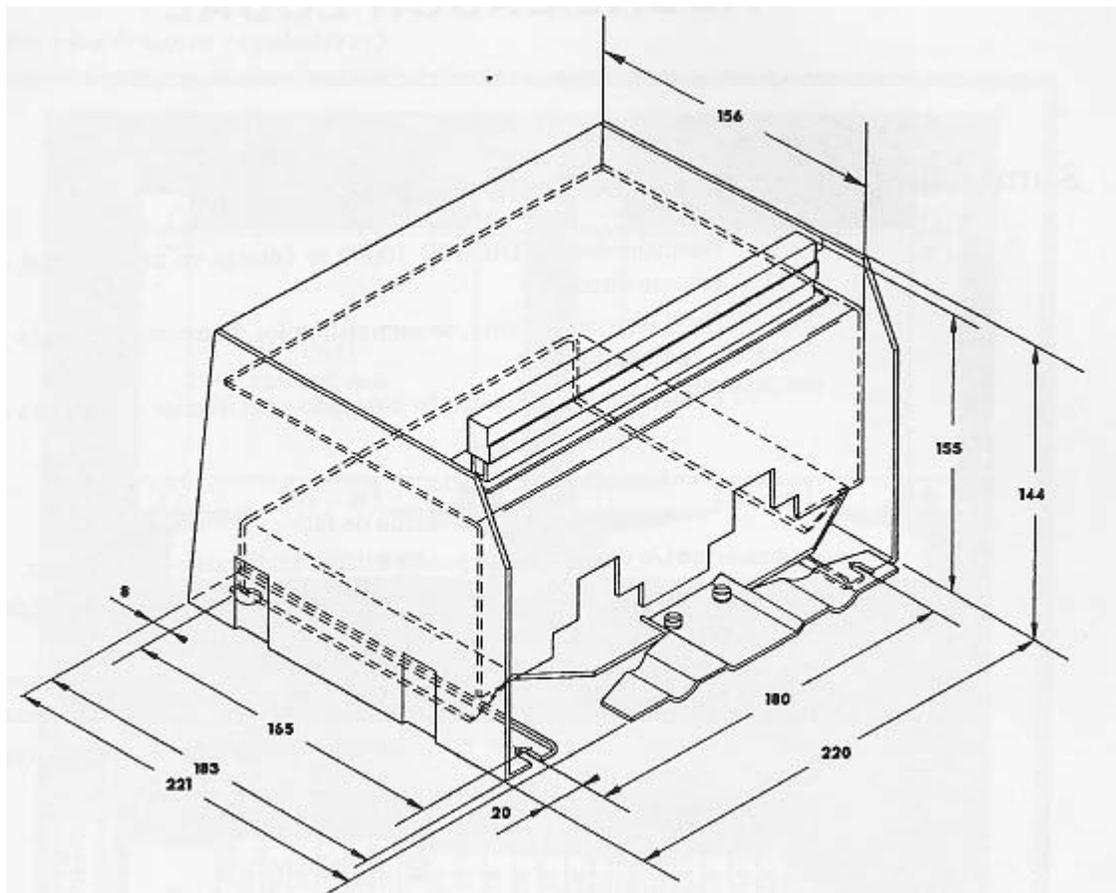
En la configuración estándar, el DIGIPID 1000 utiliza captadores inductivos sin contacto. Este tipo de captador detecta la variación del entrehierro entre una leva y el captador a través de un varillaje que es proporcional al desplazamiento del sistema a retroalimentar.

### **3.2.9 Dimensiones físicas principales**

- Longitud 220 mm
- Altura 221 mm (con placa de acoplamiento de los blindajes.)
- Profundidad 155 mm (con la bornera de 33 brocas extraíbles.)
- Peso 3.2 Kg.

Estas dimensiones no tienen en cuenta el volumen a guardar alrededor de la caja para la accesibilidad y la refrigeración (10 cm. aproximadamente por debajo de la caja y 3 cm. en los lados.)

**Figura 14. Dimensiones del DIGIPID 1000**



Fuente: GEC Alsthom, Manual de descripción y funcionamiento DIGIPID 1000, página 15.

Normalmente el DIGIPID 1000 se entrega en un cofre que constituye su entorno directo. En el interior del cofre, se suministran los diferentes elementos ya instalados y conectados.

El material mínimo estándar colocado en el interior del cofre es el siguiente:

- Un transformador
- Una célula de filtrado
- Un sistema de eliminación de fallos
- Un dispositivo de puesta a tierra del blindaje de los cables.

El contenido del cofre puede variar en función del sistema a regular. Se pueden utilizar módulos DIGIPID 1000 como posicionadores DIP 1000, pudiendo aumentarse el número de relevadores según la configuración.

### **3.3 Características funcionales**

#### **3.3.1 Bucles de regulación**

El regulador está equipado por dos bucles numéricos principales, cada bucle posee una consigna propia y una entrada de realimentación individual. El primer bucle calcula la apertura del órgano regulador en función de las condiciones de velocidad/frecuencia de la máquina, tiene como función la obtención de un punto de funcionamiento normal. El segundo bucle realiza el control de la posición del órgano regulador. Un consignador permite hacer evolucionar el punto de funcionamiento (en velocidad y en carga) de la máquina.

#### **3.3.2 Medición de la frecuencia**

La medición de la frecuencia se efectúa con ayuda de un tacómetro numérico autónomo con cambio de gama automático.

Características:

- Zona muerta de velocidad iX inferior a 1E-4
- Frecuencia nominal de 10 a 2000 Hz
- Insensibilidad 0 a 100% (en el acelerómetro)
- Medición de la velocidad
  - Máxima 2 Vn (Vn: velocidad nominal)
  - Mínima 0.01 Vn
- Extensión del conteo
  - Máxima 5000 Hz
  - Mínima 0.1 Hz
  - Sensibilidad de entrada 200 mV cresta
  - Tensión máxima de entrada 100 V (valor eficaz)
- Seguridades
  - No. 1, detección en caso de pérdida de la señal
  - No. 2, detección por tiempo demasiado largo para arranque de grupo sin señal.

### 3.3.3 Regulación de velocidad

La regulación de la velocidad se efectúa con la ayuda de un corrector PID condicionado, del tipo serie/paralelo.

Características:

- Parámetros 2 juegos independientes (bt, Td, Tn, bp)
- Estatismo permanente (bp) regulable de 0 a 20%
- Estatismo transitorio (bt) regulable de 5 a 1000%
- Acción integral (Td) regulable de 0.1 a 20 segundos

- Acción derivada (Tn) regulable 0.001 a 5 segundos
- Consigna de velocidad interna o emitida por el consignado (según la modalidad de funcionamiento)

### 3.3.4 Regulación de posición

La regulación de posición del cilindro del distribuidor también se efectúa con ayuda de un corrector PID condicionado, tipo serie/paralelo.

Características:

- Parámetros juego único (protección por nivel de acceso, lo que significa que es posible modificarlos solamente si se cuenta con la herramienta de diálogo o terminal de mantenimiento.)
- Consigna de posición posibilidad de aplicación de una ley de conjugación
- Medición de la posición analógica con resolución de 0.001
- Seguridad detección de ruptura de la conexión eléctrica del captador

### 3.3.5 Consignador

El consignador elabora una señal utilizada como consigna de velocidad si el disyuntor del grupo está abierto, o como consigna de posición si el disyuntor del grupo está cerrado.

Características:

- Selección mando                    por impulsos + / - o por señal analógica externa
- Resolución temporal            inferior a 10 milisegundos
- Velocidad de evolución        tres pendientes de rampas según la modalidad de funcionamiento, es regulable de 0.05 a 1000 segundos

### **3.3.6 Limitación de apertura del cilindro del distribuidor**

La limitación de apertura es el resultado de una elección de valores mínimos entre diversas fuentes de limitación.

#### **3.3.6.1 Limitación interna**

Acción automática de las limitaciones de apertura de arranque y de reducción de aceleración.

#### **3.3.6.2 Limitación regulable**

Se lleva a cabo con el potenciómetro situado en la caja delantera del DIGIPID 1000, por señal analógica externa (opcional.)

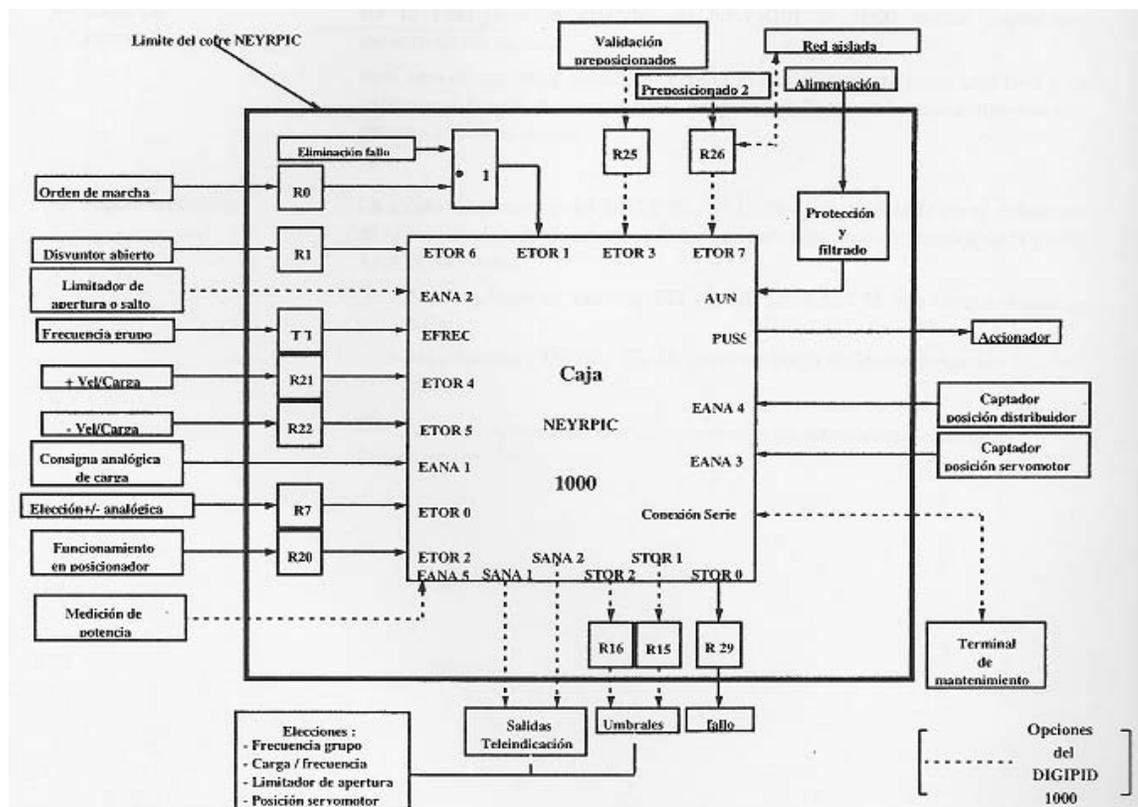


## 4. FUNCIONES DE OPERACIÓN

### 4.1 Principio general

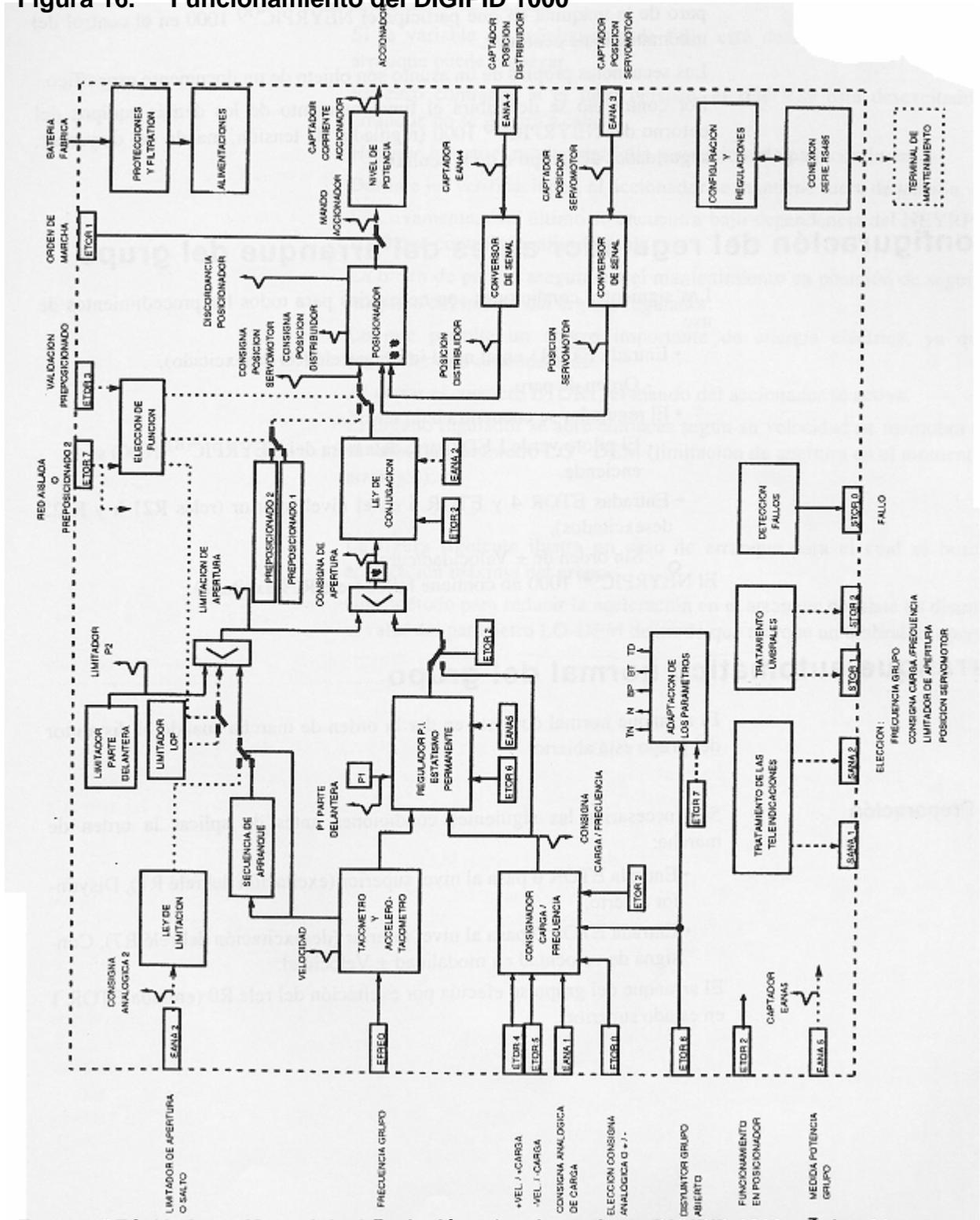
Para asegurar el buen funcionamiento de la turbina hidráulica, el DIGIPID 1000 está provisto de varias modalidades de funcionamiento y juegos de parámetros regulables. Los valores de regulación se almacenan en memoria del tipo EEPROM, lo que significa que las informaciones están disponibles incluso después de desconectar el DIGIPID 1000.

Figura 15. Funcionamiento del DIGIPID 1000 en su cofre



Fuente: GEC Alstom, Manual de descripción y funcionamiento DIGIPID 1000, página 20.

Figura 16. Funcionamiento del DIGIPID 1000



Fuente: GEC Alstom, Manual de descripción y funcionamiento DIGIPID 1000, página 21.

## **4.2 Secuencia estándar o secuencia tipo**

En esta sección se describe, a modo de ejemplo, secuencias estándar o tipo para el arranque y paro de la unidad de generación en que participa el DIGIPID 1000 en el control del automatismo de pequeñas centrales hidroeléctricas.

### **4.2.1 Configuración del regulador antes del arranque del grupo**

Las condiciones dadas a continuación son necesarias para que todos los procedimientos de uso sean adecuados:

- Entrada ETOR 1 en el nivel inferior (relé RO desexcitado), orden de paro.
- El regulador se encuentra bajo tensión, el piloto verde LED (parte delantera del DIGIPID 1000) se enciende.
- Entradas ETOR 4 y ETOR 5 en el nivel inferior (relés R21 h y R22 desexcitados), sin orden de +/- velocidad/carga.
- El DIGIPID 1000 no contiene fallos (relé R29 excitado.)

### **4.2.2 Arranque automático normal del grupo**

El arranque normal consiste en dar la orden de marcha cuando el disyuntor (interruptor de unidad) del grupo está abierto.

#### **4.2.2.1 Preparación**

Son necesarias las siguientes condiciones antes de aplicar la orden de marcha:

- Entrada ETOR 6 pasa al nivel superior (excitación del relé R1), disyuntor abierto.
- Entrada ETOR 0 pasa al nivel inferior (desexcitación del relé R7), consigna de velocidad en modalidad +/- velocidad.

El arranque del grupo se efectúa por excitación del relé R0 (entrada ETOR 1 en estado superior.)

La operación de arranque tendrá lugar únicamente en ausencia de fallos. Efectivamente, el mando de orden de marcha provoca la verificación de la información “memorización fallo.”

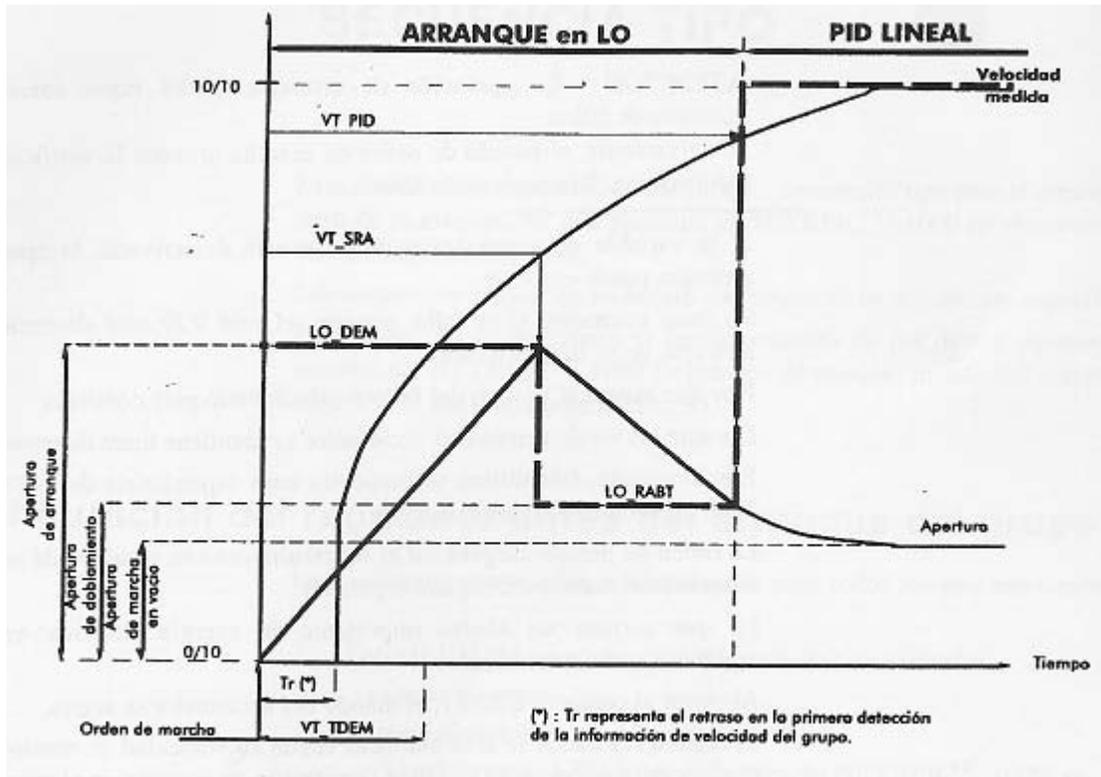
Si la variable de señalización de fallo está desactivada, la operación de arranque puede empezar, en caso contrario, si el fallo persiste, el relé R29 está desexcitado y el arranque no se llevará a cabo (hay que buscar el motivo del fallo y solucionarlo para continuar.)

Durante las verificaciones, el accionador se mantiene fuera de tensión. Efectivamente, éste último se encuentra bajo dependencia del DIGIPID 1000 que controla su alimentación.

La orden de parada asegura así el mantenimiento en posición de seguridad-máquina del mando del órgano regulador, lo que permite un ahorro importante de energía eléctrica, ya que el regulador está desconectado. Al cerrar el contacto ETOR 1, el mando del accionador se activa, el órgano regulador se abre entonces según su velocidad de maniobra hasta el valor del parámetro LO – DEM (limitación de apertura en el momento del arranque.)

La figura 17 ilustra un caso de arranque para el cual se busca la aceleración máxima del grupo.

Figura 17. Curva de aceleración en tiempo mínimo



Fuente: GEC Alstom, Manual de descripción y funcionamiento DIGIPID 1000, página 24.

#### 4.2.2.2 Aceleración

Desde la orden de marcha, se activa el dispositivo de vigilancia del tacómetro, la velocidad real del grupo aumenta progresivamente. El regulador vigila esta información suministrada por medio del captador (transformador de tensión o rueda dentada.)

El DIGIPID 1000 calcula el retraso entre la orden de marcha y la aparición de la información de velocidad, si este tiempo es superior a un valor fijado por el parámetro  $VT_{TDEM}$ , se activa la salida fallo y el regulador ordena el cierre del órgano regulador.

En el momento en que el grupo alcanza y sobrepasa el umbral definido por el parámetro VT\_SRA (velocidad de doblamiento), la limitación de apertura vuelve al valor LO\_RABT (apertura de reducción de aceleración), teniendo como consecuencia una reducción en la aceleración del grupo. El valor preajustado del parámetro LO\_RABT es siempre superior al de apertura de marcha de vacío, de acuerdo con el salto hidráulico o caída neta más baja.

La fase de arranque finaliza cuando la velocidad, al aumentar, alcanza el umbral definido por el parámetro VT\_PID; los parámetros LO\_DEM, LO\_RABT, VT\_SRA, VT\_PID y VT\_TDEM son esenciales para una aceleración correcta de la unidad generadora.

#### **4.2.2.3 Regulación**

En esta fase de funcionamiento, la acción proporcional integral derivada (PID) del regulador entra en juego, para ello, el DIGIPID 1000 utiliza el juego de parámetros S2 de estabilidad de marcha en vacío; se trata de parámetros S2\_BP (obligatoriamente ajustados a 0), S2\_BT, S2\_N, S2\_TN y S2\_TD.

El parámetro S2\_TCF es utilizado para afinar el control del proceso de sincronización.

La limitación de apertura es controlada por la variable LOFAV, esta variable es ponderada por medio del potenciómetro P2 que se ubica en la parte delantera del DIGIPID 1000.

La siguiente tabla describe la relación entre la variable LOFAV, el potenciómetro P2 y el limitador de apertura (variación lineal).

**Tabla I. Relaciones entre P2, LOFAV y el limitador de apertura**

<b>Posición de P2</b>	<b>Valor de LOFAV</b>	<b>Posición del limitador</b>
Mínima (tope sentido contrario agujas reloj)	0/10	Totalmente dentro
Máxima (tope sentido agujas reloj)	10/10	Totalmente fuera

Por lo general, se regula la variable LOFAV para autorizar la potencia máxima deseada en explotación. Opcionalmente, es posible dirigir la limitación de apertura mediante una señal analógica externa en la que puede aplicarse una ley de linealización.

Al final de la secuencia de arranque, el grupo alcanza una velocidad estabilizada sobre la consigna interna de velocidad, entonces el alternador está normalmente excitado.

Si el regulador está equipado con la opción umbral de velocidad, las salidas todo o nada (salidas digitales) se conmutan a medida que los umbrales programados se alcanzan.

#### **4.2.3 Arranque automático por retroalimentación de voltaje o en funcionamiento en isla**

A diferencia del arranque normal, la orden de marcha se aplica cuando el disyuntor del grupo (interruptor de la unidad generadora) ya está cerrado en una línea fuera de tensión.

Desde el inicio del procedimiento, el juego de parámetros en cuestión es el de la marcha conectada, es decir, el juego S1; se trata de los parámetros S1\_BP, S1\_BT, S1\_N, S1\_TN, S1\_TD y S1\_TCF.

Por lo general, los parámetros mencionados son el resultado de un estudio de estabilidad.

#### **4.2.3.1 Preparación**

Las condiciones requeridas en el momento del arranque son las siguientes:

- Entrada ETOR 6 pasa al nivel inferior (desexcitación del relé R1), disyuntor cerrado.
- Entrada ETOR 0 pasa al nivel inferior (desexcitación del relé R7), consigna de velocidad en modalidad +/- velocidad.

#### **4.2.3.2 Condición de arranque**

De conformidad con el arranque normal, el arranque del grupo se efectúa por la excitación del relé R0 (entrada ETOR 1 en estado superior), de la misma forma, el arranque se puede efectuar únicamente después de controlar la ausencia de fallos. Las operaciones de arranque y aceleración son similares a las del arranque normal.

#### **4.2.4 Sincronización**

Ésta concierne únicamente al arranque normal. La consigna de velocidad evoluciona según las ordenes + velocidad ó – velocidad (entrada ETOR 4, relé R21 y entrada ETOR 5, relé R22 respectivamente.) El sincronizador acoplador o el mando manual externo ordenan esta variación de velocidad (teclas.)

Durante la aplicación de las órdenes +/- velocidad (recuérdese: entrada ETOR 0 en estado inferior, relé R7 desexcitado), la consigna de velocidad sigue la evolución de una rampa, la duración de la rampa está definida por el parámetro S2\_TCF; para que el regulador tenga en cuenta los pulsos, su duración debe ser superior a 10 milisegundos.

Si los mandos + velocidad y – velocidad aparecen simultáneamente, el mando – velocidad tiene prioridad.

La evolución de la consigna de velocidad está limitada por el techo CF\_VMAX y por el suelo CF\_VMIN. Por defecto, estos topes son regulables a +/- 10% de la velocidad nominal, pero es posible asignarles otro valor.

En particular, es interesante modificar el valor del parámetro CF\_VMIN para las operaciones de secado del alternador (ver sección 5.6.5.4) o el de CF\_VMAX para llevar a cabo los ensayos de sobre velocidad.

#### **4.2.5 Acoplamiento**

El cierre del disyuntor debe provocar inmediatamente el paso al estado inferior de la entrada ETOR 6 (desexcitación del relé R1.) Durante el cierre del disyuntor, el regulador conmuta internamente la consigna de velocidad corriente sobre la de referencia (interna.)

Los parámetros de regulación de velocidad utilizados se convierten en el juego “marcha acoplada” (juego S1); el estatismo permanente es controlado por la variable S1\_BP.

Durante el funcionamiento en red aislada o funcionamiento isla, este juego de parámetros puede calcularse opcionalmente a partir de un estudio de estabilidad.

#### **4.2.6 Toma de carga**

Una vez que el grupo está acoplado a la red (recuérdese que al hablar de grupo se está hablando de unidad de generación o sea turbina – generador), es posible entonces acceder a dos modalidades de regulación secundaria según:

- La modalidad manual.
- La modalidad automática.

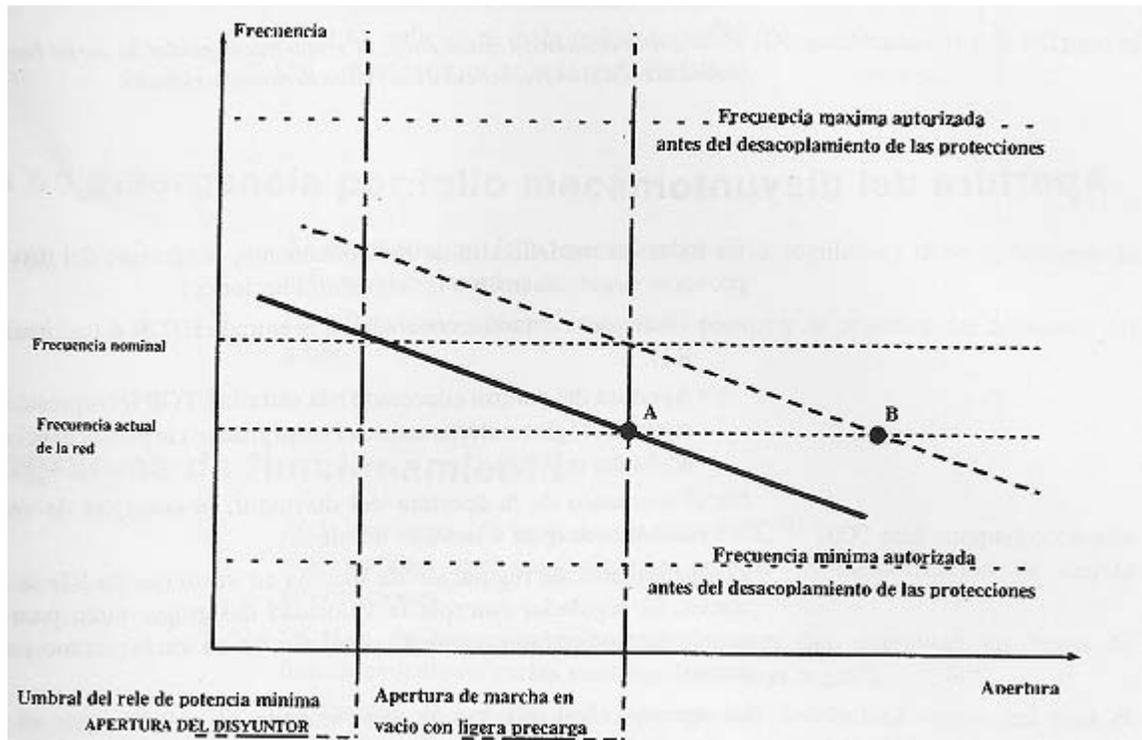
La entrada ETOR 0 (relé R7) permite seleccionar la modalidad de funcionamiento, en ambos casos, el módulo del gradiente de la consigna de carga está controlado por el parámetro S1\_TCF.

En la figura 18, se ha llevado el grupo al sincronismo, y el acoplador ordena el cierre del disyuntor.

Cuando la frecuencia de la red es inferior a su valor nominal, el regulador en la modalidad de conducción automática fija una toma de carga (punto B.)

Cuando el regulador está en la modalidad manual (+/- carga), el grupo permanece sobre la característica que pasa por el punto A mientras su consigna no sea modificada.

**Figura 18. Curva de acoplamiento y modalidades del consignador de carga**



Fuente: GEC Alstom, Manual de descripción y funcionamiento DIGIPID 1000, página 27.

#### 4.2.6.1 Modalidad manual

En modalidad manual (contacto conectado a la entrada ETOR 0 abierto, relé R7 desexcitado), la toma de carga se efectúa a través de las órdenes +/- carga (entradas ETOR 4 y ETOR 5, relé R21 y R22 respectivamente.)

Inmediatamente después del acoplamiento y en ausencia de la orden +/- carga, el grupo funciona con carga prácticamente nula, incluso si la frecuencia de la red en el momento del acoplamiento es diferente del valor nominal. Sin

embargo, si sobrevinieran variaciones de frecuencia en la red después del acoplamiento, el regulador las tomaría en cuenta (regulación primaria.)

En caso de mando simultáneo de + carga y – carga, el mando – carga tiene prioridad.

#### **4.2.6.2 Modalidad automática**

Cuando el regulador se encuentra en modalidad automática (ETOR 0 en el estado superior, relé R7 excitado), la consigna analógica de carga (EANA 1) fija la característica estática de funcionamiento. El grupo toma inmediatamente la carga si la frecuencia de la red se lo pide.

En esta modalidad, el grupo puede perder la carga hasta la potencia nula si la frecuencia de la red es demasiado elevada.

#### **4.2.7 Apertura del disyuntor**

En todas las modalidades de funcionamiento, la apertura del disyuntor debe provocar simultáneamente las siguientes acciones:

- Cierre del contacto conectado en la entrada ETOR 6 (excitación del relé R1.)
- Apertura del control conectado a la entrada ETOR 0 (supresión de la consigna analógica externa sobre el consignador carga frecuencia, desexcitación del relé R7.)

En el momento de la apertura del disyuntor, la consigna de velocidad es inmediatamente igual a su valor nominal.

Los parámetros de regulación de marcha en vacío (juego S2) se activan de nuevo. El regulador controla la velocidad del grupo, tanto para un nuevo acoplamiento (retorno automático en marcha en vacío), como para el paro normal.

La apertura del servomotor está limitada al máximo por el valor del parámetro LO\_RABT.

#### **4.2.8 Paro del grupo**

##### **4.2.8.1 Paro normal**

En este procedimiento, el grupo se descarga progresivamente. La orden de paro se aplica entonces una vez que el disyuntor del grupo se haya abierto. Se deben cumplir las acciones siguientes:

- Coloque el consignador de carga en la modalidad (+/-), (desexcitación del relé R7, paso al nivel inferior de la entrada ETOR 0.)
- Descargue el grupo reduciendo la consigna de carga, actuando en la entrada – velocidad/carga (excitación del relé R22, paso al nivel superior de la entrada ETOR 5.)

Un contacto sobre el órgano regulador o un relé de potencia pueden entonces dar la orden de apertura del disyuntor (excitación de R1, paso a nivel superior de la entrada ETOR 6.)

El procedimiento de paro normal se consigue aplicando la orden de parada (desexcitación de R0, paso al nivel inferior de la entrada ETOR 1.)

Se suprime entonces el mando del accionador mediante el regulador. El servomotor cierra en su tiempo de maniobra y la máquina se detiene normalmente, el regulador queda bajo tensión.

#### **4.2.8.2 Paro de emergencia por fallo eléctrico**

En este procedimiento, al conocerse un fallo eléctrico, debe producirse lo siguiente:

- La apertura del disyuntor del grupo (excitación del relé R1, paso al nivel superior de la entrada ETOR 6.)
- La aplicación de la orden de paro (desexcitación del relé R0, paso al nivel inferior de la entrada ETOR 1.)

#### **4.2.8.3 Paro de emergencia por fallo mecánico**

Al detectarse un fallo mecánico (o fallo regulador) debe provocarse la aplicación de la orden de paro. La información de potencia nula debe provocar la apertura del disyuntor del grupo.

### **4.3 Histogramas de operación (bitácoras)**

En la configuración estándar, el DIGIPID 1000 está equipado con una funcionalidad suplementaria que permite la memorización de ciertas informaciones; se trata de tres histogramas permanentes que acumulan las horas de funcionamiento de varias variables (una “caja negra”.) Siendo éstas:

- La función de reparto de la apertura del distribuidor, curva útil para el mantenimiento preventivo, es la primera magnitud vigilada.

- La velocidad de funcionamiento de la máquina y la corriente de mando del accionador son las otras dos magnitudes registradas.

El seguimiento de la velocidad es útil cuando se desea conocer con precisión las fluctuaciones de velocidad de la máquina y, la vigilancia de la corriente de mando del accionador es representativa del funcionamiento normal o no.

Los histogramas se construyen a medida que avanza el funcionamiento con un segundo de resolución temporal, cada 24 horas, estos histogramas se guardan en memoria del tipo EEPROM.

La extracción de los histogramas únicamente es posible a partir del programa STATUS, si se produce una interrupción de la alimentación antes de la transferencia en memoria EEPROM, se pierde toda la información del día.

#### **4.4 Conjugación**

Para la regulación de las máquinas Kaplan o Bulbo, es necesario poner en conjugación el segundo órgano regulador, en función del salto hidráulico o caída neta de la máquina.

Las leyes de conjugación se definen para cada altura de salto seleccionada por una serie de parejas de puntos; para una altura de salto dada, 10 pares de valores como máximo determinan una ley.

La interpolación hecha por el regulador permite redondear los ángulos de las curvas, y por lo tanto reducir los efectos de cambios bruscos de las pendientes.

Es posible programar hasta siete leyes diferentes en función del salto, la programación requiere una herramienta de diálogo como un ordenador equipado con el *software* STATUS.

#### 4.5 Parámetros para el usuario

En esta sección se presentan, en forma de tablas, los parámetros a los que tiene acceso el usuario.

**Tabla II. Parámetros de la consigna carga/frecuencia**

<b>Nombre</b>	<b>Definición</b>	<b>Unidades</b>
CF_VMAX	Consigna de velocidad máxima	Valor reducido de la velocidad nominal
CF_VMIN	Consigna de velocidad mínima	Valor reducido de la velocidad nominal

**Fuente:** GEC Alsthom, Manual de descripción y funcionamiento DIGIPID 1000, página 32.

**Tabla III. Parámetros del limitador de apertura**

<b>Nombre</b>	<b>Definición</b>	<b>Unidades</b>
LO_DEM	Limitador de aperturas de arranque	Valor reducido de la apertura total
LO_RABT	Limitador de apertura de reducción de aceleración	Valor reducido de la apertura total

**Fuente:** GEC Alsthom, Manual de descripción y funcionamiento DIGIPID 1000, página 32.

**Tabla IV. Parámetros de la regulación de velocidad (disyuntor cerrado)  
juego S1: red infinita – juego S3: red aislada**

<b>Nombre</b>	<b>Definición</b>	<b>Unidades</b>
S1_BP, S3_BP	Estatismo permanente del bucle de frecuencia	Valor reducido
S1_BT, S3_BT	Estatismo transitorio del bucle de frecuencia	Sin unidad
S1_N, S3_N	Coefficiente de eficacia del acelerómetro	Sin unidad
S1_TCF, S3_MF	Aceleración máxima normalizada	Segundo
S1_TD, S3_TD	Constante de integración 1 (bucle de frecuencia)	Segundo
S1_TD2, S3_TD2	Constante de integración 2 (bucle de frecuencia)	Segundo
S1_TN, S3_TN	Constante de derivación del acelerómetro	Segundo

Fuente: GEC Alstom, Manual de descripción y funcionamiento DIGIPID 1000, página 32.

**Tabla V. Parámetros de la regulación de velocidad (disyuntor abierto)**

<b>Nombre</b>	<b>Definición</b>	<b>Unidades</b>
S2_BP, S4_BP	Estatismo permanente del bucle de frecuencia	Valor reducido
S2_BT, S4_BT	Estatismo transitorio del bucle de frecuencia	Sin unidad
S2_N, S4_N	Coefficiente de eficacia del acelerómetro	Sin unidad
S2_TCF, S4_TCF	Aceleración máxima normalizada	Segundo
S2_TD, S4_TD	Constante de integración 1 (bucle de frecuencia)	Segundo
S2_TD2, S4_TD2	Constante de integración 2 (bucle de frecuencia)	Segundo
S2_TN, S4_TN	Constante de derivación del acelerómetro	Segundo

Fuente: GEC Alstom, Manual de descripción y funcionamiento DIGIPID 1000, página 32.

**Tabla VI. Parámetros de la regulación de potencia**

<b>Nombre</b>	<b>Definición</b>	<b>Unidades</b>
PU_BTLW	Ganancia proporcional (limitador de potencia)	Valor reducido
PU_TDLW	Tiempo de integración (limitador de potencia)	Segundo

Fuente: GEC Alstom, Manual de descripción y funcionamiento DIGIPID 1000, página 33.

**Tabla VII. Parámetros del funcionamiento del posicionador**

<b>Nombre</b>	<b>Definición</b>	<b>Unidades</b>
S5_TCF	Aceleración máxima modalidad manual	Segundo

Fuente: GEC Alsthom, Manual de descripción y funcionamiento DIGIPID 1000, página 33.

**Tabla VIII. Parámetros del sistema**

<b>Nombre</b>	<b>Definición</b>	<b>Unidades</b>
SY_ST1S	Umbral de detección de la salida STOR 1	Valor reducido de la variable en que se dispara el umbral
SY_ST2S	Umbral de detección de la salida STOR 2	Valor reducido de la variable en que se dispara el umbral
SY_ST3S	Umbral de detección de la salida STOR 3	Valor reducido de la variable en que se dispara el umbral

Fuente: GEC Alsthom, Manual de descripción y funcionamiento DIGIPID 1000, página 33.

**Tabla IX. Parámetros de medición de la velocidad**

<b>Nombre</b>	<b>Definición</b>	<b>Unidades</b>
VT_PID	Umbral de marcha en regulación proporcional integral derivada	Valor reducido de la velocidad nominal
VT_SRA	Umbral de velocidad de reducción de la aceleración	Valor reducido de la velocidad nominal

Fuente: GEC Alsthom, Manual de descripción y funcionamiento DIGIPID 1000, página 33.

## 5. FUNCIONAMIENTO Y PUESTA EN SERVICIO DEL DIGIPID 1000 EN LA RED

El funcionamiento del DIGIPID 1000 en la red está regido por los parámetros programados al gobernador, por la turbina hidráulica, por el generador y por el sistema eléctrico de potencia. El modelo que se analizará es el 5431, utilizado en las unidades de generación de la pequeña central hidroeléctrica Poza Verde.

### 5.1. Datos de la turbina hidráulica

➤ Proveedor	:ALSTOM MINIHIDRO
➤ Tipo	:FHSpS
➤ Potencia nominal	:4170 kW
➤ Caída neta nominal	:130 m
➤ Caudal nominal	:3.5 m <sup>3</sup> /s
➤ Velocidad nominal	:900 rpm
➤ Velocidad de embalamiento	:1580 rpm
➤ Número de directrices	:16
➤ Tipo de distribuidor	:Bielas de seguridad
➤ Número de álabes del rodete	:13
➤ Inercia turbina-generador	:0.5575 T* m <sup>2</sup>
➤ Tiempo de apertura de paletas	:5 segundos
➤ Tiempo de cierre de paletas	:5 segundos
➤ Longitud conducto equivalente	:298 metros
➤ Sección conducto equivalente	:1.78 m <sup>2</sup>

## 5.2. Datos del generador síncrono

- Marca :ALSTHOM
- Tipo :AA 56 BVL8-8P
- Polos :8
- Potencia aparente nominal :4478kVA
- Factor de potencia :0.9
- Voltaje nominal :4160 V
- Frecuencia :60 Hz
- Corriente nominal :621.5 A
- Velocidad nominal :900 RPM
- Tipo de aislamiento :F
- Regulador automático de voltaje :Basler

## 5.3 Principales parámetros de programación

### 5.3.1 Ajuste de los parámetros

El sistema digital de control de carga y regulación de velocidad DIGIPID 1000, está diseñado para obtener la regulación de velocidad en la turbina a efecto de regular la frecuencia del complejo de generación.

El ajuste de los parámetros en el DIGIPID 1000 es accesible solamente al usuario que esté provisto de una herramienta de diálogo, que en este caso es la terminal de mantenimiento u ordenador PC compatible.

Por lo general, no se aconseja efectuar ajustes directamente en un grupo que esté conectado a una red aislada. Debido a las probables dificultades para

la buena marcha de una red aislada, es preferible efectuar previamente un estudio de estabilidad del grupo, a continuación entrar en el DIGIPID 1000, puesto que el juego de parámetros resulta del estudio; esta forma de proceder presenta una garantía eficaz de buen funcionamiento.

### **5.3.2 Hipótesis de cálculo**

Se considera que el conjunto “conducción – turbina – alternador” es asimilable a un conjunto “conducción – orificio – masas giratorias”.

La conducción permite tener en cuenta el golpe de ariete de masa, pero no tiene en cuenta el golpe de ariete de onda.

Se debe considerar que la red eléctrica está aquejada de un coeficiente de autorregulación nulo, que es el peor de los casos.

### **5.3.3 Cálculo del valor de los principales parámetros**

La pequeña central hidroeléctrica Poza Verde, está equipada con 2 turbinas tipo Francis y es alimentada por una tubería forzada, los datos necesarios para el cálculo de los parámetros principales fueron proporcionados en las secciones 5.1 y 5.2 del presente capítulo y las ecuaciones necesarias para efectuar los cálculos, fueron presentadas en el capítulo 2.

- Tiempo de arranque hidráulico

$$T_w = \frac{(3.5) \cdot (298)}{(9.8) \cdot (130) \cdot (1.78)}$$

$$T_w = 0.459933$$

$$T_w = 0.46 \text{seg.}$$

- Tiempo de arranque mecánico

$$T_a = \frac{(506.81) \cdot (94.247)^2}{4030200}$$

$$T_a = 1.117037$$

$$T_a = 1.12 \text{seg.}$$

Con los valores de tiempos de arranques ya calculados, es posible realizar el cálculo de los principales coeficientes PID del regulador de velocidad.

- Tiempo de la reacción transitoria  $T_d$

$$T_d = 3 \cdot T_w - 0.5$$

Con  $T_d$  en segundos (constante de tiempo de integración), válida si se cumple la condición que el tiempo de arranque hidráulico sea mayor que 0.5 segundos ( $T_w > 0.5 \text{ seg.}$ )

$$T_d = (3 \cdot 0.46) - 0.5$$

$$T_d = 0.88 \text{seg.}$$

- Tiempo de dosificación de la derivación  $T_n$

$$T_n = 0.75 \cdot T_w$$

Con  $T_n$  en segundos (constante de tiempo de la derivación).

$$T_n = 0.75 \cdot 0.46$$

$$T_n = 0.345 \text{seg.}$$

- Estatismo transitorio velocidad/carrera  $bt$

$$bt = 1.5 \cdot \frac{T_w}{T_a}$$

Con  $bt$  en valor por unidad o valor normalizado.

$$bt = 1.5 \cdot \frac{0.46}{1.12}$$

$$bt = 0.616071$$

En la configuración estándar del DIGIPID 1000, la asignación de los valores a los parámetros se realiza de la siguiente forma (siempre que se cuente con la ayuda de la herramienta de mantenimiento):

- $T_d$  es el valor del parámetro S1\_TD ó S3\_TD.
- $T_n$  es el valor del parámetro S1\_TN ó S3\_TN.
- $bt$  es el valor del parámetro S1\_BT ó S3\_BT.
- El parámetro S1\_N ó S3\_N se ajusta normalmente a 10.

Los parámetros aproximativos calculados por el método anterior arrojan resultados correctos en general, pero no permiten obtener respuestas óptimas teniendo en cuenta la hipótesis de cálculo.

Para obtener los parámetros PID óptimos del grupo, es necesario realizar un estudio de estabilidad, puesto que el juego de parámetros resulta de éste y sus resultados son necesarios para el buen funcionamiento del complejo generador.

Los parámetros de regulación obtenidos del estudio de estabilidad de los complejos generadores, con un nivel de optimización N=10, se muestran a continuación:

**Tabla X. Parámetros PID de regulación**

PARÁMETRO	VALOR	DIMENSIONAL
Td	3.00	Segundos
Tn	0.20	Segundos
Bt	1.30	P. U.

Fuente: GEC Alsthom, Cálculo de estabilidad de la regulación de velocidad, página 13.

#### **5.3.4 Potenciómetro de regulación “global” de estabilidad**

El potenciómetro P1, ubicado en la parte delantera de la caja DIGIPID 1000, permite hacer una evolución del parámetro de estatismo transitorio del bucle de velocidad alrededor de los valores prerregulados en el sentido de una mejor respuesta del procedimiento. Su acción es activa sea cual sea la posición del disyuntor.

Si P1 está sobre el tope +:

- $bt = S1\_BT$  ó  $S3\_BT$  multiplicado por 1.2 (disyuntor cerrado).
- $bt = S2\_BT$  multiplicado por 1.2 (disyuntor abierto).

Si P1 está en el tope -:

- $bt = S1\_BT$  ó  $S3\_BT$  multiplicado por 0.8 (disyuntor cerrado).
- $bt = S2\_BT$  multiplicado por 0.8 (disyuntor abierto).

## **5.4 Puesta en marcha del regulador DIGIPID 1000**

Esta sección describe los procedimientos a respetar al momento de la puesta en marcha del DIGIPID 1000.

### **5.4.1 Verificaciones**

#### **5.4.1.1 Verificaciones previas**

- Verifique la ausencia de cuerpos extraños en el interior de la caja del regulador DIGIPID 1000.

#### **5.4.1.2 Verificación del cableado**

- Se debe verificar que los cables estén correctamente fijados en los bornes y que las conexiones de los blindajes se ajusten al esquema de conexiones.
- El peso de los cables no debe arrancar los conectores y los cables deben estar bloqueados mecánicamente a la salida de la bornera.

#### **5.4.1.3 Verificación de la alimentación**

- Antes de poner el regulador bajo tensión, se debe verificar que la tensión de alimentación se encuentre en la zona utilizada para su utilización (la zona viene etiquetada en la caja del DIGIPID 1000).

#### **5.4.1.4 Verificación de la configuración**

- Las entradas TOR deben estar inicializadas en posición correcta y deben encontrarse libres de cualquier potencial externo.
- Verificar que las entradas ANA (entradas analógicas) utilizadas estén conectadas a generadores de tensión o de corriente compatibles.
- Verificar en la entrada de frecuencia la concordancia de los valores frecuencia ( $< 5$  kHz) y de tensión ( $< 100$  voltios).
- El esquema realizado debe cumplir con las recomendaciones de la especificación de arranque y parada de la aplicación.

#### **5.4.1.5 Verificación del captador de posición**

- El entrehierro (distancia entre la leva y el captador) debe aumentar con la apertura del servomotor.

#### **5.4.2 Puesta en tensión del regulador DIGIPID 1000**

En el momento de la primera puesta en tensión, el DIGIPID 1000 detecta la aparición de la alimentación como una interrupción de la misma (fallo).

En cada puesta en tensión, el regulador pasa por una fase de inicialización de cinco segundos durante la cual se posicionan las salidas de la siguiente forma:

- Salidas TOR: contacto abierto.
- Salidas tele indicación: corriente de salida = 0 mA.

Salvo indicación en contra, no se debe cortar sistemáticamente la alimentación del DIGIPID 1000. El corte de la alimentación del regulador debe producirse normalmente para asegurar el corte eléctrico del accionador.

#### **5.4.3 Corte de la alimentación del regulador**

Cuando desaparece la tensión de alimentación, el DIGIPID 1000 deja de pilotar el accionador. Sin embargo, si ningún sistema seguidor hidráulico toma el mando de la regulación, la apertura del órgano regulador del sistema evoluciona según la tendencia mecánica del accionador.

Por lo tanto, se debe verificar, mediante un ensayo real, que el corte de alimentación del regulador controla bien la evolución de la apertura del órgano regulador en el sentido que conviene para la seguridad del complejo de generación.

En este tipo de situaciones, la salida STOR 0 del regulador se encuentra en el estado superior (“presencia fallo”).

#### **5.4.4 Seguridad del control del accionador**

Deben instalarse órganos de seguridad en función del plan de seguridad del complejo de generación.

Para asegurar la fiabilidad del mando de parada normal, la entrada ETOR 1 (relé de control R0) actúa en las dos siguientes funciones independientes del regulador:

1. Impulsos de mando del nivel de potencia del accionador (acción directa y prioritaria, independiente del tratamiento del microprocesador).
2. Gestión de las funciones de regulación por el microprocesador.

El plan de seguridad de la instalación puede elegir doblar la seguridad de la orden de parada por la agregación de un electrodistribuidor de seguridad en el circuito de mando hidráulico o elegir hacer intervenir otros órganos de seguridad como válvulas de seguridad, de pie, etc.

#### **5.4.5 Seguridad del DIGIPID 1000 por perro guardia**

Aunque se hayan tomado todas las medidas de protección y blindaje de los cables del regulador en su entorno, es posible que una perturbación transitoria sobrepase el umbral de indemnidad de algunos circuitos.

En este caso, es recomendable un retorno armonioso al funcionamiento normal. Consecuentemente, se han tomado las medidas en la concepción del regulador para permitir el re arranque de la aplicación de regulación.

El microprocesador genera una señal periódica desde el momento en que su programa se ejecuta normalmente. Esta señal periódica controla una temporización rearmable cuyo valor está comprendido entre 10 milisegundos y 16 milisegundos que es capaz de lanzar el programa de rearmado.

Si el microprocesador se bloquea, la señal periódica desaparece y el tope de vigilancia provoca una puesta a cero (RAZ) de los mandos, activa la salida fallo del DIGIPID 1000 y memoriza dicho fallo.

## **5.5 Ajustes previos al arranque del grupo**

### **5.5.1 Ajuste de la señal captadora de posición del servomotor**

El DIGIPID 1000 ha sido configurado, antes de su entrega, para una situación estándar en que deban reconocerse los topes de cierre y apertura de los órganos reguladores existentes.

A pesar de lo anterior, es necesario llevar a cabo una comprobación de los ajustes iniciales, tanto en el momento de la puesta en marcha, como en el cambio de uno de los elementos del bucle de posición (caja DIGIPID 1000, caja de retroalimentación).

En el procedimiento descrito a continuación se supone que se puede maniobrar el servomotor con la máquina parada, es decir sin agua. Si dicha operación es imposible, se debe consultar con el proveedor para buscar un procedimiento específico para su aplicación.

La reanudación de los ajustes se efectúa calibrando correctamente la tensión V ACH0, que es la tensión interna al módulo y, corresponde a la entrada EANA3, bornes 26 – 27 – 28 de la bornera J02 de 33 bornes extraíble.

El ajuste de V ACH0 se debe llevar a cabo por medio de los potenciómetros P01 y P02, potenciómetros que son accesibles directamente, siempre y cuando se extraiga la parte anterior del regulador (la tensión V ACH0 está limitada entre 0 y +5 voltios). Se detectará un fallo “captador de posición” si en un caso la tensión V ACH0 fuera inferior a 0.1 voltios.

La extracción segura de la parte anterior de la caja del DIGIPID 1000 se lleva a cabo teniendo el cuidado de realizar correctamente las siguientes acciones:

- Corte de alimentación del regulador.
- Aflojamiento de cada tornillo de fijación (5 mm.)
- Extracción de la parte delantera, esto se lleva a cabo tirando de la misma hacia delante.
- Extracción total de los tornillos de fijación, teniendo el cuidado de que éstos permanezcan en la parte delantera.

#### **5.5.1.1 Función de los potenciómetros P01 y P02**

El potenciómetro P01 sirve para ajustar el tope “5 voltios” (apertura), una acción en éste, en el sentido de las agujas del reloj provoca un aumento de V ACH0.

El potenciómetro P02 sirve para ajustar el tope “0.2 voltios” (cierre), una acción en éste, en el sentido de las agujas del reloj provoca una disminución de V ACH0.

### **5.5.2 Ajuste del tope de cierre**

Después del ajuste, el valor de la variable V ACH0 tendría que ser igual a 0.22 voltios (tómese en cuenta que todos los valores de voltaje están en voltios de corriente directa).

En las unidades de estudio se utilizan captadores de 4 – 20 miliamperios, el valor V ACH0 debe ser ajustado para una corriente del captador de 6 miliamperios, o sea una tensión de 230 milivoltios entre los bornes 27 y 28 de la caja DIGIPID 1000.

La forma de ajuste es la siguiente: Haciendo uso del pulsador en la cara delantera, se debe seleccionar el punto de prueba No. 14 que es el de visualización del captador de posición del servomotor, después de llevar a cabo esta acción el valor de V ACH0 deberá aparecer en el visualizador, en milivoltios.

Luego, se debe posicionar el órgano regulador en tope cierre, (éste debe ser el caso mientras que la orden de marcha no esté activada), y verificar que se cuente con un voltaje de  $230 \pm 5$  milivoltios entre los bornes 27 y 28 de la caja DIGIPID 1000. Se debe manipular el potenciómetro P02 hasta que el visualizador muestre el valor: 220.

Después de llevar a cabo el ajuste, debe girarse P02 a fondo en el sentido contrario de las agujas del reloj y se debe verificar que el valor

visualizado esté comprendido entre 500 y 700. De no presentarse esta condición, se debe manipular el potenciómetro P01 para acercarse a dichos valores. Posteriormente, se debe manipular nuevamente el potenciómetro P02 de manera que se obtenga de nuevo el valor 220 en el visualizador.

### **5.5.3 Ajuste del tope de apertura**

Después del ajuste, el valor de la variable V ACH0 debería ser igual a 4.98 voltios.

Este ajuste se lleva a cabo de la siguiente forma: se debe conservar la visualización del captador de posición del servomotor, y se debe posicionar el órgano regulador en el tope de apertura, para esto último, hay que posicionarse en la modalidad “funcionamiento en posicionador” (funcionamiento en modo *test*, para el caso de las unidades de generación de la pequeña central en estudio), para esto véase la sección de ensayos específicos.

Se debe colocar el potenciómetro P2 (parte delantera) en su valor máximo en el sentido de las agujas del reloj para que se pueda liberar la limitación de apertura, al realizar esta maniobra se debe hacer con absoluta seguridad, luego debe darse una orden de marcha.

Accionando el mando “+”, que es la excitación del relé R21, se irá abriendo el servomotor hasta obtener la apertura completa del mismo, después de alcanzar este estado hay que verificar mecánicamente que en efecto se alcanzó el tope de apertura, habiendo alcanzado el tope debe manipularse el potenciómetro P01 hasta que el visualizador emita el valor 4980.

Es necesario verificar el ajuste del tope cierre “0.2 voltios” después de haberse ajustado el pote apertura “5 voltios”. Después del ajuste, se debe posicionar el potenciómetro P2 a su valor inicial.

## **5.6 Pruebas a la unidad de generación gobernada por el DIGIPID 1000**

### **5.6.1 Pruebas comunes**

#### **5.6.1.1 Prueba con máquina parada**

La prueba o ensayo mas común que se puede llevar a cabo cuando la unidad de generación se encuentra fuera de servicio es la verificación rápida de la realimentación de posición del servomotor.

Para llevar a cabo esta prueba, deben tomarse en cuenta las siguientes especificaciones:

- Debe colocarse el grupo en agua muerta, se llama grupo en agua muerta cuando el órgano de guardia se mantiene voluntariamente cerrado, es decir sin circulación de agua en la turbina.
- Debe seleccionarse la modalidad “funcionamiento en posicionador” (modo *test* para las máquinas en estudio), para esto véase la sección de “ensayos específicos”.
- Se debe accionar la orden de marcha de la unidad por medio de la excitación del relé R0 (selector de arranque para las máquinas en estudio).
- Aplicar ordenes de apertura del distribuidor para verificar el desplazamiento del cilindro (servomotor), se debe verificar que también sea posible reducir la apertura mediante acción en el

potenciómetro P2 en el sentido inverso de las agujas del reloj (selector cierre/apertura para las máquinas en estudio).

- La limitación de apertura debe ser ajustada por medio del potenciómetro P2.

### **5.6.1.2 Pruebas con la unidad en marcha**

Durante el primer arranque, se debe verificar la acción de las medidas de seguridad, en particular hay que tomar en cuenta la información “fallo del regulador” en las secuencias de parada de la máquina.

Si el potenciómetro P2 no hubiere sido ajustado con la máquina parada, se debe colocar en su valor máximo (100%) en el sentido de las agujas del reloj.

Para seguir la consigna con la obtención de los rendimientos máximos y mejorar la estabilidad del sistema, se puede manipular el potenciómetro P1, sin embargo, hay que tomar en cuenta que la corrección de la estabilidad se realiza a costa de la rapidez de respuesta del DIGIPID 1000 a una variación de carga de la unidad.

### **5.6.2 Pruebas específicas**

Los procedimientos que se dan a conocer a continuación, son únicamente a manera de ejemplo, pero éstos permiten que se lleven a cabo operaciones de verificación y de ajuste del regulador o del complejo de generación.

### **5.6.2.1 Funcionamiento en posicionador**

En esta modalidad de funcionamiento, la regulación de velocidad se pone fuera de servicio mediante el cierre del contacto asociado, esto es llevado a cabo en la entrada ETOR 2 (excitación del relé R20).

La consigna de posición evoluciona según los mandos “+/-“ (ETOR4/R21 y ETOR5/R22) según una rampa ajustable por la programación del parámetro S5\_TCF.

La limitación de apertura, por medio del potenciómetro P2 ubicado en la parte posterior, queda activa.

Como medida de seguridad, el funcionamiento en posicionador debe utilizarse únicamente en un grupo en agua muerta, cuando el regulador se encuentra en esta modalidad de funcionamiento, la detección de una velocidad no nula genera un fallo, y éste hace que el servomotor sea dirigido al cierre.

Deben cumplirse todas las modalidades de seguridad para asegurar la protección de las personas y de los bienes contra los movimientos incontrolados del órgano regulador dirigido.

### **5.6.2.2 Preposicionamiento del servomotor (opcional)**

Se dispone opcionalmente de dos valores de preposicionamiento, si el contacto conectado a la entrada ETOR 3 está cerrado (excitación del relé R25), es posible seleccionar uno u otro valor.

El valor del preposicionamiento seleccionado dependerá entonces del estado de la entrada ETOR 7 (relé R26), es decir:

ETOR 7 = 0	Preposicionamiento 1 (relé R26 desexcitado)
ETOR 7 = 1	Preposicionamiento 2 (relé R26 excitado)

### **5.6.2.3 Prueba de sobre velocidad**

Está prueba puede ser realizada por el usuario que este previsto de una herramienta de diálogo por medio de la modificación del tope máximo del consignador de velocidad.

Se recomienda tomar nota del valor del parámetro CF\_VMAX antes de su modificación para restaurarlo fácilmente al final de la prueba, en las unidades de estudio este valor está ajustado a 1.1.

- a) Se debe modificar el valor del tope del consignador de velocidad CF\_VMAX a un valor que sobrepase ligeramente el umbral de velocidad a verificar.

Es decir, para las máquinas en estudio, su velocidad nominal es de 900 revoluciones por minuto, se ajusta  $CF\_VMAX=1.38$  (138%) para una sobrevelocidad de 1200 revoluciones por minuto.

Por lo que se tiene que:  $CF\_VMAX = 1200/900 + 0.05$ .

Se utiliza un sobrecurso de tope de consigna de + 5% para que sea segura la provocación del dispositivo de detección de sobrevelocidad.

- b) Cuando ya estén reunidas todas las condiciones de seguridad para el ensayo de sobrevelocidad, se debe dar la orden de arranque normal del grupo.

El grupo arranca y aumenta la velocidad hasta su valor nominal, esto lo hace, sea cual sea el valor de CF\_VMAX.

Durante esta secuencia de arranque, los mandos “+ velocidad” no son activados ya que el sincroacoplador no está en servicio.

- c) Se debe evolucionar manualmente la consigna de velocidad (mando “+ velocidad” en el consignador de velocidad), según la rampa utilizada en la fase normal de sincronización, esto hasta alcanzar la actuación de la protección de exceso de velocidad. En todos los casos, la velocidad del grupo no podrá exceder del valor CF\_VMAX.

Durante cualquier operación, una acción en el mando “- velocidad” permite reducir la consigna de velocidad.

Una acción en el parámetro S2\_TCF permite modificar el valor de la rampa de toma de velocidad.

- d) Si no se alcanza la sobrevelocidad (valor insuficiente de CF\_VMAX), debe modificarse el valor del parámetro CF\_VMAX.

Esto es posible en todo momento del funcionamiento, pero, es más lógico conocer con anterioridad el valor del umbral deseado que para las unidades en estudio es de 1200 revoluciones por minuto.

- e) Una vez se haya terminado el ensayo, se debe restablecer el valor de origen al parámetro CF\_VMAX.

#### 5.6.2.4 Operación de secado del generador

Siempre que se cuente con una herramienta de diálogo, se hace posible efectuar el secado del generador bajo el control del DIGIPID 1000. Al igual que en la prueba anterior, se recomienda tomar nota del valor del parámetro CF\_VMIN antes de su modificación para restaurarlo fácilmente al final de la prueba, en las unidades de estudio este valor está ajustado a 0.9.

- a) Para empezar, se debe modificar el valor del tope del consignador de velocidad CF\_VMIN al valor deseado.

Como se sabe, las máquinas en estudio tienen una velocidad nominal de 900 revoluciones por minuto, debe ajustarse CF\_VMIN a 0.8 (80%) para una velocidad de 720 revoluciones por minuto.

Es decir:  $CF\_VMIN = 720/900$

- b) En el momento en el que se hayan reunido todas las condiciones de seguridad para la realización de la prueba, se debe dar orden para arranque normal del complejo generador.

El complejo arranca y aumenta la velocidad hasta que alcanza su valor nominal (900 revoluciones por minuto).

Una vez alcanzada la velocidad nominal, se debe reducir el régimen de rotación de la máquina (por acción en el mando “- velocidad”) hasta que se alcance el tope del consignador ( $CF\_VMIN = 0.8$ ).

- c) Una vez finalizada la prueba, se debe aplicar el valor de origen al parámetro CF\_VMIN (0.9).

## **5.7 Operación de la unidad en régimen permanente**

Las condiciones de operación de un complejo de generación en régimen permanente son estables. En este régimen no se presentan grandes variaciones de frecuencia en la unidad de generación y además, la demanda de potencia real del sistema de carga permanece constante o con variaciones leves.

La regulación de velocidad de la unidad de generación durante la operación en régimen permanente se fundamenta en que, es necesario mantener constante la frecuencia generada (60 hertzios) a pesar de los cambios en la demanda de potencia que pueda sufrir la unidad. Esto se logra a través de la correcta programación de los parámetros del DIGIPID 1000 (parámetros PID).

En la unidad de tiempo se dan pequeñas variaciones en la frecuencia de las unidades de generación, estas pequeñas variaciones de deben a que constantemente la carga conectada al sistema de generación está cambiando.

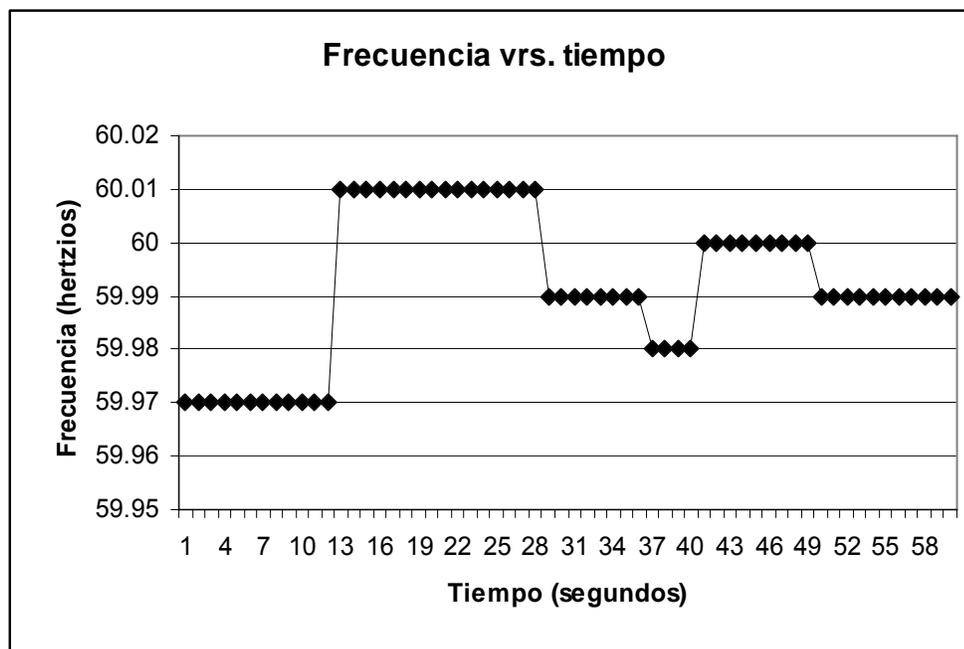
Cuando los cambios en la carga no producen grandes modificaciones en las condiciones de operación de los complejos de generación, éstos entonces se encuentran operando en condiciones de régimen permanente.

### **5.7.1 Gráficos de frecuencia y potencia activa de las unidades de generación**

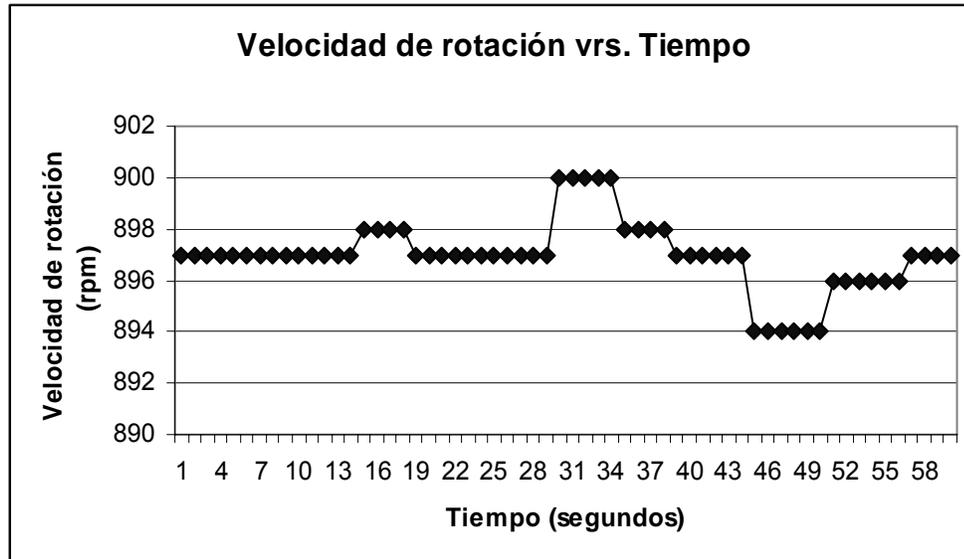
En las figuras 19, 20, 21 y 22 se muestra el comportamiento de la unidad de generación #2 de la central hidroeléctrica Poza Verde, en régimen permanente. Se grafica la frecuencia de generación, la velocidad de rotación, la

potencia activa entregada al sistema y la posición del distribuidor necesaria para mantener estable la operación de dicha unidad, cuando esta programada una consigna de distribuidor de 39%; todas en función del tiempo.

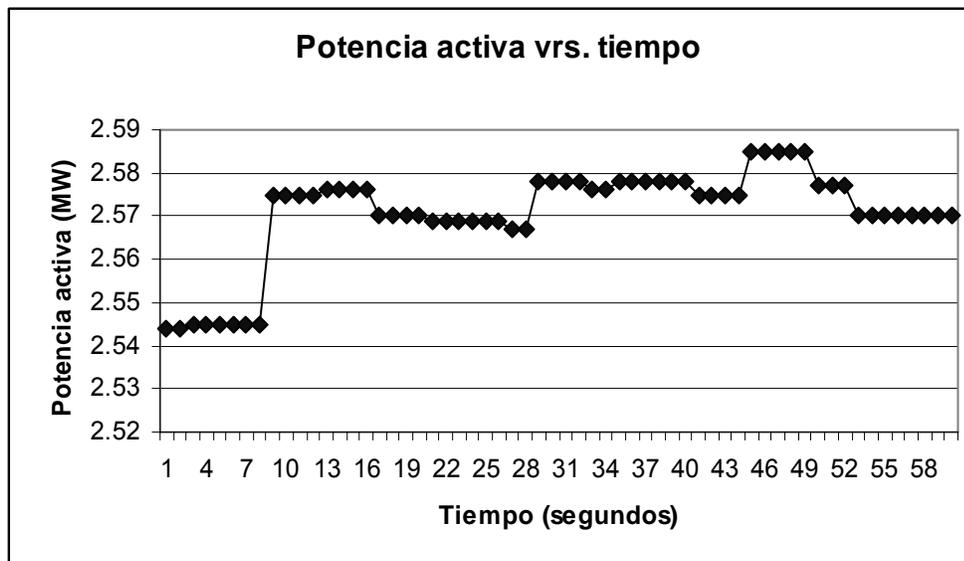
**Figura 19. Régimen permanente, gráfico de frecuencia contra tiempo**



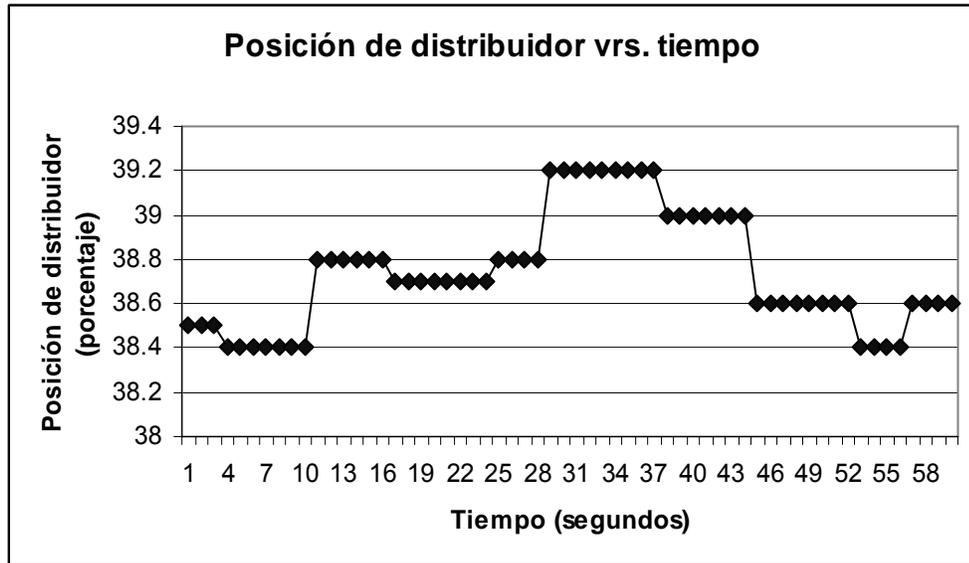
**Figura 20. Régimen permanente, gráfico de velocidad de rotación contra tiempo**



**Figura 21. Régimen permanente, potencia activa contra tiempo**



**Figura 22. Régimen permanente, posición de distribuidor contra tiempo**



### 5.8 Operación de la unidad en régimen transitorio

Algunos de los fenómenos transitorios que pueden presentarse en una unidad de generación son:

- Cuando la unidad de generación se conecta al S.N.I., existe un período de tiempo de régimen transitorio antes que la unidad de generación se estabilice.
- Período transitorio que experimenta la unidad de generación, al cambiar su consigna de carga de operación en régimen permanente.
- Fenómenos transitorios por corto circuito.

- Período transitorio que experimenta la unidad de generación, al cambiar su factor de potencia de operación en régimen permanente.
- Aplicación repentina de carga excesiva a las terminales del generador, que puede darse por salida de otras unidades generadoras, aplicación repentina de cubrimiento de carga excesiva del S.N.I.

Cuando la unidad de generación es afectada por un fenómeno transitorio, la estabilidad de la frecuencia generada dependerá de la rapidez con la que el gobernador pueda actuar y de los parámetros PID programados en el DIGIPID 1000. Esto demuestra la gran importancia al calcular y programar el valor de ajuste de estos parámetros y como se mencionó el valor de éstos se determina por medio de un estudio de estabilidad.

### **5.8.1 Gráficos de frecuencia y potencia activa de la unidades de generación**

En las figuras 23, 24 y 25 se muestra el comportamiento de la unidad de generación en régimen transitorio. El proceso que se grafica, muestra el comportamiento de la frecuencia eléctrica, la potencia activa entregada y la posición del distribuidor durante el proceso de transición al cambiar la consigna de posición del distribuidor, desde un valor de 20% hasta el valor final de 39%.

Figura 23. Régimen transitorio, gráfico de frecuencia contra tiempo

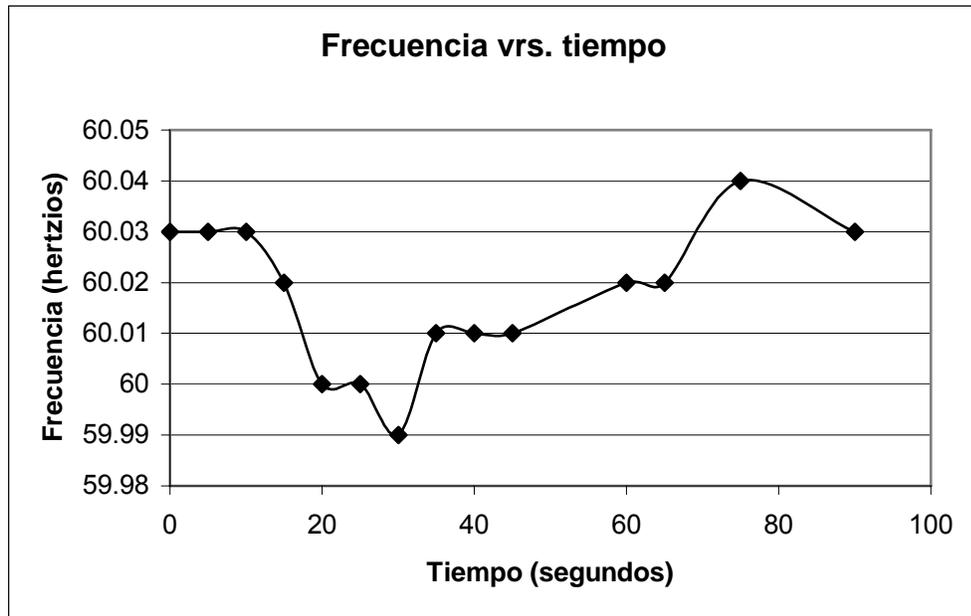
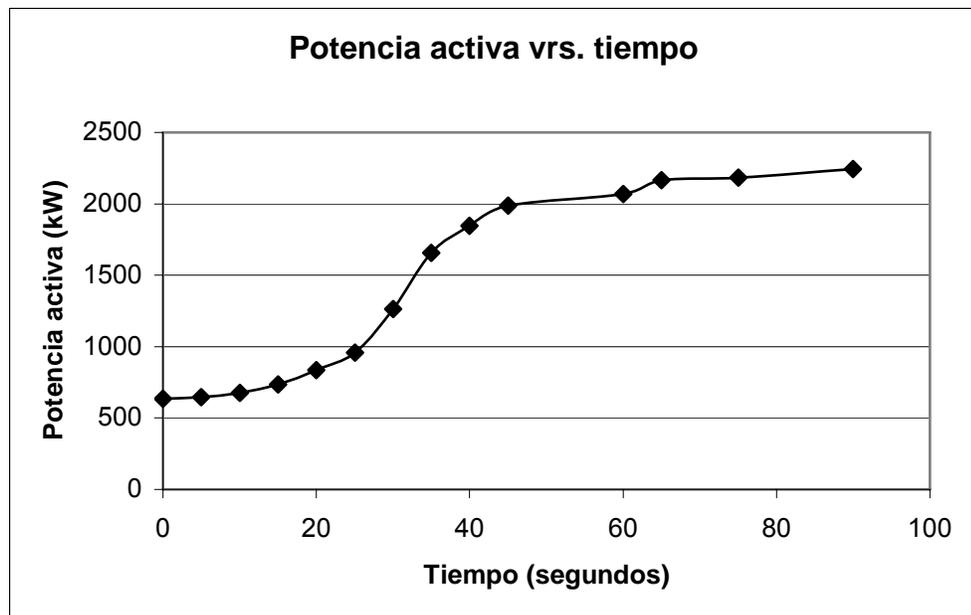
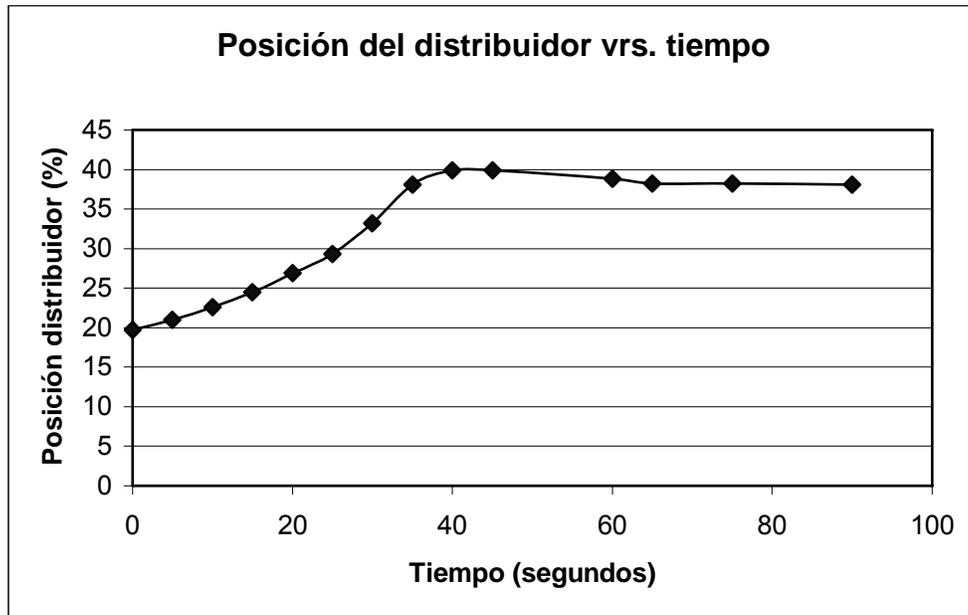


Figura 24. Régimen transitorio, gráfico de potencia activa contra tiempo



**Figura 25. Régimen transitorio, gráfico de posición del distribuidor contra tiempo**





## **6. PROGRAMAS DE MANTENIMIENTO**

### **6.1 Normas de seguridad**

Antes de realizar cualquier intervención del tipo que sea, es preciso conocer las normas de seguridad imperativas descritas a continuación.

- Compruebe que la fuente de alimentación esté desconectada antes de cualquier intervención en el circuito de alimentación y de potencia.
- No desmonte los circuitos impresos del DIGIPID 1000.
- No toque los circuitos impresos ni sus componentes electrónicos.
- Si es absolutamente necesario manipular un componente o un circuito impreso, tómelo suavemente por los lados y deposítelo únicamente en un embalaje de protección electrostático adecuado.
- Cualquier material (como plástico, vinilo, caucho, etc.) que pueda emitir descargas electrostáticas se debe mantener lo más alejado posible del DIGIPID 1000.
- Nunca haga funcionar el regulador sin su cubierta (a excepción de las fases de ajuste.)

### **6.2 Mantenimiento preventivo**

El mantenimiento que debe llevarse a cabo de forma periódica para resguardar el correcto funcionamiento del DIGIPID 1000 es el siguiente:

- Comprobar visualmente el estado de la limpieza de la caja electrónica, en caso de presentarse algún tipo de suciedad proceda a removerla con un limpiador (puede ser una brocha pequeña) destinado únicamente para este fin.
- Verificar el correcto enchufe de los bornes dentro de sus respectivos receptáculos.
- Verificar el apriete de los tornillos de fijación de los cables dentro de las borneras.
- Verificar el buen funcionamiento de los leds indicadores, los cuales indican la presencia de tensión en los bornes del led, emisión y recepción de la conexión serie.
- En funcionamiento normal, no es necesario controlar periódicamente la validez de los parámetros, sin embargo, se debe tener especial cuidado a la hora de una modificación incorrecta de los parámetros en la marcha del grupo o sobre el estado de una red aislada por los operarios equipados con un programa de mantenimiento STATUS.
- Prestar atención especial a los mensajes del visualizador.
- Revisar que haya un buen contacto entre la tuerca y la terminal de conexión a tierra de la carcasa metálica del DIGIPID 1000.
- Verificar la inexistencia de corrosión en las partes metálicas del DIGIPID 1000.

## **6.3 Mantenimiento correctivo**

### **6.3.1 Tipos de fallos**

#### **6.3.1.1 Fallos mayores**

La aparición de un fallo mayor provoca situaciones de los siguientes tipos:

- Paso al estado superior de la salida STOR 0 (desexcitación del relé R29.)
- Indicación del fallo en el visualizador local, parpadeo y visualización del tipo de fallo.
- Orden del órgano regulador hacia el cierre (disparo de la unidad de generación.)

Al presentarse un fallo de este tipo, debe remediarse, incluso si la causa del fallo llegara a desaparecer.

#### **6.3.1.2 Fallos menores**

El visualizador local indica la aparición de un fallo de este tipo. Es posible asignar las salidas STOR 1 y STOR 2 a la indicación de este tipo de fallo. Cuando la máquina está en marcha, un fallo menor se soluciona por si mismo si la causa desaparece. No obstante, el visualizador conserva la visualización del fallo hasta la cancelación de éste en forma manual.

**Tabla XI. Listado de códigos y mensajes de errores visualizables en el visualizador local o por STATUS**

<b>Código</b>	<b>Mensaje de error</b>	<b>Tipo de fallo</b>
1	Error de punto flotante	Mayor
2	Fallo alimentación	Mayor
3	Fallo tacómetro	Mayor
4	Fallo captador servomotor	Mayor
5	Memoria EEPROM virgen	Mayor
6	Fallo consigna analógica 4	Mayor
7	Fallo enlace autómatas	Mayor
8	Fallo consigna analógica 1	Mayor/menor
9	Fallo consigna analógica 2	Menor
10	Detección de velocidad	Mayor
11	Sobrecarga térmica	Menor
12	Falla memoria parámetro	Mayor
13	Fallo seguimiento servomotor	Menor
14	Reservado	
15	Reservado	
16	Fallo <i>watch dog</i>	Mayor
17	Fallo escritura EEPROM	Mayor
18	Ausencia señal de velocidad	Mayor
19	Fallo captador EANA5	Menor
20	Fallo conexión serie regulador	Menor
21	Presencia fallo menor	Menor
22	Fallo tacómetro red	Menor
23	Ausencia tacómetro auxiliar	Menor

Fuente: GEC Alstom, DIGIPID 1000 Maintenance manual, página 9

### **6.3.2 Listado de fallos**

A continuación se detallan los fallos más comunes que pueden aparecer en el sistema, los cuales se deben al mal funcionamiento, o bien, a la mala programación de los parámetros del DIGIPID 1000, así como los procedimientos que deben seguirse para la solución de dichos fallos.

#### **6.3.2.1 Fallo unidad de cálculo (mayor)**

En ciertas condiciones, el regulador detecta una anomalía de cálculo que puede estar relacionada con una configuración singular del juego de parámetros.

Solución:

1. Vuelva a cargar el juego de parámetros iniciales.
2. Si no se puede solucionar el fallo, vuelva a cargar las leyes.
3. Si el fallo persiste, cambie el DIGIPID 1000 (véase recambio.)

#### **6.3.2.2 Fallo alimentación (mayor)**

El fallo alimentación se detecta al poner bajo tensión el DIGIPID 1000 o después de un micro corte. Este fallo aparece cuando la tensión de alimentación de la tarjeta unidad central llega a ser inferior a 2 voltios.

Solución:

1. Verifique la tensión de alimentación del DIGIPID 1000.

### **6.3.2.3 Fallo tacómetro (mayor/menor)**

El fallo del tacómetro se detecta cuando aparece una de las siguientes condiciones:

- A. Orden de marcha presente y supresión brutal de la señal tacométrica cuando ésta detectaba una velocidad no nula.
- B. Orden de marcha activada y parasitaje de la señal de velocidad.

Este fallo es mayor cuando no existe la opción de tacómetro auxiliar. Es un fallo menor cuando existiendo la opción de tacómetro auxiliar, hay una señal en el tacómetro auxiliar (pasa a ser mayor en caso de pérdida de la señal en el tacómetro auxiliar.)

Solución:

1. Verifique el cableado.
2. Verifique las placas de acoplamiento de los blindajes.
3. Compruebe que la tensión suministrada sea lo suficientemente elevada (superior a 200 mV.)

### **6.3.2.4 Fallo captador servomotor (mayor)**

El fallo captador de posición servomotor se detecta cuando aparece una de las siguientes condiciones:

- A. Entrehierro entre la leva y el captador de proximidad anormalmente débil.
- B. Ruptura de la conexión entre el DIGIPID 1000 y el captador.

- C. Mala conexión del captador.
- D. Mal ajuste de la tensión del captador.

Solución:

1. Observe la tensión entre los bornes 27 y 28 y compárela con el valor mencionado en la ficha de mantenimiento.
2. En caso de diferencia, observe la corriente captadora; si ésta es nula, cambie el captador.
3. Si la corriente es correcta o si la tensión V27 – V28 es correcta, ajuste la tensión captadora según lo especificado por el apartado “Ajuste de la señal captadora de posición servomotor” en el capítulo 3.
4. Si dicho ajuste es imposible, contacte con su proveedor.

#### **6.3.2.5 Memoria EEPROM virgen**

Aparece al detectar el *software* que la memoria EEPROM no está programada. Para solucionar este fallo se debe recargar tanto el juego de parámetros como las leyes.

#### **6.3.2.6 Fallo consigna analógica 4**

Salvo excepciones, esta entrada está conectada al captador de posición del distribuidor. En tal caso, el fallo puede presentarse debido a una de las causas siguientes:

- A. Ruptura de la conexión entre el DIGIPID 1000 y el captador.
- B. Mala conexión del captador.

C. Mal ajuste de la tensión captadora.

Solución:

1. Ponga el distribuidor en posición de cierre, observe la tensión entre los bornes 30 y 31 y compárela con el valor de tensión indicado en la ficha de mantenimiento.
2. Si los valores son diferentes, observe la corriente captadora y si ésta es nula cambie el captador.
3. Si la corriente captadora es correcta y las tensiones V30 – V31 en cierre, en equilibrio y en apertura se ajustan a la ficha de mantenimiento, contacte a su proveedor (se detecta un fallo si la tensión V30 – V31 es inferior a 0.1 V.)

#### **6.3.2.7 Fallo consigna analógica 1 (menor)**

Pérdida de la entrada EANA 1 (si ésta se encuentra en 4 – 20 mA, se detecta un fallo si la tensión en EANA 1 es inferior a 0.1V.) Este fallo puede ser solucionado con solo verificar las conexiones entre el DIGIPID 1000 y la fuente de consigna.

#### **6.3.2.8 Fallo consigna analógica 2 (mayor o menor)**

Pérdida de la entrada EANA 2 (si ésta se encuentra en 4 – 20 mA, se detecta un fallo si la tensión EANA 2 es inferior a 0.1 V.) Al igual que la falla anterior, se soluciona verificando las conexiones entre el DIGIPID 1000 y la fuente de consigna.

### **6.3.2.9 Detección de velocidad (mayor)**

Se da cuando el DIGIPID 1000 detecta velocidad estando en el estado “funcionamiento en posicionador”. Para corregir esto, asegúrese de que los órganos de seguridad se posicionen al cierre.

### **6.3.2.10 Sobrecarga térmica (menor)**

Fallo ocasionado por un accionador defectuoso o por un parametraje demasiado restrictivo. Se soluciona visualizando la corriente accionadora en el visualizador y comprobando su igualdad con la corriente real en el accionador. En caso de diferencia importante cambie el DIGIPID 1000 y, verifique la carrera del accionador en función de la corriente.

### **6.3.2.11 Fallo memoria parámetro (mayor)**

La causa posible es que la memoria EEPROM se encuentre defectuosa. Para corregir este fallo vuelva a cargar el juego de parámetros iniciales; si no es posible solucionar el fallo, recargue las leyes. Si el fallo persiste cambie el DIGIPID 1000.

### **6.3.2.12 Fallo seguimiento servomotor (menor)**

Este aparece cuando la diferencia entre la consigna servomotor y la posición servomotor es superior a determinado umbral después de transcurrir un tiempo programado (en caso de validación de esta temporización.) Se corrige verificando la realimentación de posición y la parte hidromecánica, luego cancele el fallo.

### **6.3.2.13 Fallo del *watch dog* (mayor)**

Aparece cuando la tensión de alimentación del microcontrolador de la tarjeta 541 es inferior a 4.75 voltios. Se corrige verificando que la tensión de alimentación sea la adecuada.

### **6.3.2.14 Fallo escritura EEPROM (mayor)**

Aparece al detectar el programa una discrepancia entre el valor programado y el valor a ser programado, después de una tentativa de escritura en EEPROM por el usuario o automáticamente (histogramas.) Al presentarse este fallo es necesario cambiar el DIGIPID 1000.

### **6.3.2.15 Ausencia señal de velocidad (fallo mayor/menor)**

Se presenta cuando transcurre un tiempo excesivo entre la aplicación de la orden de marcha y la detección de la señal de velocidad (en caso de validación de esta temporización.) Este fallo es mayor cuando no existe la opción tacómetro auxiliar; es un fallo menor cuando existiendo la opción tacómetro, hay una señal en el tacómetro auxiliar. (Pasa a ser mayor en caso de pérdida de la señal en el tacómetro auxiliar.)

Solución:

1. Verifique el cableado.
2. Verifique el tiempo de arranque.
3. Verifique que la tensión de la señal de velocidad sea lo suficientemente elevada (superior a 200 mV.)

#### **6.3.2.16 Fallo captador EANA 5 (menor)**

Pérdida de la entrada EANA 5 (si ésta está en 4 – 20 mA.) Se detecta un fallo cuando la tensión en EANA 5 es menor de 0.1 V. Se soluciona verificando el cableado entre el DIGIPID 1000 y la fuente de la señal.

#### **6.3.2.17 Ausencia tacómetro auxiliar (fallo mayor/menor)**

Este fallo aparece cuando existiendo la opción tacómetro auxiliar se transcurre demasiado tiempo (superior a una temporización ajustada) entre la aplicación del orden de marcha y la detección de la señal de velocidad en la entrada tacómetro auxiliar.

El fallo es menor si se detecta una señal en la entrada tacómetro principal, mientras que el fallo es mayor si no se detecta ninguna señal en la entrada del tacómetro principal.

### **6.3.3 Soluciones para las anomalías más comunes**

En esta sección se presentan las posibles anomalías que pueden aparecer en el DIGIPID 1000, sus posibles causas, la forma de detectarlas y la forma de repararlas.

**Tabla XII. Anomalías – soluciones que se pueden presentar en el DIGIPID 1000**

<b>Anomalía</b>	<b>Causa posible</b>	<b>Detección</b>	<b>Reparación</b>
Sistema sin acción durante la prueba en blanco.	Alimentación defectuosa.	Verifique la tensión de alimentación en la bornera del DIGIPID 1000. Verifique el fusible. Verifique la tensión en los bornes del accionador.	Cambie de fuente de alimentación.  Cambie los fusibles. Cambie el cable.
	Bloqueo en el mando.	Verifique la corriente máxima en el accionador.	Elimine el punto duro mecánico.
	Cortocircuito a nivel de los bornes.	Verifique que los bornes estén bien ajustados y el espaciado entre los cables.	Revise las conexiones.
	Accionador averiado.	Pruebe otro accionador.	Cambie accionador y envíelo a su proveedor.
	Captador de realimentación defectuoso.	Verifique la tensión de alimentación en los bornes del captador y la tensión de la señal de medición.	Cambie accionador y envíelo a su proveedor.
	Nivel de potencia del DIGIPID 1000 defectuoso.	Mida la corriente en los bornes del accionador.	Cambie el módulo DIGIPID 1000 y envíelo a su proveedor.
	DIGIPID 1000 averiado.	Paso al nivel superior de la salida STOR.  Desexcitación del relé R29.  Parpadeo del visualizador.	Mida la tensión del borne 11 de la caja del DIGIPID 1000 o compruebe el estado del relé "fallo".  Lea el mensaje de fallo en el visualizador local. Remítase a la lista de fallos.
Inestabilidad del posicionamiento.	Mal ajuste del corrector posición.	Oscilaciones alrededor de la posición de equilibrio durante la variación del escalón de consigna.	Cambie el parametrage del bucle de posición.
	Parasitaje de la consigna.	Oscilaciones alrededor de la posición de equilibrio sin cambio de la consigna.	Cambie el cableado y compruebe el blindaje.
	Parasitaje del captador posición.	Oscilaciones alrededor de la posición de equilibrio en el cambio de la consigna.	Cambie el cableado y compruebe el blindaje.

**Fuente: GEC Alstom, DIGIPID 1000 Maintenance manual, página 18**

**Tabla XIII. Anomalías – soluciones que se pueden presentar en el DIGIPID 1000 (continuación)**

<b>Anomalía</b>	<b>Causa posible</b>	<b>Detección</b>	<b>Reparación</b>
Imposibilidad de alcanzar uno de los topes cierre o apertura.	Mala disposición física del captador.	Observe la tensión entre los bornes 27 y 28. En funcionamiento normal, V27-V28>0.2 V en cierre. V27-V28<5 V en apertura.	Ajuste mecánicamente la carrera del captador.
Imposibilidad de alcanzar el tope apertura.	Mal ajuste del potenciómetro de limitación de apertura.	Compruebe la posición del potenciómetro P2 o del limitador externo.	Libere la limitación de apertura.
Variación total de la posición para una débil variación de la consigna.	Mala elección de la carrera del captador.	Una variación de consigna inferior al 50% provoca el desplazamiento del elevador de un tope a otro.	Cambio del captador o de la cinemática entre el captador y la mecánica.
Imposibilidad de utilizar el desplazamiento pleno.	Mala elección de la carrera del captador.	Una variación de consigna no es suficiente para hacer el 100% de la carrera.	Cambio del captador o de la cinemática entre el captador y la mecánica.
Sistema correcto en el momento del ensayo en parada pero sin acción en dinámico.	Mala elección de la consigna.	Compruebe el estado de la entrada ETOR 0. Estado inferior consigna +/-. Estado superior consigna analógica.	Ponga el relé R7 en posición correcta.
	No existe consigna.	Verificar fuente de la consigna.	Cambie el generador de tensión o de corriente.
	Mala regulación de la limitación de apertura.		Cambie la posición de P2 o del limitador externo.
	Mala medición de la velocidad.		Cambie el cableado y compruebe el montaje mecánico del captador.
	Avería del microprocesador.	No se produce variación de la corriente de mando del accionador.	Cambie el DIGIPID 1000 y envíelo a su proveedor.
Bajada brutal de la velocidad (hipo.)	Corte de la medición de la posición del servomotor.	Fallo general.	Compruebe el blindaje y las conexiones.
	Corte de la alimentación.	Fallo general.	Compruebe cableado de alimentación.

**Fuente: GEC Alstom, DIGIPID 1000 Maintenance manual, página 19**

**Tabla XIV. Anomalías – soluciones que se pueden presentar en el DIGIPID 1000 (continuación)**

<b>Anomalía</b>	<b>Causa posible</b>	<b>Detección</b>	<b>Reparación</b>
Inestabilidad de la Velocidad.	Mala regulación del control de velocidad.	Oscilaciones alrededor de la posición de equilibrio en el momento de la variación del escalón consigna.	Realice una prueba de funcionamiento en limitación de apertura, las oscilaciones deben cesar. Cambie el parametrage del bucle de velocidad.
	Parasitaje de la consigna.	Oscilaciones alrededor de la posición de equilibrio sin cambio de la consigna.	Cambie el cableado y compruebe el blindaje.
	Parasitaje del captador de posición.	Oscilaciones alrededor de la posición de equilibrio sin cambio de la consigna.	Cambie el cableado y compruebe el blindaje.
	Parasitaje de la medición de la velocidad.	Oscilaciones alrededor de la posición de equilibrio sin cambio de la consigna.	Cambie el cableado y compruebe el blindaje. Compruebe el montaje del captador y de la rueda dentada (limpieza, dentado...)

**Fuente: GEC Alsthom, DIGIPID 1000 Maintenance manual, página 17**

### **6.3.4 Cancelación de los fallos**

#### **6.3.4.1 Fallos mayores**

La cancelación se efectúa por transición en la orden de marcha ETOR 1, esta operación se realiza presionando un pulsador exterior a la caja DIGIPID 1000 normalmente previsto para esta función. Si la causa del fallo persistiese, no se producirá la cancelación y el órgano regulador permanecerá cerrado.

#### **6.3.4.2 Fallos menores**

La cancelación se efectúa por medio del pulsador situado en la cara delantera de la caja DIGIPID 1000, esto se realiza conmutando el modo mensajería al modo control del punto de prueba; al comprobar la ocurrencia de un fallo (paso al modo parpadeo en el visualizador), el operador consulta primero la mensajería para conocer el mensaje de fallo y vuelve a conmutar al modo control. El visualizador deja de parpadear si el fallo ha desaparecido efectivamente.

La cancelación también puede realizarse por transición en la orden de marcha ETOR 1. También se pueden cancelar los fallos por medio de un terminal de mantenimiento (calculadora o PC.)

### **6.4 Recambio del DIGIPID 1000**

#### **6.4.1 Desmontaje**

Para desmontar la caja del DIGIPID 1000, es necesario llevar a cabo, en el orden estipulado, las siguientes operaciones:

1. Retirar el estuche de 33 bornes extraíbles.
2. Retirar el conjunto de fijación de blindajes de los cables de alimentación y del accionador.
3. Desconectar los cables de alimentación y el mando accionador.
4. Aflojar los cuatro tornillos M 5 que sirven para fijar la caja y levantar la misma hasta que sea posible sacar los tornillos de fijación.

### **6.4.2 Montaje**

Para volver a montar otro DIGIPID 1000, se deben llevar a cabo las mismas operaciones descritas arriba, pero éstas deben realizarse en orden inverso.

## CONCLUSIONES

1. Los sistemas digitales de control de carga y regulación de velocidad permiten controlar de una mejor manera –comparándolos con el desempeño de sus antecesores– las condiciones de operación de los complejos de generación.
2. Los parámetros de funcionamiento que vienen programados en el DIGIPID 1000 y los que deben ser ajustados en el montaje, son calculados con base a las condiciones de operación requeridas y provienen del estudio de estabilidad de la regulación de velocidad –ver capítulo 2–.
3. Un mal cálculo de los principales parámetros de programación –parámetros PID– del DIGIPID 1000, podría causar perturbaciones en el funcionamiento de las unidades de generación –sobrevelocidades hasta alcanzar la velocidad de embalamiento y superarla– teniendo como consecuencia daños en el generador, la turbina y su equipo auxiliar
4. Para garantizar una regulación de velocidad adecuada, es muy importante que los parámetros que la rigen, sean programados a los valores mas adecuados y seguros para la unidad de generación -valores que proceden de un estudio de estabilidad, ver capítulo 2-; además es importante, monitorear constantemente que los valores de potencia permanezcan dentro de un estrecho margen de error de acuerdo a la consigna de posición del distribuidor.

5. Cada vez que a la unidad de generación se le demanda más potencia, el gobernador cambia automáticamente la posición del distribuidor, ya sea abriendo o cerrando más éste, para que la velocidad de rotación y con ello la frecuencia eléctrica generada permanezcan casi constantes.
6. Tanto una sobre velocidad como una velocidad de rotación en extremo lenta, provocarán la aparición de un fallo mayor –paso al estado superior de la salida STOR 0, es decir, desexcitación del relé R29– que conlleva al disparo de la unidad de generación –apertura del disyuntor– y su consecuente salida de línea del sistema de potencia.
7. Con la programación adecuada de los parámetros de funcionamiento del DIGIPID 1000 se obtienen resultados de operación satisfactorios, tanto en régimen permanente como en régimen transitorio.
8. Un mantenimiento adecuado al DIGIPID 1000, reducirá los riesgos de operación en forma inadecuada y/o fallas del gobernador.

## RECOMENDACIONES

1. Debido a la importancia del funcionamiento del DIGIPID 1000, debe ser programado y ajustado únicamente por personal altamente capacitado, una mala programación de los parámetros de funcionamiento producirá daños al gobernador o a la unidad de generación.
2. Es importante revisar constantemente que el cilindro del servomotor y el anillo del distribuidor permanezcan libres de cuerpos extraños, ya que la presencia de éstos podría afectar claramente el funcionamiento de la unidad de generación e incluso mandar información errónea al DIGIPID y al PLC de la central.
3. Todo tipo de intervención en el ajuste y modificación de los parámetros programados –siempre que se cuente con la terminal de mantenimiento y el *software* apropiado– se debe realizar con la unidad de generación fuera de línea y tomando todas las medidas de seguridad para asegurar el buen funcionamiento del DIGIPID y el éxito de los ajustes o modificaciones.
4. Como se menciona en la sección 3.2.4 características de uso, se debe tener en cuenta que las condiciones ambientales a las que se encuentre sometido el DIGIPID pueden afectar el funcionamiento de éste, por lo tanto, se debe asegurar que éstas sean óptimas para garantizar el buen funcionamiento del regulador.
5. Basado en observaciones experimentales, es muy importante observar el tiempo de sincronización de las unidades de generación –desde que la

máquina empieza a rotar hasta que entra a línea– ya que éste brinda información sobre el funcionamiento del DIGIPID, si el tiempo es demasiado extenso se debe dar orden de paro y ver las posibles causas que hacen que sea prolongado.

6. El mantenimiento del DIGIPID 1000 –entiéndase mantenimiento preventivo y no modificación de parámetros, ya que ésta se hace únicamente cuando el administrador de la red eléctrica así lo requiera– debe llevarse a cabo cada año, con la unidad de generación apagada; por esta razón debe ser programado en una época adecuada –en verano–, para evitar así paradas innecesarias durante que época en la que le operación de las unidades de generación sea imprescindible –invierno–.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Daugherty, Robert. **Turbinas hidráulicas**. New York, Estados Unidos: McGraw-Hill, Inc, 1920.
2. Donald G. Fink, H. Wayne Beaty. **Manual de ingeniería eléctrica**. 13 ed. (volumen 1) México: McGraw-Hill Interamericana, 2004.
3. Eugene A. Avallone, Theodore Baumeister III. **Manual del ingeniero mecánico**. 9na ed. (volumen 2) México: McGraw-Hill Interamericana, 1999.
4. Fitzgerald, A.E. y otros. **Máquinas eléctricas**. 5ta ed. México: McGraw-Hill, 1992.
5. Gec Alsthom. **DIGIPID 1000 Maintenance manual**. Francia: Neyrpic, 1999.
6. Gec Alsthom. **Manual de descripción y funcionamiento DIGIPID 1000**. 2a ed. Francia: Neyrpic, 2003.
7. Gec Alsthom. **Manual de instalación y utilización DIGIPID 1000**. 2a ed. Francia: Neyrpic, 2003.
8. Gec Alsthom. **Manual de usuario STATUS**. 2a ed. Francia: Neyrpic, 2003.
9. Kenneth G. Jackson, Rápale Feinberg. **Diccionario de ingeniería eléctrica**. 1era ed. Barcelona: Hurope, 1986.
10. Kundur, Prabha. **Power system stability and control**. Estados Unidos: McGraw-Hill, Inc, 1994.
11. Stephen J. Chapman. **Máquinas eléctricas**. 2a ed. Colombia: McGraw-Hill Interamericana, 1997.