



**UNIVERSIDAD DE CUENCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRICA**

**TESINA PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**“Análisis de las Ventajas de la Modernización de un Regulador de  
Velocidad Mecánico por uno Electrónico en una Central  
Hidroeléctrica”**

**RESPONSABLES:**

**Héctor Virgilio Sumba Yanza  
Julio Fernando Matute Domínguez**

**Director de Tesina:**

**Ing. Carlos Urgilés González**

**Cuenca - Ecuador  
2012**

# RESUMEN

El presente trabajo de graduación está encaminado al análisis de las cualidades de los reguladores de velocidad con más de 25 años de permanencia en el mercado, de igual manera se realiza un análisis de la tecnología moderna usada en los nuevos reguladores como su versatilidad, facilidad para el análisis de variables, confiabilidad y otras ventajas que sustentarían dentro de un análisis costo-beneficio la decisión de optar por la modernización del regulador de velocidad de una unidad de generación de gran potencia.

El capítulo I describe los reguladores antiguos y el funcionamiento de cada una de sus partes principales, se describe también la regulación primaria y secundaria de frecuencia, así como el control de potencia y velocidad mediante un regulador antiguo.

En el capítulo II, se describe el funcionamiento y control de los reguladores modernos con tecnología digital, también se describen los rangos de actuación, las funciones, el hardware etc., así como los criterios de estabilidad de los reguladores de velocidad.

En el capítulo III se analizan las ventajas técnicas de la modernización, riesgos y consecuencias que presentan los reguladores antiguos y finalmente se realiza un análisis costo-beneficio de la modernización del regulador de velocidad.

Finalmente en el capítulo IV, se exponen las conclusiones y recomendaciones respecto de la modernización del regulador de velocidad.

# PALABRAS CLAVES

Regulador de Velocidad, Control, Confiabilidad, Seguridad, Riesgo, Disponibilidad, Tasa de salida forzada (FOR), Frecuencia, Velocidad, Potencia, Redundancia, lucro cesante, repuestos, falla.

# INDICE GENERAL

RESUMEN.....	2
PALABRAS CLAVES .....	3
INDICE GENERAL .....	4
INDICE DE FIGURAS.....	8
INDICE DE TABLAS.....	11
CERTIFICACIÓN .....	12
DERECHOS DEL AUTOR Y RESPONSABILIDAD.....	13
AGRADECIMIENTO .....	16
DEDICATORIA.....	19
CAPÍTULO I.....	22
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>22</b>
1.1. REGULADORES DE VELOCIDAD MECÁNICOS.....	25
1.1.1. Partes Principales de un Regulador de velocidad Mecánico .....	25
1.1.2. Funcionamiento del Regulador de Velocidad Mecánico .....	27
1.1.3. Modo de funcionamiento de un Regulador de Velocidad con o sin Droop (Caída). .....	34
1.2. REGULACIÓN PRIMARIA DE FRECUENCIA (RPF) .....	36
1.2.1. Características: .....	37
1.2.2. Fundamentos de la Regulación de Velocidad .....	38
1.2.3. Respuesta del generador a los cambios de carga .....	38
1.2.3.1. Respuesta de la carga a desviaciones de frecuencia .....	41
1.2.3.2. Relación entre Velocidad Angular y Frecuencia Eléctrica.....	42
1.2.3.4. Reguladores de Velocidad con Estatismo de Velocidad .....	44
1.2.3.5. Porcentaje de regulación de velocidad o estatismo .....	44
1.2.3.6. Distribución de Carga entre Unidades en Paralelo.....	46
1.2.3.7. Tiempo de respuesta .....	48
1.2.3.8. Unidades Generadoras Participantes de la RPF .....	48
1.3. REGULACIÓN SECUNDARIA DE FRECUENCIA (RSF).....	49
1.3.1. Características de la Regulación de Frecuencia Secundaria:.....	50
1.4. ESTABILIDAD DE FRECUENCIA .....	50
1.4.1. Respuesta del sistema ante perturbaciones muy severas.....	51

1.4.2.	<i>Respuesta del sistema en condiciones de separación en islas</i> .....	51
1.4.2.1.	Islas con déficit de generación.....	52
1.4.2.2.	Islas con superávit de generación.....	52
1.4.3.	<i>Restauración del sistema</i> .....	52
1.4.4.	<i>Naturaleza de los problemas de estabilidad de frecuencia</i> .....	52
1.4.5.	<i>Análisis de estabilidad de frecuencia</i> .....	53
1.4.6.	<i>Técnicas de cálculo de los programas de simulación dinámica de largo plazo</i> .....	55
1.4.7.	<i>Método para mejorar la estabilidad de frecuencia</i> .....	55
1.5.	CONTROL DE VELOCIDAD Y POTENCIA.....	56
1.5.1.	<i>Control de Velocidad</i> .....	56
1.5.1.1.	<i>Niveles de Regulación de Frecuencia</i> .....	57
1.5.1.2.	Sistemas de control para la regulación de frecuencia o control de velocidad.....	57
1.5.1.3.	Regulación terciaria de frecuencia (RTF).....	58
1.5.1.4.	<i>Reserva para regulación de frecuencia</i> .....	58
1.5.1.5.	<i>Desconexión de cargas por baja frecuencia</i> .....	60
1.5.2.	<i>Control de Potencia</i> .....	62
1.5.2.1.	Fundamentos del Control Automático de Generación (AGC).....	64
<b>CAPITULO II</b> .....		<b>65</b>
<b>2. REGULADORES ELECTRONICOS</b> .....		<b>65</b>
2.1.	CARACTERÍSTICAS DE LOS REGULADORES ELECTRÓNICOS.....	65
2.1.1.	<i>Generalidades</i> .....	65
2.1.2.	<i>Hardware</i> .....	68
2.1.2.1.	Módulos electrónicos.....	69
2.1.2.2.	Panel de operador local.....	69
2.1.2.3.	Amplificadores de salida para la activación de válvulas proporcionales.....	71
2.1.2.4.	Aparatos adicionales.....	71
2.1.2.5.	Transductor de Potencia.....	74
2.1.2.6.	Intercambio de señales.....	74
2.1.3.	<i>Bucles de regulación</i> .....	75
2.1.3.1.	Regulación de velocidad.....	75
2.1.3.2.	Regulación de apertura.....	75
2.1.3.3.	Regulación de potencia.....	75
2.1.3.4.	Conmutación suave.....	76
2.1.3.5.	Detección de red aislada.....	76
2.1.3.6.	Limitaciones.....	76
2.1.4.	<i>Funciones del Regulador</i> .....	77

2.1.4.1.	Proceso de arranque y parada con control de carga.....	77
2.1.4.2.	Indicación/entrada de parámetros.....	80
2.1.4.3.	Generación de valores límite.....	80
2.1.4.4.	Monitorización.....	80
2.1.4.5.	Detección de velocidad independiente del regulador.....	81
2.1.4.6.	Parámetros adaptativos para los bucles de regulación de velocidad y de potencia.....	81
2.1.4.7.	Regulador redundante.....	81
2.1.4.8.	Software base y sistema de desarrollo.....	82
2.1.4.9.	Comunicación Serial con SCADA.....	83
2.1.4.10.	Comportamiento en caso de falla de la comunicación serial con SCADA.....	83
2.1.5.	<i>Caída de velocidad (estatismo o compensación)</i> .....	83
2.1.6.	<i>Estabilidad del regulador</i> .....	84
2.1.6.1.	Tiempo de arranque del agua $T_W$ .....	85
2.1.6.2.	Tiempo mecánico de arranque $T_m$ .....	86
2.1.6.3.	Coefficiente de Autorregulación.....	86
2.1.6.4.	Inercia del generador.....	88
2.1.6.5.	Criterios de estabilidad.....	89
2.1.7.	<i>Controlador</i> .....	91
2.1.8.	<i>Modernización del sistema hidráulico</i> .....	92
2.1.9.	<i>Funciones principales del regulador de velocidad digital</i> .....	93
2.1.10.	<i>Especificación electrónica</i> .....	94
2.1.11.	<i>Especificación de la unidad hidráulica</i> .....	96
2.1.12.	<i>Automatización</i> .....	97
2.1.13.	<i>Instrumentos y equipos utilizados en la modernización de un regulador mecánico</i> .....	98
2.2.	ESPECIFICACIONES DE DISEÑO DEL DIAGRAMA ELECTRÓNICO DE REGULADORES DE VELOCIDAD.....	99
2.2.1.	<i>Generalidades</i> .....	99
2.2.2.	<i>Criterios generales de diseño</i> .....	99
2.2.2.1.	Instrumentación y descripción operativa.....	102
2.2.2.2.	Descripción operativa.....	106
2.2.2.3.	Sistema hidráulico (Unidad hidráulica).....	112
2.2.3.	<i>Control, automatización y equipos</i> .....	115
<b>CAPITULO III.....</b>		<b>120</b>
<b>3. ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN REGULADOR ELECTRÓNICO SOBRE UN MECÁNICO.....</b>		<b>120</b>
3.1.	ANÁLISIS TÉCNICO DE LAS VENTAJAS DE LA MODERNIZACIÓN DE UN REGULADOR DE VELOCIDAD ANTIGUO.....	121
3.1.1.	<i>Contrapesas vs Sensor de velocidad inductivo</i> .....	121

3.1.2.	<i>Resorte de fijación de velocidad vs Ajuste electrónico de velocidad.</i>	123
3.1.3.	<i>Resorte de compensación/Válvula aguja vs constante integral (reset)/Contante derivativa</i>	124
3.1.4.	<i>Rodamiento vs Unidad central de procesamiento (CPU).</i>	124
3.1.5.	<i>Modos de Control.</i>	126
3.1.5.1.	Modo ON – OFF	126
3.1.5.2.	Control Proporcional	126
3.1.5.3.	Control Integral	126
3.1.5.4.	Control Derivativo	127
3.1.6.	<i>Actuadores</i>	127
3.1.7.	<i>Protecciones del regulador de velocidad</i>	131
3.2.	<b>ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO DE LA MODERNIZACIÓN DEL REGULADOR DE VELOCIDAD MECÁNICO.</b>	135
3.2.1.	<i>Generalidades</i>	135
3.2.2.	<i>Análisis de riesgos</i>	136
3.2.2.1.	Estimación de Riesgo	137
3.2.2.2.	Probabilidad de Ocurrencia	138
3.2.2.3.	Severidad de Consecuencias	139
3.2.2.4.	Resultado de la Evaluación de Riesgos	139
3.2.2.5.	Riesgos en las fases de la modernización del regulador mecánico	140
3.2.3.	<i>Seguridad del sistema</i>	146
3.2.4.	<i>Costos</i>	148
3.2.4.1.	Descripción de costos	148
3.2.4.2.	Análisis de costos	150
3.2.4.3.	Descripción de beneficios técnicos y económicos	153
3.4.3.	<i>Análisis de resultados.</i>	155
<b>CAPITULO IV</b>		<b>159</b>
<b>4. CONCLUSIONES-RECOMENDACIONES</b>		<b>159</b>
4.1.	CONCLUSIONES	159
4.2.	RECOMENDACIONES	163
<b>BIBLIOGRAFIA</b>		<b>165</b>

# INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. 1. REGULADOR DE VELOCIDAD HIDROMECAÁNICO .....	26
FIGURA 1. 2. CONTRAPESAS Y RODAMIENTO.....	28
FIGURA 1. 3. CABEZA DEL REGULADOR HIDROMECAÁNICO. ....	29
FIGURA 1. 4. OPERACIÓN DE LA VÁLVULA PILOTO. ....	30
FIGURA 1. 5. BOMBA DE ENGRANAJE DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO .....	31
FIGURA 1. 6. SISTEMA DE ACUMULACIÓN DE ACEITE PRESURIZADO DEL SISTEMA DE REGULACIÓN DE VELOCIDAD.....	32
FIGURA 1. 7. VÁLVULA DE ALIVIO DE UN REGULADOR Y UN ACTUADOR.....	33
FIGURA 1. 8. CURVA DE UN REGULADOR SIN DROOP O COMPENSACIÓN .....	34
FIGURA 1. 9. A) REGULADOR DE VELOCIDAD CON DROOP, B) CURVA DE RESPUESTA DE UN REGULADOR DE VELOCIDAD CON DROOP. ....	35
FIGURA 1. 10. ESQUEMA DE REGULACIÓN DE VELOCIDA.....	38
FIGURA 1. 11. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA RELACIONANDO VELOCIDAD Y TORQUE .....	38
FIGURA 1. 12. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA RELACIONANDO VELOCIDAD Y POTENCIA.....	40
FIGURA 1. 13.....	42
FIGURA 1. 14.....	42
FIGURA 1. 15. REGULADOR DE VELOCIDAD SINCRÓNICO .....	43
FIGURA 1. 16. RESPUESTA DE UNA UNIDAD DE GENERACIÓN CON REGULADOR DE VELOCIDAD SINCRÓNICO ANTE UN AUMENTO DE CARGA.....	43
FIGURA 1. 17. CARACTERÍSTICA DE ESTADO ESTACIONARIO IDEAL DE UN REGULADOR DE VELOCIDAD CON ESTATISMO PERMANENTE.....	45
FIGURA 1. 18. DISTRIBUCIÓN DE LA CARGA EN UNIDADES EN PARALELO CON CARACTERÍSTICAS DESCENDENTES DEL REGULADOR DE VELOCIDAD .....	46
FIGURA 1. 19. RESPUESTA DE UN GENERADOR CON REGULADOR DE VELOCIDAD CON ESTATISMO PERMANENTE ANTE UN AUMENTO DE CARGA. ....	48
FIGURA 1. 20. CAÍDA DE LA FRECUENCIA DEBIDA A UN DÉFICIT DE GENERACIÓN. ....	61
FIGURA 1. 21. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL GOBERNADOR Y TURBINA. ....	63
FIGURA 1. 22. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL GOBERNADOR Y TURBINA .....	63
FIGURA 1. 23. EFECTO DEL AJUSTE DEL VARIADOR DE VELOCIDAD EN LA CARACTERÍSTICA DEL REGULADOR.....	63
<b>FIGURA 2. 1. REGULADOR DE VELOCIDAD ELECTRÓNICO.....</b>	<b>66</b>
<b>FIGURA 2. 2. MODERNIZACIÓN DE REGULADOR DE VELOCIDAD.....</b>	<b>67</b>
FIGURA 2. 3. REGULADOR DE VELOCIDAD MODERNO PARA UNA TURBINA FRANCIS. ....	68
FIGURA 2. 4. PANEL DE OPERACIÓN DEL REGULADOR DE VELOCIDAD. ....	70



FIGURA 2. 5. AMPLIFICADOR DE AISLAMIENTO. ....	72
FIGURA 2. 6. SENSORES DE VELOCIDAD. ....	73
FIGURA 2. 7. TRANSMISORES DE POSICIÓN. ....	73
FIGURA 2. 8. TRANSDUCTOR DE POTENCIA. ....	74
FIGURA 2. 9. SECUENCIA DE ARRANQUE DEL REGULADOR DE VELOCIDAD PARA UNA TURBINA FRANCIS. ....	78
FIGURA 2. 10. SECUENCIA DE PARADA DEL REGULADOR DE VELOCIDAD. ....	79
FIGURA 2. 11. CURVA DE LA CAÍDA DE VELOCIDAD. ....	84
FIGURA 2. 12. REPRESENTACIÓN DE ESTABILIDAD E INESTABILIDAD. ....	85
FIGURA 2. 13. CURVA TORQUE – VELOCIDAD. ....	87
FIGURA 2. 14. VALORES DEL COEFICIENTE DE AUTORREGULACIÓN $\alpha$ . ....	90
FIGURA 2. 15. CURVA DE ESTABILIDAD DE GORDON. ....	91
FIGURA 2. 16. CONTROLADOR PID APLICADO EN MODO GENERAL PARA REGULADORES ELECTRÓNICOS DE VELOCIDAD. ....	92
<b>FIGURA 2. 17.</b> DIAGRAMA DE CAMBIO DE ACTUADOR DE SERVOMOTOR (CILINDRO HIDRÁULICO) ....	93
<b>FIGURA 2. 18.</b> APLICACIÓN DEL REGULADOR DIGITAL. ....	95
<b>FIGURA 2. 19.</b> CONEXIÓN TP DELTA-DELTA Y UN TC (IA O IB O IC). ....	101
FIGURA 2. 20. EJEMPLO DE PANTALLA DE OPERACIÓN E INSTRUMENTACIÓN (CENTRAL LOS CHILLOS REIVAX). ....	103
FIGURA 2. 21. SECUENCIA DE ARRANQUE Y PARO (CENTRAL LOS CHILLOS REIVAX). ....	104
FIGURA 2. 22. MEDICIÓN DE FRECUENCIA EN EL ARRANQUE. ....	107
FIGURA 2. 23. OPERACIÓN MANUAL UH (A); OPERACIÓN AUTOMÁTICA UH (B). ....	108
FIGURA 2. 24. AUTOMATISMO VB Y BM. ....	108
FIGURA 2. 25. SIMBOLOGÍA (MANUAL USUARIO REIVAX). ....	115
<b>FIGURA 2. 26.</b> DIAGRAMA DE BLOQUES CON VÁLVULA PROPORCIONAL Y DISTRIBUIDORA. ....	116
FIGURA 2. 27. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE CONTROL DE CARGA Y VELOCIDAD. ....	117
FIGURA 2. 28. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA MALLA DE CONTROL DEL DISTRIBUIDOR. ....	118
FIGURA 2. 29. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE LA MALLA DE CONTROL DE LA VÁLVULA DISTRIBUIDORA. ....	119
FIGURA 3. 1. VIDA ÚTIL DE LOS EQUIPOS. ....	120
FIGURA 3. 2. COMPARACIÓN DE DISPOSITIVOS DE CONTROL ANTIGUO Y ELÉCTRICO. ....	122
FIGURA 3. 3. UNIDAD CENTRAL DE PROCESO. ....	125
FIGURA 3. 4. ESQUEMA DE UN ACTUADOR. ....	128
FIGURA 3. 5. RELACIÓN ENTRE LA SEÑAL ELÉCTRICA DE ENTRADA Y LA ROTACIÓN DEL EJE TERMINAL DEL ACTUADOR. ....	129
FIGURA 3. 6. ESQUEMA DE UN ACTUADOR CON BOMBA DE ACEITE INTERNA PARA UNIDADES PEQUEÑAS. ....	130
FIGURA 3. 7. SISTEMA DE ACUMULACIÓN DE ACEITE PRESURIZADO DEL SISTEMA DE REGULACIÓN DE VELOCIDAD. ....	130
FIGURA 3. 8. ESQUEMA PARA UN SISTEMA DE PROTECCIÓN DE SOBRE VELOCIDAD. ....	132
FIGURA 3. 9. CURVA CONFIABILIDAD VS COSTO DE INVERSIÓN. ....	145
FIGURA 3. 10. COSTOS VARIABLES DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA. ....	156

---

FIGURA 3. 11. GENERACIÓN DIARIA DE ENERGÍA ELÉCTRICA. ....	156
FIGURA 3. 12. COSTO DE INVERSIÓN DEL REGULADOR DE VELOCIDAD VS EQUIVALENTE EN DÓLARES DE PRODUCCIÓN DIARIA. ...	157
FIGURA 3. 13. DÍAS DE PÉRDIDA DE ENERGÍA CORRESPONDIENTE A LA INVERSIÓN DEL REGULADOR DE VELOCIDAD. ....	158
FIGURA 4. 1. VIDA ÚTIL DE LOS EQUIPOS.....	160

# INDICE DE TABLAS

TABLA 1. 1. TIEMPO DE PROCESAMIENTO DE UNA CPU.....	23
TABLA 2. 1. VALORES DEL COEFICIENTE DE AUTORREGULACIÓN $\alpha$ .....	87
TABLA 2. 2. ENTRADAS PARA HABILITACIÓN REGULADOR ELECTRÓNICO. ....	100
TABLA 2. 3. SALIDAS PARA HABILITACIÓN REGULADOR ELECTRÓNICO.....	100
TABLA 2. 4. COMANDOS PRINCIPALES USADOS EN LA UNIDAD HIDRÁULICA. ....	114
TABLA 2. 5. PARÁMETROS GENERALES DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL REGULADOR DE VELOCIDAD.....	117
TABLA 2. 6. PARÁMETROS GENERALES DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DE MALLA DE CONTROL DEL DISTRIBUIDOR.....	118
TABLA 2. 7. PARÁMETROS GENERALES DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA CONTROL DE LA VÁLVULA DISTRIBUIDORA. ....	119
TABLA 3. 1. SEVERIDAD DE CONSECUENCIAS. ....	139
TABLA 3. 2 MATRIZ DE EVALUACIÓN DE RIEGOS.....	139
TABLA 3. 3. CATEGORÍA DE IMPORTANCIA DEL RIESGO.....	140
TABLA 3. 4. COSTOS REFERENCIALES DE LA MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA DE REGULACIÓN DE VELOCIDAD DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CARLOS MORA.....	150
TABLA 3.5. DÍAS DE PRODUCCIÓN PARA CUBRIR LA INVERSIÓN DEL REGULADOR DE VELOCIDAD DE LA UNIDAD 3 DE LA CENTRAL CARLOS MORA.....	151
TABLA 3. 6. COSTO DE MODERNIZACIÓN DEL REGULADOR DE VELOCIDAD DE LA UNIDAD G. ZEVALLOS TV3.....	152
TABLA 3. 7. DÍAS DE PRODUCCIÓN PARA CUBRIR LA INVERSIÓN DEL REGULADOR DE VELOCIDAD DE LA UNIDAD TV3 G. ZEVALLOS. .....	153

# CERTIFICACIÓN

**Certifico que la presente tesina fue desarrollada bajo mi dirección por los señores:**


**Julio Fernando Matute Domínguez  
Héctor Virgilio Sumba Yanza.**



**Ing. Carlos Urgilés González**  
**Director de Tesina**

# **DERECHOS DEL AUTOR Y RESPONSABILIDAD**

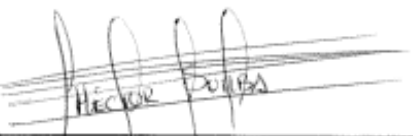
Yo, **HECTOR VIRGILIO SUMBA YANZA**, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de **INGENIERO ELÉCTRICO**. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.



---

Héctor Virgilio Sumba Yanza  
0302184130

**HECTOR VIRGILIO SUMBA YANZA**, certifica que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son exclusiva responsabilidad de su autor.



---

Héctor Virgilio Sumba Yanza  
0302184130

Yo, **JULIO FERNANDO MATUTE DOMINGUEZ**, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de **INGENIERO ELÉCTRICO**. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.



---

Julio Fernando Matute Domínguez  
0105835235

**JULIO FERNANDO MATUTE DOMINGUEZ**, certifica que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son exclusiva responsabilidad de su autor.



---

Julio Fernando Matute Domínguez  
0105835235

# AGRADECIMIENTO



En primer lugar agradezco a Dios y a la Virgen Santísima del Cisne por la sabiduría y por todas las bendiciones que me brindaron en toda mi vida estudiantil, en segundo lugar agradezco a mis Padres, Santiago y Olga, por su paciencia, consejos y por todo su apoyo incondicional durante todos estos años de estudio.

Agradezco al Ing. Carlos Urgilés por la ayuda incondicional durante el desarrollo de la tesis, por su tiempo que ha puesto en nosotros, por su confianza, por sus consejos y por compartir todos sus conocimientos respecto al tema.

Finalmente agradezco a mi hermano Galo por extenderme una mano cuando más necesitaba.

**Héctor**

Le doy las gracias a la institución por brindarme los conocimientos, vivencias, cualidades para llegar a ser un profesional de éxito y como también estoy agradecido con todos los profesores que fueron parte de mi educación.

Agradezco al Ing. Carlos Urgilés tutor de la tesis, por haber dedicado su tiempo a la revisión y corrección de este documento.

Agradezco a toda mi familia, por confiar en mí y ser parte de cada uno de mis logros.

**Julio**

# DEDICATORIA

Con todo el amor y cariño dedico esta tesis a Dios, a la Virgen del Cisne, a mis padres Santiago y Olga, a mis hermanos Galo Enrique y José Gerardo, a mis sobrinos Alex Santiago y Danny Paúl, a mis abuelitos, primos, tíos y a todos mis amigos, porque todos ellos forman parte de mis éxitos.

**Héctor**

Primeramente dedico a Dios, porque fuiste mi fuerza y voluntad para llegar a mi meta y cumplir cada uno de mis propósitos.

A mi linda mamita por estar siempre a mi lado apoyándome en los buenos y malos momentos, por siempre estar pendiente de mí.

A mi hermano Manuel, por ser una persona que me brindo su apoyo moral y económico, por ser mi amigo incondicional y sobre todo porque siempre estuvo cuando lo necesite y nunca escatimo su voluntad de ayudarme en cada instante de mi vida.

**Julio**

## CAPÍTULO I

### 1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo realiza un análisis de las cualidades de los reguladores de velocidad con más de 25 años de permanencia en el mercado, de igual manera se realiza un análisis de la tecnología moderna usada en los nuevos reguladores como su versatilidad, facilidad para el análisis de variables, confiabilidad y otras ventajas que sustentarían dentro de un análisis costo-beneficio la decisión de optar por la modernización del regulador de velocidad de una unidad de generación de gran potencia.

De manera general en los reguladores antiguos, los procesos de operación y supervisión se realizan de forma local y no permiten un seguimiento continuo de las variables asociadas, además presentan baja calidad de regulación en relación a la versatilidad de los reguladores modernos debido muchas veces al desgaste de partes y piezas en movimiento y a fatiga de materiales, que dificultan la óptima operación de la unidad de generación.

Por medio del regulador de velocidad electrónico, se estima las siguientes mejoras:

- Incremento en la seguridad de la unidad y optimización del uso del agua.
- Control mejorado de la precisión y estabilidad.
- Simplificación del régimen de operación.
- Mejora de la confiabilidad en base a elementos redundantes.
- Optimización de la producción de energía.

### Incremento en la seguridad de la unidad y optimización del uso de agua:

La calidad de los dispositivos del moderno sistema de regulación brinda una mayor seguridad de la unidad con respecto a un regulador antiguo, debido a mediciones de variables en tiempo real, pudiendo evitar averías por la rápida actuación del sistema de regulación moderno.

La respuesta de los reguladores modernos es rápida en relación a los reguladores antiguos con lo cual se optimiza el uso del agua en el caso de las centrales hidroeléctrica y el uso de combustible en el caso de centrales térmicas..

**Control mejorado de precisión y estabilidad:** Un sistema de control moderno garantiza alta resolución en la medición de la velocidad ( $\leq 0.001\%$ ), algoritmos de control sofisticado (controlador PID en comandos) que son fácilmente implementados en autómatas programables. El tiempo procesamiento de las señales dentro de los controladores alcanza los 200 ns (Tabla 1.1), en relación a velocidad lenta de procesamiento de los elementos de los reguladores antiguos.

	CPU 312	CPU 314	CPU 315-2 DP
	Start of delivery: 10/2002	Start of delivery: 10/2002	Start of delivery: 10/2002
<b>Main memory (applications)</b>	16 KByte/5 K statements	48 KByte/16 K statements	128 KByte/42 K statements
<b>Backup:</b> using MMC (6ES7953-8L...)	all blocks	all blocks	all blocks
<b>Processing times</b>			
▪ Bit operations	< 200 ns	< 100 ns	< 100 ns
▪ Word operation	< 1.0 $\mu$ s	< 0.5 $\mu$ s	< 0.5 $\mu$ s
▪ Fixed-point arithmetic	< 5 $\mu$ s	< 3.5 $\mu$ s	< 3.5 $\mu$ s
▪ Floating-point arithmetic	< 30 $\mu$ s	< 15 $\mu$ s	< 15 $\mu$ s

Tabla 1. 1. Tiempo de procesamiento de una CPU.

**Simplificación de régimen de operación:** El régimen de operación es simplificado por medio de la implementación de los siguientes controles:

- Control de velocidad.
- Control de potencia.

- Control de apertura de válvulas.

El sistema de control moderno permite una regulación rápida mediante rampas de velocidad respecto al setpoint.

**Mejora de la confiabilidad en base a elementos redundantes:** todas las partes utilizadas, son componentes estándares y probados, entre ellos son los siguientes:

- Fuentes de tensión y CPUs redundantes.
- Integración de las señales del regulador a otros sistemas de la planta.
- Señales redundantes de retroalimentación
- Múltiples sensores de medición de velocidad, lógica dos de tres
- Bombas, válvulas, etc.

Para darle nueva operatividad al regulador, se modernizará a través de sus componentes principales:

- Actuador del regulador
- Válvulas de control
- Bombas
- Sistemas de control, sensores y componentes de supervisión, registro de información y estación de ingeniería.

Hoy en día el moderno regulador de velocidad actuará directamente sobre los servomotores que controlan la carrera de los inyectores a través de electroválvulas, este control es realizado mediante un software sofisticado instalados en los CPUs, los mismos que adquiere información del estado del sistema para la toma de decisiones.



## 1.1. REGULADORES DE VELOCIDAD MECÁNICOS

Los reguladores mecánicos son inherentemente inestables. Hoy en día no son muy adecuados para controlar la velocidad y requieren un medio adicional de estabilización.

La estabilización se logra realimentando la posición del servomotor, el cual, por medio del mecanismo de DASHPOT (Amortiguador), restablece temporalmente la válvula de control hacia la posición nula y por lo tanto se amortiguan los movimientos del servomotor<sup>1</sup>.

La velocidad de una turbina se desviará de la velocidad sincrónica normal debido a un cierto porcentaje de cambio en la carga. La cantidad de desviación de la velocidad dependerá de:

- El tiempo requerido para alterar el flujo del aceite hidráulico en el sistema de regulación que corresponda con la acción necesitada por el cambio de carga.
- La cantidad de efecto volante de la masa rotativa del grupo turbina-generador. En otras palabras de la constante de inercia  $H$  del generador.
- El tiempo requerido por el flujo de agua o vapor para responder a la acción causada por el cambio en el punto de operación de la turbina.

### 1.1.1. Partes Principales de un Regulador de velocidad Mecánico

El regulador mecánico esta constituido por varias partes, que son elementos fundamentales y que se deben tomar en cuenta al realizar un mantenimiento. Las

---

<sup>1</sup> **Suescún Monsalve, Ismael.** Centrales Hidráulicas. Antioquia : s.n.

partes principales de un regulador mecánico se pueden visualizar en la Figura 1.1<sup>2</sup>.

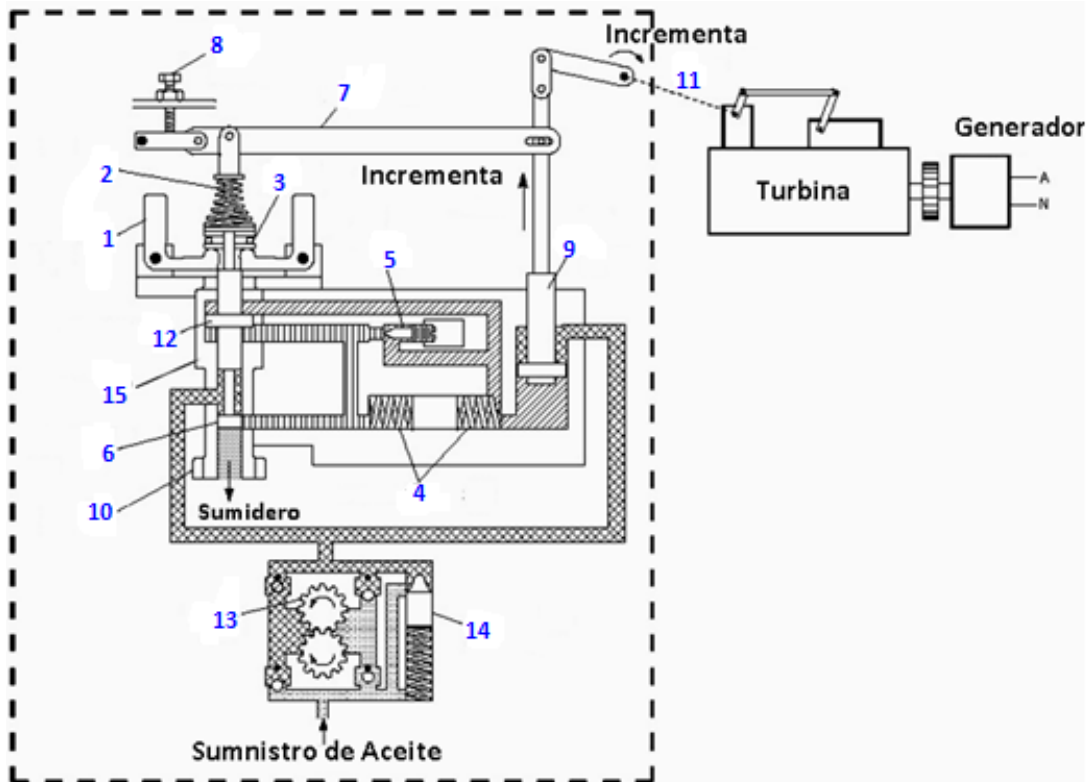


Figura 1. 1. Regulador de velocidad hidromecánico

1. Contrapesas (Sensor de Velocidad).
2. Resorte de fijación de velocidad.
3. Rodamiento para restar las fuerzas.
4. Resortes amortiguadores de ajuste de ganancia de los circuitos hidráulicos.
5. Válvula de aguja para estabilizar el movimiento principal.
6. Embolo de la válvula piloto para controles de flujo de aceite al servo pistón, también.

<sup>2</sup> Mejía Castañeda, Jorge Eduardo. 2011. Modernización de Reguladores de Velocidad Hidromecánicos. Quito, Pichincha, Ecuador : s.n., Enero de 2011.

7. Palanca de inclinación de velocidad.
8. Tornillo de ajuste de velocidad.
9. Servomotor
10. Eje de transmisión mediante engranajes se conecta a la turbina.
11. Eje Terminal o eje de salida que mueve el acople con salida rotacional del actuador.
12. Región de compensación donde se transmite diferentes fuerzas para el empuje de las agujas y ayuda al retorno de la misma cuando haya cumplido su función la corrección necesaria para mantener la velocidad de adecuada.
13. Bombas de aceite para proporcionar aceite a presión.
14. Regulador de presión de aceite.
15. Cilindro de la válvula piloto.

### **1.1.2. Funcionamiento del Regulador de Velocidad Mecánico**

#### **Resorte de fijación de Velocidad**

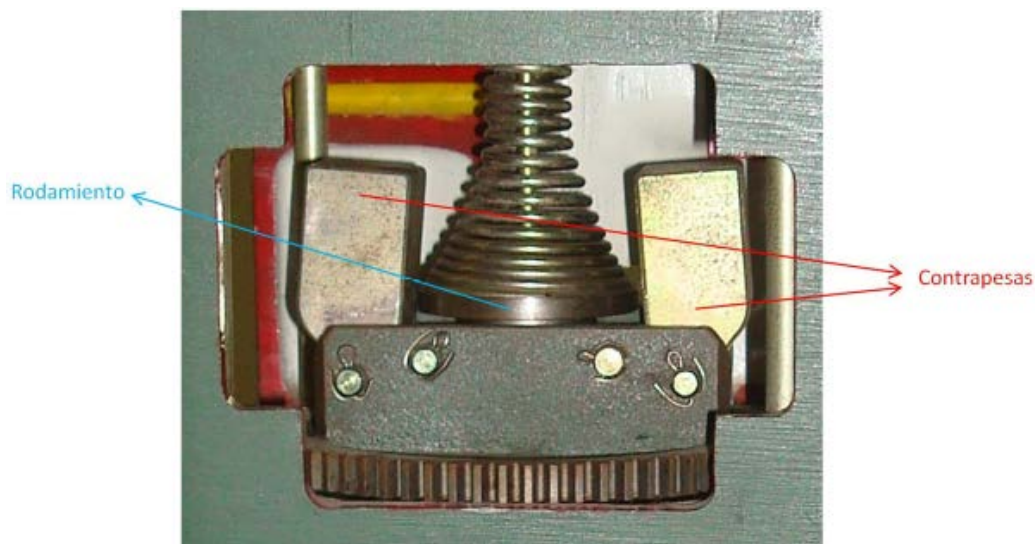
Este resorte es la parte que fija la velocidad deseada ver numeral 2 de la figura 1.1. Si se aplica más fuerza hacia abajo en el resorte, esto causa que el regulador aumente el envío de agua en las unidades hidroeléctricas o combustible en unidades térmicas con cierta posición del eje de salida. La fuerza inicial es usualmente fijada por el operador con una velocidad de referencia. Esta puede ser fijada mediante el ajuste de un tornillo, una tuerca, una barra de nivel, un motor eléctrico, presión de aire o por solenoides dependiendo del tipo específico del regulador.

El diseño o forma de este resorte es crítica para la apropiada operación del regulador. Generalmente tiene una forma cónica. Su forma ayuda a mantener un diseño más rígido lo que evita que se doble hacia los lados cuando una fuerza es aplicada. Hay otras formas de resortes que ofrecen fuerzas variables a lo largo de su longitud.

## Contrapesas y Rodamiento

Como se puede observar en la figura 1.1 numeral 1, la mayoría de reguladores hidromecánicos hay dos contrapesas, a 180 grados entre ellas. Las contrapesas rotan ya que están ligadas al eje de transmisión del motor y giran a la velocidad de la turbina o a una velocidad proporcional a la misma.

El rodamiento (ver figura 1.1 numeral 3) es la parte donde la fuerza del resorte de fijación de velocidad y la fuerza de las contrapesas se restan. Si las dos fuerzas son iguales no hay carga sobre el rodamiento, el uso de este rodamiento es necesario ya que las contrapesas están girando a varias revoluciones por minuto mientras el resorte permanece fijo, es por esto, que el rodamiento tiene dos caras, superior e inferior, que giran independiente la una de la otra (Ver Figura 1.2). El embolo de la válvula piloto (ver numeral 6 de figura 1.1) se mueve de arriba abajo con el rodamiento y está ligado a este, ya sea directa o indirectamente. El émbolo no rota.



**Figura 1. 2.** Contrapesas y rodamiento

En la Figura 1.3 podemos ver como las contrapesas tienen un punto de pivote en su esquina inferior. Cuando la velocidad aumenta, las contrapesas se alejan en la parte superior debido a la aceleración centrífuga. Si las contrapesas están inclinadas hacia el centro, la turbina está operando por debajo de la velocidad deseada y el regulador aumentará la apertura de suministro de agua para unidades hidroeléctricas o combustible para unidades térmicas en la turbina para aumentar la velocidad hasta que las contrapesas y la turbina alcancen la velocidad deseada fijada y consecuentemente un determinado valor de potencia suministrada por la máquina. Si las contrapesas están inclinadas hacia fuera la turbina esta girando más rápido de lo deseado y el regulador disminuirá la apertura de suministro de agua para unidades hidroeléctricas o combustible para unidades térmicas, hasta que las contrapesas y la turbina operen a la velocidad y potencia requerida por la carga<sup>3</sup>.

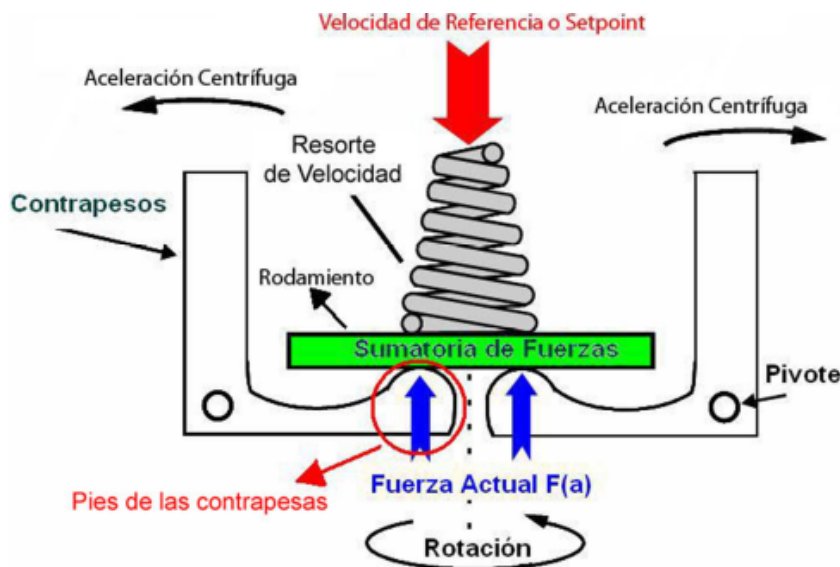


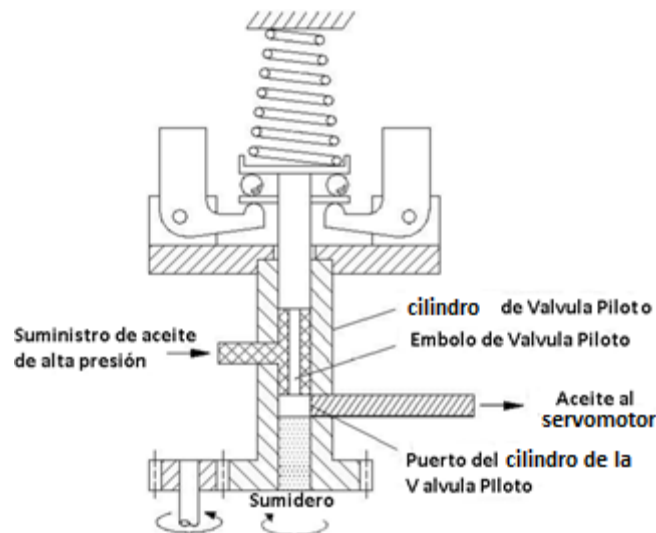
Figura 1. 3. Cabeza del regulador hidromecánico.

<sup>3</sup> Ochoa Coronel, Jaime Mauricio, Parodi Ocaña, Elsy Alexandra y Arteaga Cordero, José Felicísimo. 2001. Control Automático Para la Regulación de Frecuencia en las Centrales Térmicas De Electroguayas. Guayaquil, Guayas, Ecuador : s.n., 2001.

## Válvula Piloto

El émbolo de la válvula piloto (numeral 6 de la figura 1.1) es posicionado por las fuerzas ejercidas en el rodamiento. Este se mueve de arriba hacia abajo dentro de un cilindro (numeral 15 de la figura 1.1). El cilindro de la válvula piloto tiene aceite a alta presión que viene de la bomba de aceite.

El cilindro de la válvula tiene puertos de entrada que permite el flujo de aceite hacia o fuera del cilindro del servomotor. Cuando el regulador y la turbina están a la velocidad deseada, el émbolo de la válvula piloto está centrado en el puerto del cilindro. Esto impide que aceite salga o entre al cilindro del pistón de poder. Ver (Figura 1.4.)



**Figura 1. 4.** Operación de la válvula piloto.

Si las contrapesas se inclinan hacia el centro, debido a una variación de la carga, el émbolo se mueve hacia abajo y permite que aceite con alta presión ingrese al cilindro del servomotor. Esto permitirá tener mayor flujo de agua en unidades de generación hidroeléctrica o combustible para el caso de unidades de generación térmica, para obtener una mayor potencia requerida por la carga.

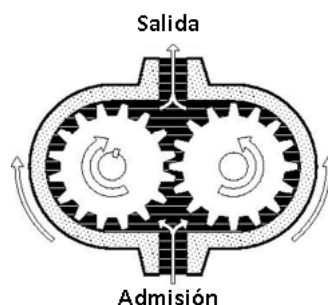
Si las contrapesas se inclinan hacia fuera, debido a un cambio de velocidad o de carga, el émbolo de la válvula se mueve hacia arriba permitiendo que el aceite del

cilindro del servomotor escape hacia el sumidero. Lo que disminuirá la apertura de suministro de agua en unidades de generación hidroeléctrica o combustible para el caso de unidades de generación hacia la turbina, lo cual ocasionara una menor potencia de salida de la maquina, debido al bajo requerimiento de la carga o por salidas intempestivas de carga.

El cilindro de la válvula piloto gira, ya que se encuentra acoplado al engranaje del eje de transmisión y a las contrapesas, mientras que el embolo permanece estático, este está acoplado al rodamiento y este al resorte de fijación de velocidad de referencia (ver Figura 1.4). Si el cilindro gira y el embolo permanece estático se minimiza la fricción estática y permite que el émbolo se mueva con mínimos cambios en la velocidad. Existen pequeños conductos por donde circula aceite que permite la lubricación hacia todas las partes móviles del Regulador de Velocidad.

### Bombas de aceite

En la Figura 1.5, podemos observar un tipo de bomba de aceite usadas en reguladores de velocidad de pequeñas unidades de generación, opera con dos engranajes, al girar los engranajes de la bomba, el aceite es llevado desde el depósito hacia el espacio entre los dientes y las paredes del compartimiento del lado opuesto, lado de descarga, para luego ser forzado a pasar hacia los acumuladores de presión, generando que el compartimiento de los acumuladores se presurice.

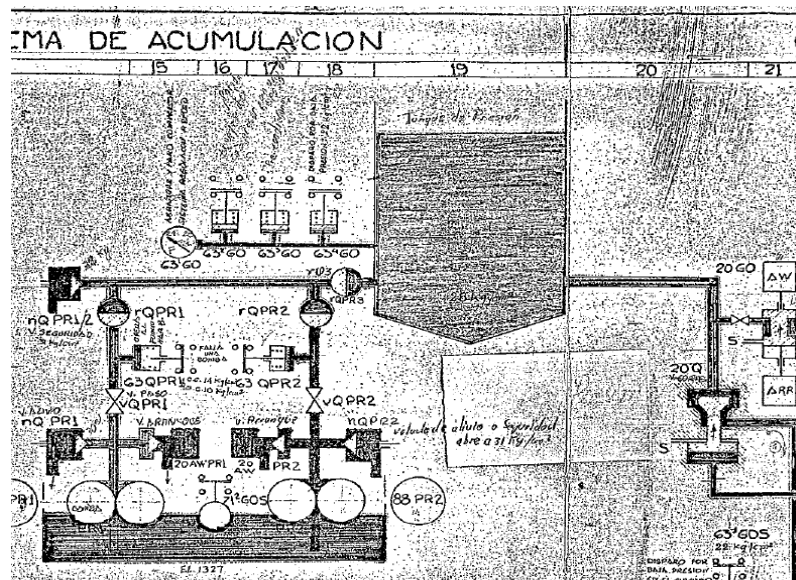


**Figura 1. 5.** Bomba de engranaje de desplazamiento positivo



Al estar operando el regulador y su bomba de aceite, se puede censar el aumento de temperatura en el mismo, esto por efectos de fricción en los componentes internos de la bomba de aceite, esta energía calorífica significa perdidas en el sistema.

Las bombas son diseñadas para proveer más presión y flujo del que se necesita para el regulador. El flujo extra de aceite a presión es enviado al sumidero. Los reguladores de velocidad pequeños usan válvulas de alivio, mientras que los reguladores grandes usan un sistema de acumulación el cual provee un reservorio de aceite con resortes comprimidos que es usado cuando la demanda de aceite a presión excede la capacidad de entrega de la bomba de aceite (ver figura 1.6). La presión en los acumuladores de aceite en la mayoría de reguladores de velocidad está entre 100 y 500 psi. Esta presión varía de acuerdo a los requerimientos de poder en el eje de salida (servomotor).



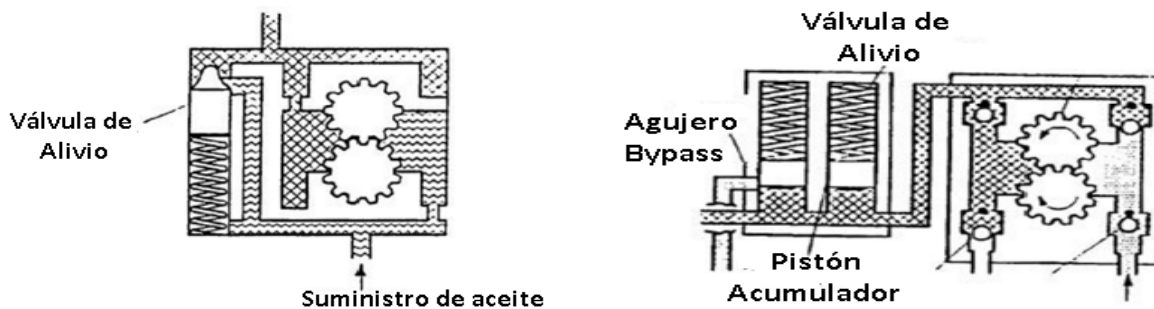
**Figura 1. 6.** Sistema de acumulación de aceite presurizado del sistema de regulación de velocidad<sup>4</sup>

<sup>4</sup> FUENTE: Material De estudio de Centrales Hidroeléctricas del curso de graduación de la Universidad de cuenca “CENTRALES DE GENERACION ELECTRICA”.



La función del acumulador se muestra en la Figura 1.7, el aceite presurizado del lado de descarga de la bomba primero llena los múltiples conductos del sistema y luego empuja los pistones del acumulador hacia arriba en contra de la fuerza de los resortes.

Cuando la presión aumenta lo suficiente para mover el pistón arriba de la perforación de desfogue, el exceso de aceite de las bombas regresa al sumidero. Los acumuladores entonces no solo proveen de un reservorio de aceite presurizado, sino también actúa como válvula de alivio para limitar la presión máxima en el circuito hidráulico.



**Figura 1. 7.** Válvula de alivio de un regulador y un actuador.

## Servomotor

El movimiento del émbolo de la válvula piloto del regulador direcciona el flujo de aceite desde y hacia el cilindro del servomotor, de esta manera se puede controlar el movimiento del servomotor. El servomotor actúa a través de un sistema de varillaje para controlar el suministro de agua en unidades de generación hidroeléctrica o combustible en el caso de unidades de generación térmica, hacia la turbina.

### 1.1.3. Modo de funcionamiento de un Regulador de Velocidad con o sin Droop (Caída).

En un sistema sin la función de droop, un aumento de carga provocaría que la turbina disminuya su velocidad. El regulador de velocidad respondería aumentando la apertura de suministro de agua en unidades de generación hidroeléctrica o combustible en el caso de unidades de generación térmica, hacia la turbina hasta que la velocidad de la turbina regrese a la velocidad original. Debido a la combinación de la inercia y el retraso en la respuesta, la velocidad de la turbina continuará aumentando después de alcanzar su velocidad deseada, causando que se sobre revolucione. El regulador de velocidad responderá a esto disminuyendo el suministro de agua o vapor para corregir la sobre velocidad. Esto sobre corregiría la velocidad en la otra dirección causando que la turbina gire a bajas revoluciones, esta sobre corrección de la velocidad en las dos direcciones (inestabilidad) se amplificaría hasta producir que el motor se sobre revolucione provocando daños en el mismo (Ver Figura 1.8)

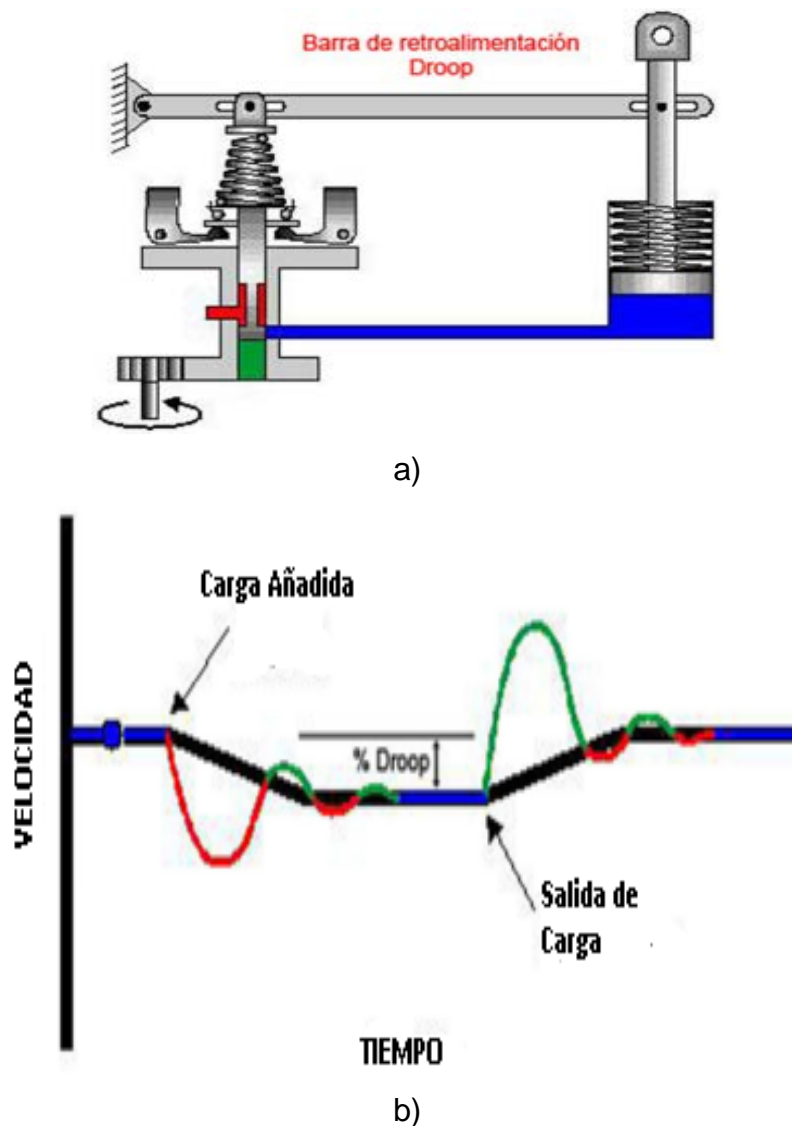


**Figura 1. 8.** Curva de un regulador sin Droop o Compensación

La inestabilidad de un sistema puede ser eliminada con el Droop. Mientras la carga aumenta, la velocidad de referencia decrece. Cuando el regulador actúa para corregir el decremento de velocidad causado por el incremento de carga,

este corregirá a una velocidad deseada más baja. Esta velocidad fijada más baja previene que el motor se sobre revolucione.

En la parte “a” de la Figura 1.9, podemos ver que existe una barra llamada barra de retroalimentación Droop y sirve para ajustar la Caída de Velocidad, la cual esta acoplada al lado derecho al pistón de fuerza.



**Figura 1. 9.** a) Regulador de velocidad con Droop, b) Curva de respuesta de un regulador de velocidad con Droop.

Cuando la carga es aplicada al motor, el servomotor se mueve hacia arriba para incrementar la apertura del suministro de agua o vapor a la turbina. La barra de retroalimentación del droop está conectada al servomotor y al resorte de fijación de velocidad. La barra de retroalimentación jala el resorte para reducir la fuerza. Con menos fuerza aplicada en el resorte, la fijación de velocidad decrece, causando la acción de la caída de velocidad lo que mantiene la carga a una velocidad de fijación más baja.

## **1.2. REGULACIÓN PRIMARIA DE FRECUENCIA (RPF)**

Para lograr una operación satisfactoria de un sistema de potencia, la frecuencia debe permanecer aproximadamente constante. Una caída considerable en la frecuencia en una red trae como consecuencia corrientes elevadas de magnetización en motores de inducción y transformadores, no sólo es necesario regular solo la frecuencia sino también su integral.

Como la frecuencia es un factor común de todo el sistema, un cambio en la demanda de potencia activa en un punto se refleja en todo el sistema como un cambio en la frecuencia. Debido a que hay varios generadores suministrando potencia al sistema, deben proveerse algunos medios para distribuir los cambios de carga en todas las unidades.

En un sistema interconectado, además del control de frecuencia, debe controlarse la generación dentro de cada área para mantener el intercambio de potencia planificado.

La regulación primaria de frecuencia actúa a nivel de la unidad de generación y comprende la acción automática de los reguladores de velocidad. Su función principal es tratar de modificar automáticamente la generación en forma rápida absorbiendo los desbalances de potencia provocados por perturbaciones en el

sistema (variaciones de la demanda o salidas de servicio intempestivas de generadores)<sup>5</sup>.

### 1.2.1. Características:

Es una acción de control local, cada unidad dispone de un regulador de velocidad, que controla la velocidad de rotación en el eje del generador y actúa sobre las válvulas de admisión de vapor a la turbina en las centrales térmicas turbo vapor, en válvula de admisión de combustible en las térmicas turbo gas y en los distribuidores (controlan el caudal y dirección del flujo de agua) en las centrales hidráulicas.

La actuación de la RPF es rápida, utiliza reserva rotante de segundos para restablecer el balance de potencia, su acción se debe completar en menos de 30 segundos, por consiguiente las unidades deben ser capaces de tomar y liberar carga rápidamente por lo que las unidades deben tener disponibilidad de reserva rotante para modificar rápidamente su generación. Margen de reserva rotante para RPF: 5% en las térmicas, 10 % en las hidráulicas, por la velocidad de actuación.<sup>6</sup>

La unidad, por estar sometida a variaciones de la carga continuas, debe satisfacer requerimientos técnicos exigentes y tener una alta disponibilidad.

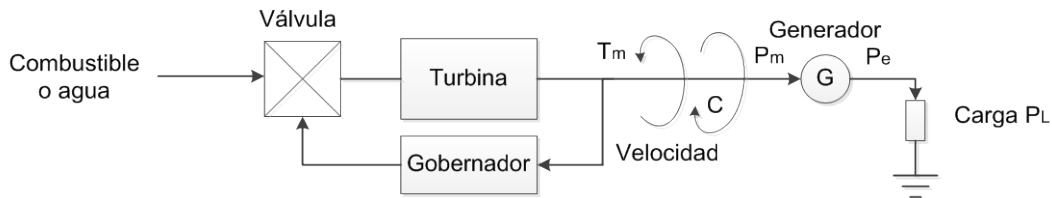
---

<sup>5</sup> **Delia y Colomé, Delia Graciela. 2001.** *Operación de Sistemas Eléctricos de Potencia.* Quito, Ecuador : s.n., Julio de 2001.

<sup>6</sup> **Delia y Colomé, Delia Graciela. 2001.** *Operación de Sistemas Eléctricos de Potencia.* Quito, Ecuador : s.n., Julio de 2001. **Delia y Colomé, Delia Graciela. 2001.** *Operación de Sistemas Eléctricos de Potencia.* Quito, Ecuador : s.n., Julio de 2001.

### 1.2.2. Fundamentos de la Regulación de Velocidad

A continuación se presentan conceptos básicos de la regulación de velocidad considerando una unidad de generación aislada suministrando una carga local.



**Figura 1. 10.** Esquema de Regulación de velocidad

$T_m$ : torque mecánico

$P_e$ : potencia eléctrica

$T_e$ : torque eléctrico

$PL$ : potencia de carga

$P_m$ : potencia mecánica

### 1.2.3. Respuesta del generador a los cambios de carga

Cuando hay un cambio de carga, este se refleja inmediatamente como un cambio del torque eléctrico

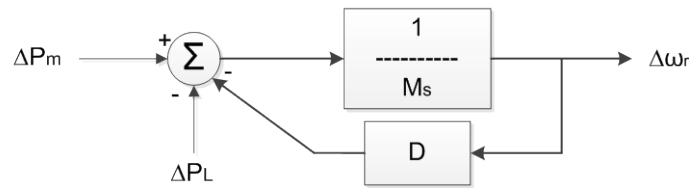
Para estudios de carga-frecuencia, es preferible expresar la relación anterior en términos de potencia mecánica y eléctrica antes que en torque.

La ecuación de movimiento representa la relación entre la velocidad del rotor como función de las potencias eléctrica y mecánica<sup>7</sup>.



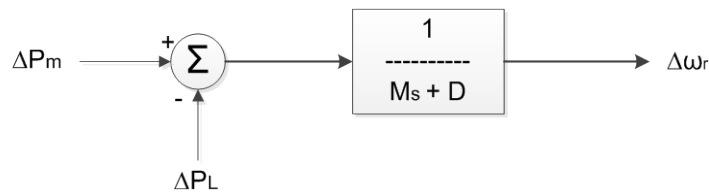






**Figura 1. 13**

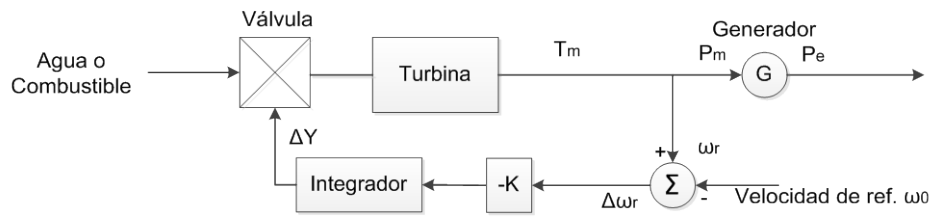
Esto puede reducirse a la forma mostrada en la Figura 1.14.



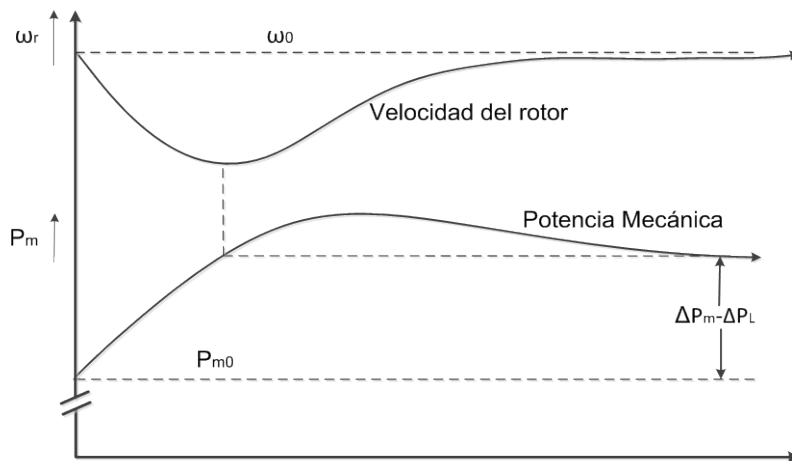
**Figura 1. 14**

Ante la ausencia de control de velocidad, la respuesta del sistema a los cambios de carga está determinada por la constante de inercia y la constante de amortiguamiento.

### 1.2.3.2. Relación entre Velocidad Angular y Frecuencia Eléctrica



**Figura 1. 15.** Regulador de velocidad sincrónico



**Figura 1. 16.** Respuesta de una unidad de generación con regulador de velocidad sincrónico ante un aumento de carga.

Un incremento en la

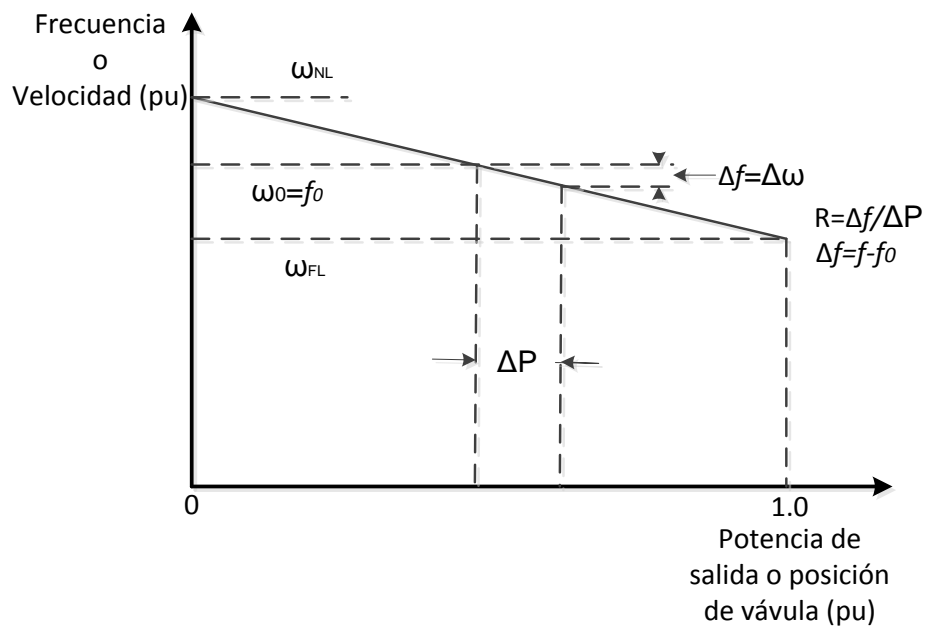
distribución de la potencia de carga entre generadores conectados a un sistema es necesario incluir en los reguladores de velocidad una característica de regulación o estatismo.

#### **1.2.3.4. Reguladores de Velocidad con Estatismo de Velocidad**

Los reguladores sincrónicos no pueden ser utilizados cuando dos o más unidades conectadas a un mismo sistema tienen diferentes referencias de velocidad, debido a que cada generador debería tener con precisión la misma velocidad de referencia. En caso contrario si sus frecuencias de referencia difieren levemente cada uno trataría de controlar la frecuencia del sistema con su propia referencia, pudiendo conducir a situaciones de oscilación en la generación.

#### **1.2.3.5. Porcentaje de regulación de velocidad o estatismo**

El valor de  $R$  determina la característica de regulación de velocidad de estado estacionario la que se muestra en la Figura 1.17 (frecuencia versus carga de la unidad de generación). El parámetro  $R$  es referido como característica de regulación de velocidad o estatismo permanente de velocidad.



**Figura 1. 17.** Característica de estado estacionario ideal de un regulador de velocidad con estatismo permanente

Esto puede ser expresado en % como:

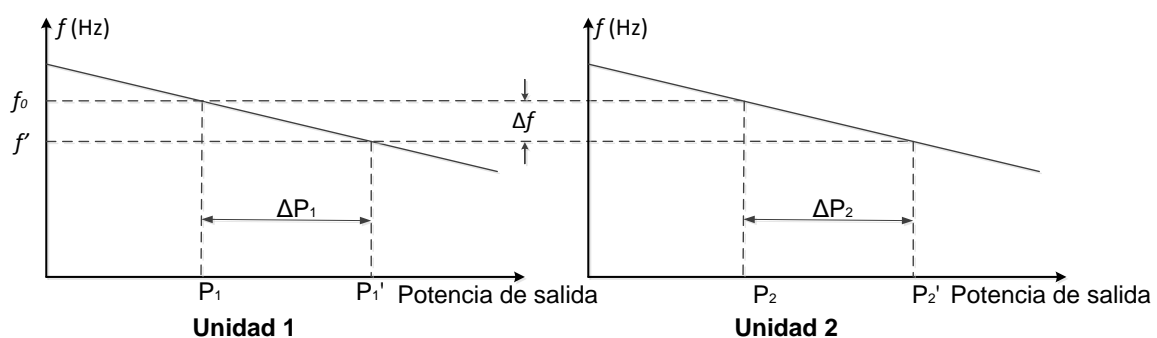
siguientes valores son indicativos del estatismo permanente de diferentes unidades<sup>8</sup>:

- Centrales nucleares: 4-6%
- Centrales térmicas convencionales 4-6%
- Centrales hidráulicas: 4-6%

El regulador de velocidad es el equipamiento encargado de la RPF.

### 1.2.3.6. Distribución de Carga entre Unidades en Paralelo

Si dos o más generadores con regulador de velocidad con estatismo permanente están conectados a un sistema de potencia existirá una única frecuencia a la cual se distribuirán la carga. Considérese dos unidades con características de regulación como las mostradas en la Figura 1.18.



**Figura 1. 18.** Distribución de la carga en unidades en paralelo con características descendentes del regulador de velocidad

Inicialmente funcionan a frecuencia nominal

incrementan la potencia de salida hasta que alcancen una frecuencia de operación común nueva

unidades en la regulación primaria. La mejor RPF se logrará con la participación de todas las unidades de generación de todas las unidades de generación<sup>9</sup>.

### **1.2.3.7. Tiempo de respuesta**

Debido al estatismo permanente, el incremento en la salida de potencia está acompañado por una desviación de frecuencia o de velocidad de estado estacionario



- Punto de operación, frecuentemente la capacidad de una unidad para responder es diferente de acuerdo al punto de operación.

### 1.3. REGULACIÓN SECUNDARIA DE FRECUENCIA (RSF)

Es la acción manual o automática, que permite llevar nuevamente las máquinas a los valores asignados por el despacho, anulando así los desvíos de frecuencia al producirse nuevamente el balance entre generación y demanda, compensando el error final de la frecuencia  $\Delta W_{ss}$  resultante de la RPF.

La función de la regulación secundaria de frecuencia es restaurar o mantener la frecuencia del sistema cercana a la nominal. Este control se lleva a cabo mediante la modificación de los valores de potencia activa de las unidades asignadas al Control Secundario.

El Control Secundario de Frecuencia puede efectuarse en forma manual mediante instrucciones a los operadores de planta (siguiendo las instrucciones entregadas por el Despachador), o de manera automática mediante el denominado Automatic Generation Control (AGC). A diferencia del Control Primario su acción es lenta y coordinada, tomando en cuenta características de las unidades, como por ejemplo su velocidad de respuesta. Su rango de acción abarca desde los segundos hasta varios minutos posteriores a una contingencia, no debiendo interferir en la acción de la Regulación Primaria así ante perturbaciones grandes, el Control Secundario de Frecuencia no debería actuar hasta que se alcance el error permanente de frecuencia<sup>10</sup>.

---

<sup>10</sup> Delia y Colomé, Delia Graciela. 2001. *Operación de Sistemas Eléctricos de Potencia*. Quito, Ecuador : s.n., Julio de 2001.

En el caso de las variaciones rápidas y aleatorias de la demanda, el Control Primario actúa constantemente absorbiendo oscilaciones de demanda. Por su parte, el Control Secundario no actúa, debido a que una rápida oscilación de demanda se traduce en una rápida oscilación de la frecuencia, fuera del alcance de su ancho de banda.

### **1.3.1. Características de la Regulación de Frecuencia Secundaria:**

- Para anular la desviación de frecuencia se utiliza un controlador de característica proporcional integral (PI).
- En base a un despacho económico se distribuye la variación de carga entre las unidades que participan en la RSF.
- Permite que las unidades de regulación primaria vuelvan a su valor inicial de generación, restituyendo la disponibilidad de reserva de generación para participar en la regulación primaria.
- La acción de control sobre los variadores de carga de los generadores es originada en un Centro de Control (telemando) partiendo de mediciones de frecuencia en la red y de mediciones de flujo de potencia activa por las interconexiones (telemediciones).
- Su acción se establece en tiempos del orden de varios minutos para acciones manuales y de un minuto o dos para acciones automáticas, estas últimas se denominan Control Automático de Generación (Automatic Generation Control - AGC).

Como parte de la RSF se considera el control de potencia de generación que se detalla más a fondo en el apartado 1.5.2.

## **1.4. ESTABILIDAD DE FRECUENCIA**

La estabilidad de frecuencia está asociada al comportamiento del sistema eléctrico ante perturbaciones severas.

Perturbaciones tan severas que producen grandes variaciones de frecuencia, de tensión y de los flujos de potencia, activando la actuación de sistemas de protección y de control y la acción de procesos lentos, que normalmente no son modelados en los estudios de estabilidad transitoria.

La estabilidad de frecuencia se relaciona con la habilidad para mantener una frecuencia de estado estacionario aceptable luego de una perturbación severa que produzca un desbalance importante entre carga y generación<sup>11</sup>.

#### **1.4.1. Respuesta del sistema ante perturbaciones muy severas**

Los sistemas modernos son diseñados y operados de manera segura ante las perturbaciones más probables. Los sistemas de protección y control actúan para prevenir la propagación de la perturbación a otras partes del sistema.

Sin embargo una combinación inusual de eventos y circunstancias pueden causar que una porción del sistema se separe formando una o más islas eléctricas, con una pérdida significativa de carga.

Los eventos iniciales que conducen a la inestabilidad de frecuencia son normalmente perturbaciones más severas que las de diseño (como una perdida de una planta generadora).

#### **1.4.2. Respuesta del sistema en condiciones de separación en islas**

La separación en islas produce una variación transitoria y sostenida de frecuencia, por lo que el sistema de control de velocidad y la subsecuente respuesta de la máquina de impulso (fuerza motriz primaria) y de los sistemas de suministro de energía tienen un rol preponderante en el desempeño dinámico del sistema.

---

<sup>11</sup> Kundur, Prabha S. 2011. *Power System Stability and Control*. Duisburg : s.n., 2011.

Frecuentemente las variaciones transitorias de frecuencia están combinadas con condiciones de alta y baja tensión.

#### **1.4.2.1. Islas con déficit de generación**

Para este caso la frecuencia disminuye, si no hay suficiente reserva rotante, la frecuencia alcanza valores bajos a los cuales las unidades son desconectadas por actuación de las protecciones, disminuyendo cargas para un satisfactorio suministro de generación, además la respuesta transitoria inicial depende de la reserva rotante y del esquema de desconexión de carga.

#### **1.4.2.2. Islas con superávit de generación**

Para este otro caso la frecuencia aumenta, por lo que los reguladores de velocidad responden al aumento de frecuencia disminuyendo la potencia mecánica generada por las turbinas.

#### **1.4.3. Restauración del sistema**

Cuando las islas alcanzan condiciones de operación en estado estacionario los operadores realizan los pasos para restaurar el sistema interconectado como son.

- Ajuste de generación y carga en cada isla.
- Sincronizar nuevamente las islas.

#### **1.4.4. Naturaleza de los problemas de estabilidad de frecuencia**

La estabilidad de frecuencia es la habilidad del sistema de potencia de alcanzar un aceptable estado estacionario de operación después de una perturbación severa que haya provocado o no la separación del sistema en islas, produciéndose amplias variaciones de frecuencia ( $\pm 3$  Hz) y de tensión (0.5 a 1.2 pu).

Los procesos y dispositivos activados por estas variaciones tienen tiempos de actuación en el rango de unos segundos (respuesta de los dispositivos de control del generador) hasta varios minutos como los sistemas de suministro de energía primaria.

Por otra parte el estudio de estabilidad de frecuencia incluye la simulación de perturbaciones severas que provocan la salida en cascada de componentes conduciendo a la separación del sistema en islas.

La estabilidad de frecuencia está vinculada con el hecho de si cada isla alcanzará o no un estado aceptable de operación con una mínima pérdida de carga y generación, mientras que en la separación en islas los sistemas de control y protección dominan la respuesta del sistema. La situación se agrava si hay pobre coordinación entre ambos sistemas, generalmente los problemas de estabilidad de frecuencia están asociados con:

- Inadecuada respuesta del equipamiento.
- Pobre coordinación entre los sistemas de control y protección.
- Insuficiente reserva de potencia activa/reactiva.

#### **1.4.5. Análisis de estabilidad de frecuencia**

Para el análisis de estabilidad de frecuencia se utiliza la simulación dinámica de largo plazo la cual no estudiaremos a profundidad en esta monografía, los objetivos del análisis de las dinámicas de largo plazo incluyen:

Análisis post-mortem de salidas severas, esta ayuda a identificar las causas y desarrollar medidas correctivas.

Evaluar la habilidad de las plantas para manejarse ante perturbaciones, lo cual permite identificar deficiencias en la respuesta del equipo y en la coordinación de

los sistemas de control y de protección, además permite evaluar las prácticas o esquemas de desconexión de carga por subfrecuencia o subtensión.

Analizar la respuesta del sistema ante contingencias extremas, y desarrollar medidas para reducir la probabilidad de ocurrencia de estas contingencias, por lo cual se hace un análisis para minimizar las consecuencias examinando los procedimientos de emergencia y proveer.

Los requerimientos de modelación de los programas de simulación dinámica de largo plazo deben incluir, además de los modelos utilizados en simulaciones de estabilidad transitoria, la representación de la máquina de impulso y del sistema de suministro de energía.

También debe incluir modelos de los sistemas de protección y control que son activados en los estados de emergencia y de operación extrema como son.

- Representación de la planta de generación.
- Efecto de los grandes cambios en frecuencia y tensión.
- Servicios auxiliares y motores asociados.
- Amplio rango de protección / control de la planta.

Procesos que involucren variables físicas utilizadas como entradas a sistemas de protección o control.

- Representación de la red de transmisión.
- Protección, control, compensación Var y dispositivos de control de tensión.
- Efectos de la operación en condiciones fuera de la frecuencia y tensión nominales.
- En las situaciones con condiciones de muy alta tensión se debe representar la saturación de transformadores.
- Tantos procesos lentos como rápidos.

#### **1.4.6. Técnicas de cálculo de los programas de simulación dinámica de largo plazo**

Los primeros programas consideraban la frecuencia uniforme y modelaban sólo los fenómenos lentos y utilizaban métodos de integración de ecuaciones diferenciales explícitos de bajo orden, además de esto no modelaban transitorios rápidos que influyen en la respuesta dinámica de largo plazo.

Las propuestas actuales reconocen la necesidad de modelar tanto los fenómenos lentos como los rápidos.

- Se utilizan métodos integración implícita con buena estabilidad numérica.
- Modo dual de cálculo (corto y largo plazo).
- Métodos con ajuste automático de paso de integración.
- El paso de integración puede variar entre 1ms y 100 s.

#### **1.4.7. Método para mejorar la estabilidad de frecuencia**

- Se debe poner más énfasis en un ajuste adecuado de coordinación de protecciones y sistemas de control.
- El diseño de plantas generadoras debe ser tal que sea capaz de realizar exitosamente un rechazo parcial de carga y la operación aislada.
- Asegurando que los servicios auxiliares vitales no sean desconectados debido a variaciones de tensión o frecuencia.
- Un buen diseño del esquema de desconexión automática de carga por subfrecuencia.
- Selección de posibles áreas de separación (islas) y de bloques de carga a desconectar.
- Tener en cuenta los sistemas de control y protección de la red y de la planta generadora.
- Reconocer el requerimiento de un adecuado control de tensión potencia reactiva.

- Separación del sistema en islas y arranque en negro de unidades de generación.

El objetivo principal de la formación de Islas es asegurar que la mayor cantidad posible de generadores se mantengan en servicio luego de perturbaciones importantes del sistema evitando:

- El requerimiento principal de cualquier instalación para el Arranque en Negro es que los generadores se puedan arrancar, acelerar y conectar a la red local de suministro lo más rápidamente posible luego de un apagón total en el área.
- Por su rapidez para entrar en servicio y tomar carga los generadores hidroeléctricos y los accionados por turbinas de gas son los más adecuados para recomponer el sistema y conectar la mayor cantidad de carga en el menor tiempo.

## **1.5. CONTROL DE VELOCIDAD Y POTENCIA**

### **1.5.1. Control de Velocidad**

Para el control de la velocidad y potencia en un regulador de velocidad mecánico-hidráulico se debe considerar lo siguiente:

- Es utilizado en unidades antiguas.
- El censado de la velocidad, la realimentación con estatismo permanente y funciones de cálculo son provistas por elementos mecánicos.
- Las funciones que involucran potencias mayores son realizadas por componentes hidráulicos (amplificador), por ejemplo para el movimiento de compuertas.
- Se utiliza un amortiguador (dashpot) para proveer la compensación de estatismo transitorio.



### 1.5.1.1. Niveles de Regulación de Frecuencia

La frecuencia de un sistema y por consiguiente la velocidad de la unidad depende del balance de potencia activa. Un cambio en la demanda de potencia activa se refleja en todo el sistema por un cambio de la frecuencia y a su vez se refleja en la velocidad de la turbina.

Los medios que informan a los generadores sobre los cambios producidos en la demanda y que comandan cambios en la generación son los sistemas de control para la regulación de frecuencia o control de velocidad.

### 1.5.1.2. Sistemas de control para la regulación de frecuencia o control de velocidad.

Al controlar la frecuencia estamos controlando la velocidad del generador y esta se puede lograr mediante los siguientes sistemas:

- Regulador de velocidad: Regulación primaria de frecuencia (RPF).
- Control Automático de Generación (AGC): Regulación secundaria de frecuencia (RSF).
- Control del error de tiempo: Regulación terciaria de frecuencia (RTF).

La RSF ejerce su acción de control sobre los variadores de carga de las unidades, cuando un generador alimenta una carga aislada ajustes en el variador de carga modifican la velocidad de rotación.

Sin embargo en un sistema eléctrico ajustes en el variador de carga modifican muy levemente la frecuencia del sistema dependiendo del tamaño relativo de la unidad frente a la generación total del sistema, estos ajustes en el variador de carga son generalmente en forma de rampa.

Los dos primeros sistemas se detallaron en los apartados 1.2 y 1.3., ahora detallaremos el último sistema de control de velocidad y frecuencia.

### **1.5.1.3. Regulación terciaria de frecuencia (RTF)**

Comprende las acciones que tienden a anular la integral de las desviaciones de frecuencia, que se visualiza como la diferencia entre la hora oficial y la sincrónica.

El error de tiempo se define como:



- Debe evitar que la frecuencia alcance valores por debajo de la frecuencia límite admisible

- La velocidad de respuesta de los reguladores de velocidad tiene un tiempo de retardo de 3 a 5 segundos.

**Factores que influyen en la caída de la frecuencia:**

- Una reserva para actuación del regulador de velocidad prácticamente despreciable.
- Déficit de generación  $\Delta P$ , de la constante de amortiguamiento de la carga del área D y de la constante de inercia M representante de la inercia total de los generadores del área.
- Caída de frecuencia debida al déficit de generación

la carga conectada a un nivel tal que pueda ser satisfecho con la generación disponible.

La selección del esquema depende de:

- Máximo déficit de generación.
- La frecuencia mínima admisible.
- El rango de valores de D y M.

Esquema de desconexión de cargas típico para un déficit de generación de aproximadamente 25%:

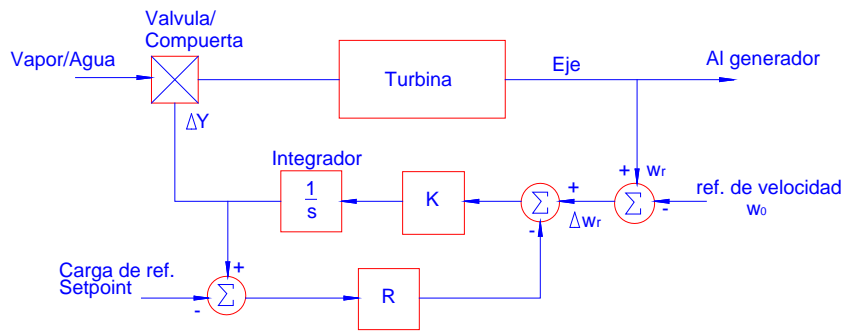
- el 10% de la carga cuando la frecuencia cae a 59.2 Hz
- un 15% adicional cuando la frecuencia cae a 58.8 Hz
- un 20% adicional cuando la frecuencia cae a 58.0 Hz

Para déficit mayores de generación los esquemas de desconexión de carga incluyen la actuación de relés de desconexión por gradiente de frecuencia.

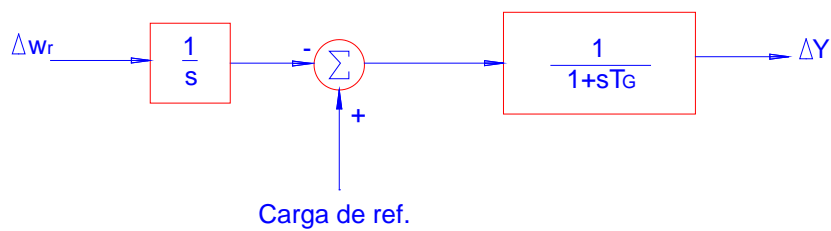
Una vez definidos los bloques de carga a desconectar es necesario realizar estudios dinámicos para asegurar el desempeño satisfactorio del sistema modelando las unidades de generación con sus sistemas de control y protección.

### **1.5.2. Control de Potencia**

Para el control se toma en cuenta la relación entre la carga y la velocidad. Estos se pueden ajustar modificando los datos de referencia de generación (setpoint) como se puede observar en las figuras (Figura 1.21 y Figura 1.22).

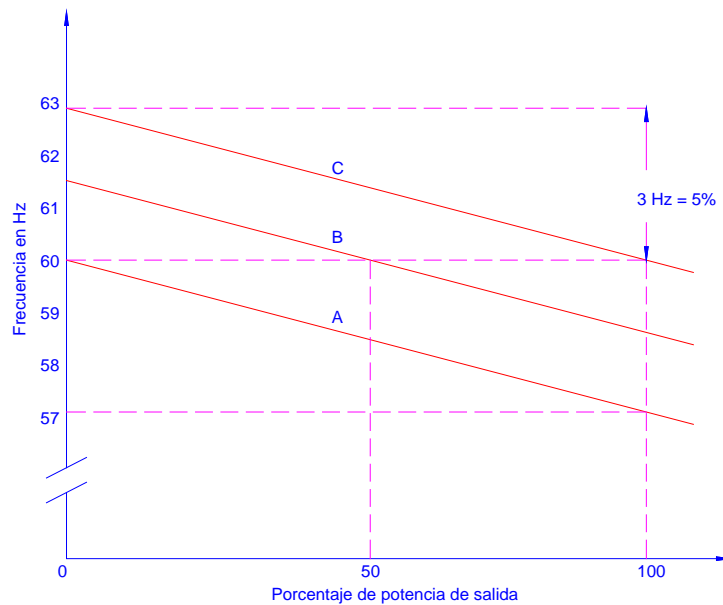


**Figura 1. 21.** Diagrama esquemático del gobernador y turbina.



**Figura 1. 22.** Diagrama esquemático del gobernador y turbina

En la práctica, el ajuste de la referencia de carga se lleva a cabo mediante la operación del “motor variador de velocidad”. El efecto de este ajuste esta ilustrado en la siguiente figura:



**Figura 1. 23.** Efecto del ajuste del variador de velocidad en la característica del regulador.

La RSF ejerce su acción de control sobre los variadores de carga de las unidades bajo RSF. Cuando dos o más generadores participan en la RSF, la señal en el variador de carga de cada unidad establece la proporción de carga que debe cubrir ante una variación en la carga del sistema.

Cuando un generador alimenta una carga aislada los ajustes en el variador de carga modifican la velocidad de rotación. Sin embargo en un sistema multimáquina los ajustes en el variador de carga modifican muy levemente la frecuencia del sistema dependiendo del tamaño relativo de la unidad frente a la generación total del sistema.

#### **1.5.2.1. Fundamentos del Control Automático de Generación (AGC)**

La restauración de la frecuencia del sistema al su valor nominal requiere una acción de control suplementaria o secundaria la cual ajusta la referencia de carga por medio de los variadores de velocidad. Por lo tanto, los medios básicos de control de la potencia de impulso para compensar las variaciones en la carga del sistema en la forma deseada son a través del control de las referencias de carga de las unidades de generación seleccionadas. Dado que la carga del sistema está permanentemente cambiando, es necesario cambiar la potencia entregada por los generadores en forma automática.

Los objetivos principales del control automático de generación (AGC) son: La participación de la RSF controlando la frecuencia en un valor nominal especificado y mantener el intercambio de potencia entre áreas de control en los valores pronosticados, ajustando la potencia entregada por los generadores. Esta función es normalmente referida como control de carga-frecuencia (LFC). El objetivo secundario es distribuir el cambio requerido de generación entre unidades minimizando los costos de operación; para ello se utiliza el denominado Despacho Económico.



## CAPITULO II

### 2. REGULADORES ELECTRONICOS.

#### 2.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS REGULADORES ELECTRÓNICOS.

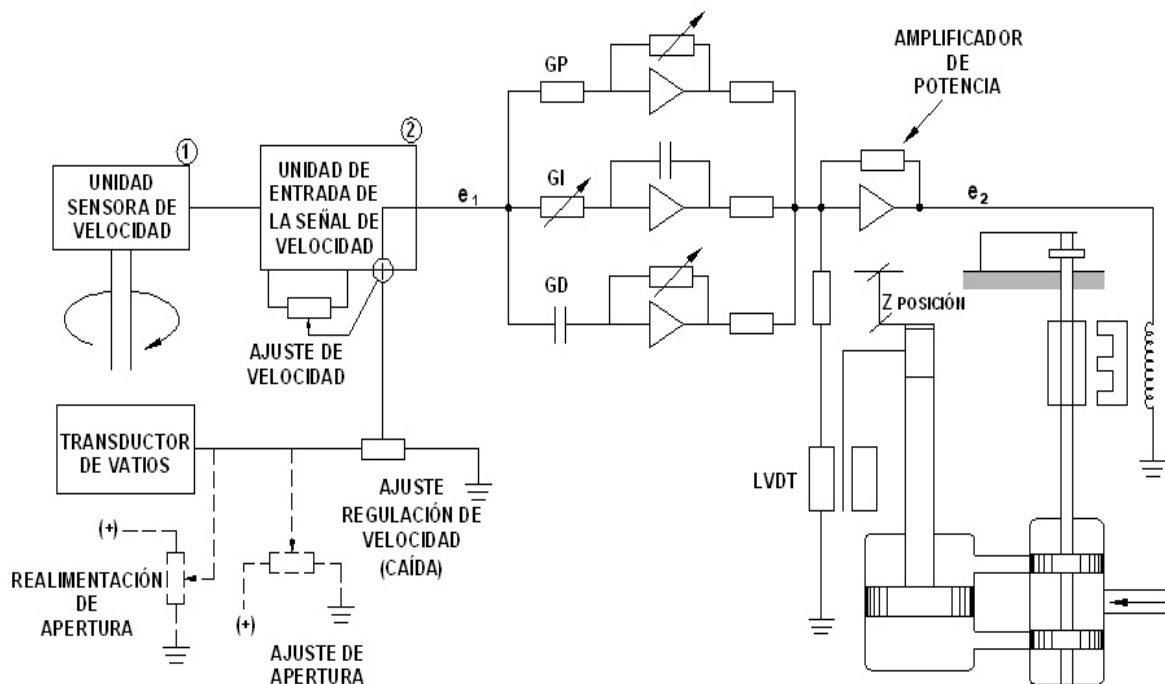
##### 2.1.1. Generalidades.

Una diferencia entre los reguladores de velocidad mecánicos y los electrónicos consiste en la posibilidad de utilizar la salida del generador (potencia real) en lugar de la posición del órgano de admisión como retroalimentación del elemento de control. Se obtiene como resultado una relación lineal entre el ajuste de velocidad y la carga de la unidad denominada regulación de velocidad.

La regulación de velocidad con los reguladores electrónicos se obtiene mayor exactitud en la retroalimentación, manteniendo la salida de la unidad constante independientemente de los cambios en la cabeza neta o de restricciones de flujo de agua, con ellos es posible implementar la acción de control derivativa que aumenta la velocidad de respuesta al cambio en la variable de salida y que no puede lograrse en reguladores mecánicos, así también la seguridad tanto de los equipos como las personas es mejorado.

En la Figura 2.1, en condiciones estables el error  $e_1=0$ ; cuando  $e_1$  es diferente de 0 se produce movimiento del órgano de admisión según el siguiente proceso:

Se amplifica la salida del PID y la salida del amplificador de potencia opera un transductor hidráulico que produce una salida proporcional a la corriente  $e_2$ .



**Figura 2. 1.** Regulador de velocidad electrónico

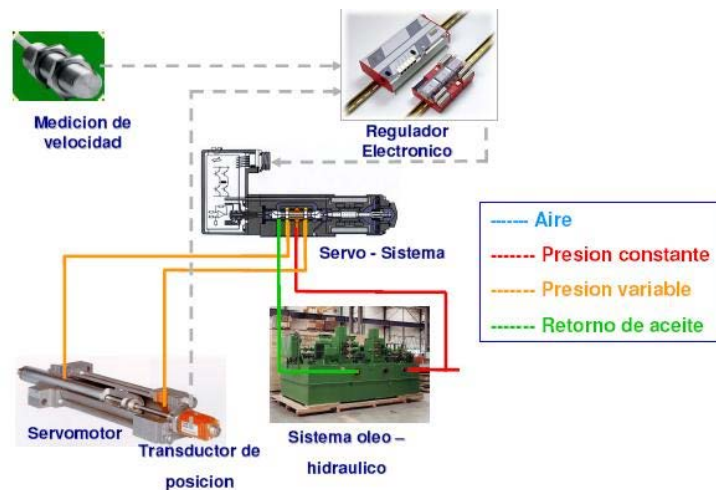
La unidad sensora de velocidad produce una señal de salida con frecuencia proporcional a la velocidad de la turbina. La unidad de entrada de la señal de velocidad compara la frecuencia con la de la señal referencia y si se presenta diferencia, se crea una señal de error  $e_1$ .

**Regulador digital.-** Hace referencia a los reguladores de última generación que pueden ejecutar muchas funciones de control adicionales a los reguladores convencionales. El sistema de regulación de velocidad está constituido por el regulador de velocidad electrónico y la unidad hidráulica de potencia. El regulador presentará una operación estable, confiable y optimizada en todos los modos de funcionamiento en vacío o con carga, son de gran versatilidad y pueden realizar entre otras las siguientes funciones:

- Control de velocidad y potencia de la unidad.
- Control del generador (algunos incluyen control de voltaje y de potencia reactiva).
- Control de flujo o caudal.

- Secuencia de control. Los reguladores tradicionales realizan secuencias de control por medio de relés, tales como: arranque, frenado y parada.
- Control remoto de la unidad.
- Esquema de optimización de carga.

El sistema de regulación de velocidad a ser suministrado en la modernización, tiene como finalidad controlar la velocidad de la turbina, desde las mediciones de frecuencia, potencia activa, posición del inyector y estados lógicos recibidos de dispositivos externos (medición y comunicación SCADA, Alarmas y actuadores de control existentes). En la Figura 2.2 se muestra un esquema de los componentes principales que forman parte de la modernización del sistema de regulación de velocidad.

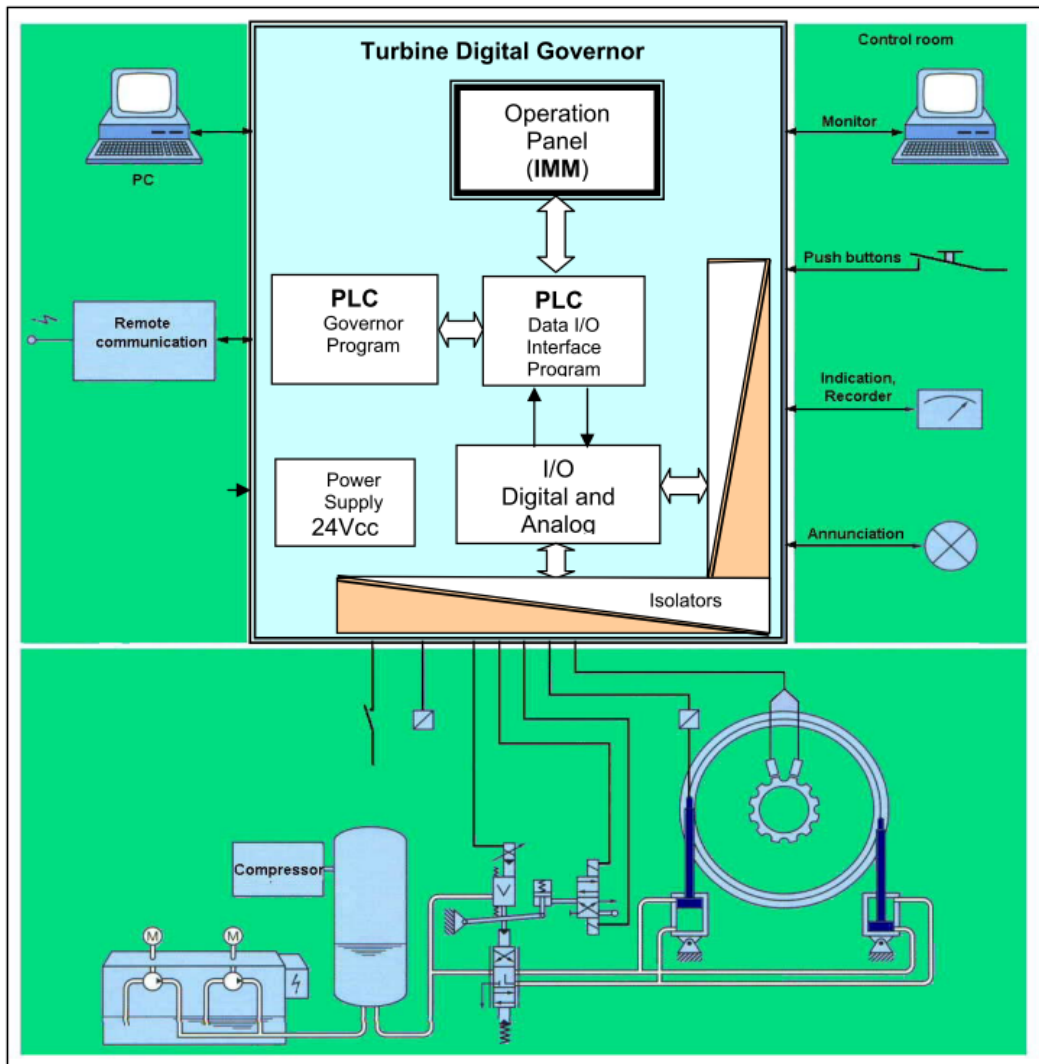


**Figura 2. 2.** Modernización de Regulador de velocidad<sup>12</sup>

<sup>12</sup> **Carrera Orellana, Jorge Andrés.** 2011. "Modernización del Sistema de Regulación de Velocidad en la Central Hidroeléctrica Carlos Mora". Cuenca, Azuay, Ecuador : s.n., 05 de Diciembre de 2011.

### 2.1.2. Hardware.

Consiste en módulos electrónicos programables, el panel de operación para el manejo local, los amplificadores de salida así como los aparatos adicionales requeridos para la captación de valores medidos, el desacoplamiento y la conversión de señales. Los distintos grupos se describen a continuación.



**Figura 2. 3.** Regulador de velocidad moderno para una turbina Francis.<sup>13</sup>

<sup>13</sup> Manual del regulador de velocidad de CH Mazar.

### **2.1.2.1. Módulos electrónicos.**

Los módulos electrónicos consisten en componentes de alta calidad industrial:

- Chasis principal con fuente de alimentación, procesador, memoria de programas y de datos.
- Módulos de entrada.
- Módulos de salida.

Por motivos de seguridad no se utilizan dispositivos de almacenamiento con partes móviles. Por esta razón el programa del usuario está almacenado en memoria Flash-Eprom quedando garantizado así que un fallo de tensión no origine ninguna pérdida del programa. El estado actual de todos los parámetros ajustables es almacenado en la memoria no volátil a fin de poder continuar operando el regulador de forma segura contra fallos incluso en caso de un fallo de tensión. Los módulos de entrada y salida requeridos están asignados de acuerdo a las funciones específicas de la central.

Con objeto de detectar de forma segura cualquier falla o fallas del regulador digital, el sistema cuenta con un relé watchdog para la operación de protecciones (parada de emergencia).

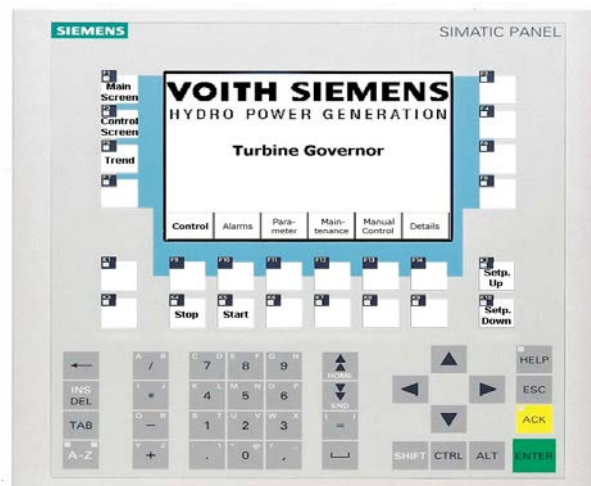
### **2.1.2.2. Panel de operador local.**

El regulador de turbina es manejado desde un panel de operador mediante un monitor de cristal líquido (LCD) con capacidad de desplegar gráficos y teclado de membrana con teclas de función programables a discreción y casilla para la entrada de números (HMI). El panel de operador está unido con el control programable por medio de una interface serie y un cable de conexión.

Las entradas numéricas y alfanuméricas son realizadas utilizando la característica “touch screen” del panel. El panel de operación está conectado por medio de

cables al PLC principal y de respaldo del regulador utilizando una red MPI (Multi Point Interface). El panel de operación mantiene una comunicación constante con los dos reguladores (principal/respaldo), independiente de cual esté activo.

Desde el panel de operación se puede acceder a todos los ajustes (set points) necesarios para la operación del regulador de velocidad, indicación de magnitudes actuales, ajustes básicos y otros parámetros. Para realizar cambios en los parámetros y prevenir accesos no autorizados, la entrada de nuevos parámetros (modificación) está protegida por una contraseña en el panel de operación.



**Figura 2. 4.** Panel de operación del regulador de velocidad.<sup>14</sup>

### Normas que se Aplican.

El Panel del Regulador de velocidad esta en conformidad con las normas internacionales:

- Compatibilidad electromagnética : IEC 801-2, IEC 801-4, IEC 60060, IEC61000-4-2/3/4/12

<sup>14</sup> Manual del regulador de velocidad de CH Mazar

- Protección contra surtos y vibraciones : IEC 255-5 clase III

### **2.1.2.3. Amplificadores de salida para la activación de válvulas proporcionales.**

Están previstos amplificadores de salida para la activación de los posicionadores. En el amplificador de salida se compara la consigna de apertura con el valor real (4-20mA) y, en función de la diferencia, se activa el correspondiente servo válvula por medio de una ganancia ajustable (bucle de regulación de posición). A la señal queda superpuesta una corriente alterna previniendo así el rozamiento estática en la válvula.

El amplificador eléctrico brinda una posibilidad de mando manual de emergencia para fines de mantenimiento y para las nuevas puestas en marcha después de revisiones. En esta modalidad de funcionamiento, las directrices, pueden ser posicionadas por medio de un potenciómetro ajustable, independientemente de la salida de consigna del regulador digital. De esta forma es posible controlar los bucles de regulación de posición sin que el regulador digital estuviese en condiciones de funcionar.

### **2.1.2.4. Aparatos adicionales**

Son los aparatos e instrumentos requeridos para la detección de valores medidos tales como velocidad, transductores de posición, etc., que pueden estar ubicados en el grupo o en otro lugar. Los amplificadores, transductores de medida adicionales etc., que puedan ser requeridos, estarán integrados en el armario del regulador.

## **Suministros de alimentación DC**

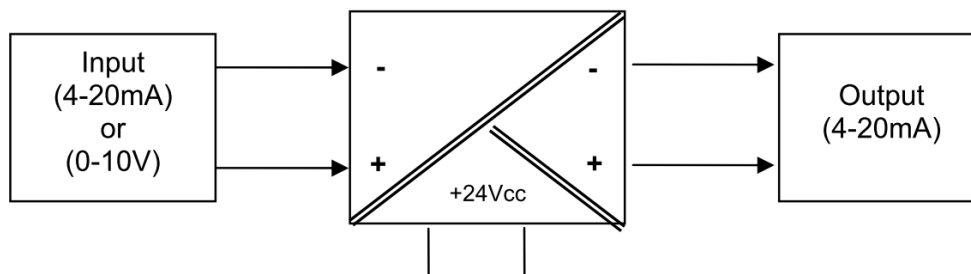
El regulador requiere una alimentación redundante conectada a tierra de 24 Vcc ó 48 Vcc. El tablero del regulador de velocidad operara con una corriente

continúa con el rango de 125 Vcc. Dos convertidores de corriente redundantes de 125 Vcc, deberán suministrar 24 Vcc ó 48 Vcc según el caso, para todos los equipos electrónicos en el tablero del regulador de velocidad.

En la salida de los convertidores dos diodos serán usados para configurar un camino redundante para el voltaje de 24 Vcc ó 48 Vcc. Si un convertidor falla, el otro deberá suministrar la corriente para el tablero, y una alarma será enviada para el sistema SCADA de la planta.

### Amplificadores de aislamiento.

Los amplificadores de aislamiento utilizados cuentan con una separación galvánica entre la entrada y la salida así como también entre la alimentación de energía y la entrada o salida. Cualquier cambio en la salida no tiene ningún efecto en la entrada.



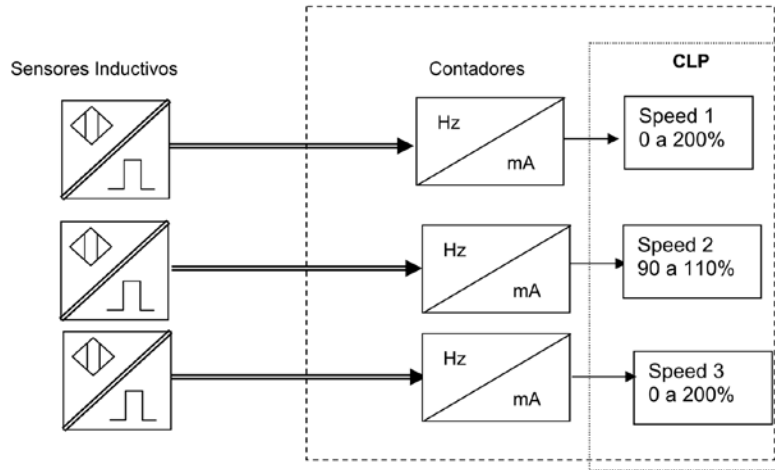
**Figura 2. 5.** Amplificador de aislamiento.

### Detección de velocidad

Para la detección de velocidad es usado tres sensores de proximidad inductivos posicionados en una rueda con dientes en el eje del generador que irán a generar en la salida un señal de onda cuadrada u otro tipo de onda con amplitud independiente de la velocidad de la turbina.



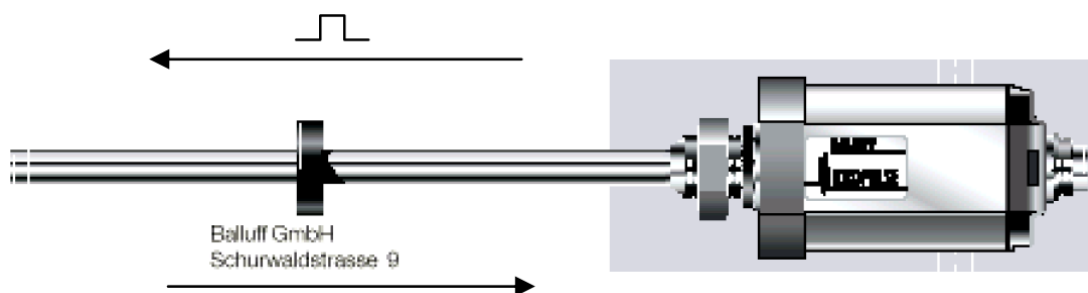
Un contador ira convertir esta onda en un señal de corriente de 4-20 mA, lo que corresponde a 0 a 200% y 90 o 110% de la velocidad nominal.



**Figura 2. 6.** Sensores de velocidad.

### Transmisores de posición

La posición de los inyectores y de los deflectores es detectada por transductores de medida goniométricos capacitivos a técnica de 2 hilos. Normalmente en la posición cerrada la señal es de 4 mA y en la posición abierta la señal es de 20 mA.



**Figura 2. 7.** Transmisores de posición.<sup>15</sup>

<sup>15</sup> Manual de regulador de velocidad de CH Mazar

### 2.1.2.5. Transductor de Potencia

La señal de potencia recibida de los transductores de potencia y corriente es convertida en una señal proporcional de 4 a 20mA a través de un transductor de potencia instalado en el panel del regulador, este transductor tendrá clase de precisión de 0,25%. Esta señal es entonces enviada al PLC a través de una entrada analógica.

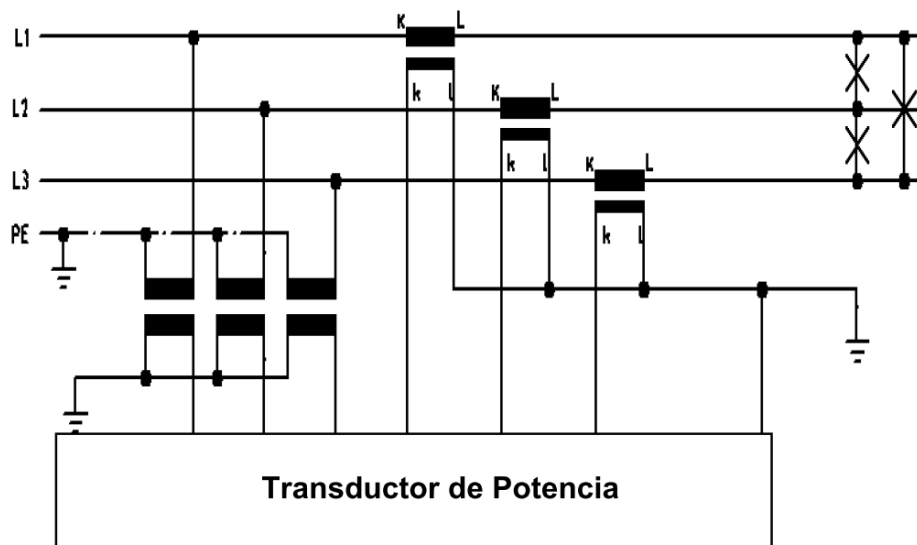


Figura 2. 8. Transductor de Potencia

### 2.1.2.6. Intercambio de señales

Para el intercambio de señales con otros sistemas se ponen a disposición contactos aislados. Las señales analógicas se desacoplan a través de amplificadores de aislamiento. Las señales enviadas al regulador por sistemas ajenos también deben estar aisladas galvánicamente.

### **2.1.3. Bucles de regulación**

#### **2.1.3.1. Regulación de velocidad**

El regulador de velocidad es un regulador de acción proporcional, integral, derivada, proporcional controlado por parámetros. Hay 3 juegos de parámetros: 1 para marcha en vacío (optimizado para la sincronización), 1 para la estabilización en servicio en régimen interconectado (pequeña amortiguación) y la estabilización en servicio en régimen aislado (gran amortiguación). Cada juego de parámetros consiste en:

- Permanent Speed droop
- Temporary Speed Droop
- Damping Time
- Derivative Time
- Derivative Gain

#### **2.1.3.2. Regulación de apertura**

Esta modalidad de regulación es solo posible en el servicio en régimen interconectado, es decir con el interruptor cerrado y la velocidad dentro de la banda de velocidad. La regulación de apertura corresponde a una entrada de consigna en el bucle de regulación de posición para las directrices. La consigna de apertura es comparada con la limitación de apertura y el menor de los dos valores es transmitido al bucle de regulación de posición (selección de mínimo).

#### **2.1.3.3. Regulación de potencia**

Con el fin de que la turbina responda rápidamente a variaciones de la consigna de potencia, ésta es proporcionada sin demora al bucle de regulación de apertura por una curva característica de pilotaje de potencia que generalmente es en función del salto siempre que exista una señal del salto. De esta forma el valor real sigue a la consigna siempre tan rápidamente como lo admitan los elementos de regulación y el regulador de potencia PI, el cual suele ser relativamente lento, tiene que igualar solo las imprecisiones o influencias no adquiridas.

Gracias a un estatismo de frecuencia de potencia ajustable el grupo contribuye a mantener la frecuencia de la red. Con objeto de cumplir mayores requerimientos en caso de redes débiles algunos reguladores proporcionan una solución donde el bucle de regulación de velocidad y el bucle de regulación de potencia están unidos por un circuito sumador, es decir los dos bucles de regulación son activos al mismo tiempo.

#### **2.1.3.4. Conmutación suave**

Todos los elementos del bucle de regulación no activos en un momento determinado son seguidos tal que esté garantizada una conmutación suave en cualquier momento, es decir en caso de cualquier cambio de la modalidad de regulación no cambia la posición de los servomotores y, por consiguiente, la potencia alimentada a la red es mantenida constante.

#### **2.1.3.5. Detección de red aislada**

En el régimen interconectado el regulador de turbina comprueba continuamente si se ha abandonado la banda de velocidad ajustable quedando garantizado de esta forma que se detectan de forma fiable cualesquier fallas de red. Si la banda de velocidad es abandonada, el sistema conmuta automáticamente a la modalidad regulación de velocidad con los parámetros de red aislada. Este ancho de la banda de velocidad puede ser ajustado individualmente por medio de la función de entrada de parámetros.

#### **2.1.3.6. Limitaciones**

##### **Limitación de apertura**

La limitación de apertura puede ser ajustada a discreción siendo efectiva bajo todos los modos de regulación incluso durante el proceso de arranque.

## **Apertura máxima**

La apertura de los inyectores puede ser delimitada mediante una limitación máxima invariable para evitar aperturas mayores.

## **Apertura mínima**

Adicionalmente es posible una limitación mínima que es operativa una vez haya sido conectado el interruptor del generador.

### **2.1.4. Funciones del Regulador**

#### **2.1.4.1. Proceso de arranque y parada con control de carga**

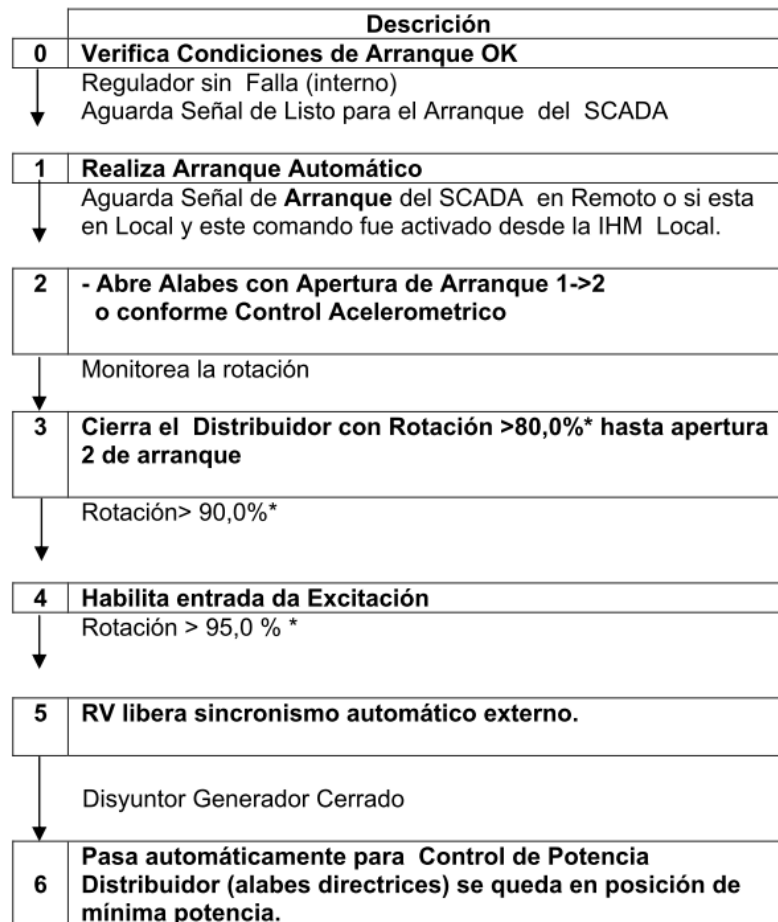
##### **Proceso de arranque:**

Es realizado por vía de dos aperturas de arranque dependientes del salto de manera que el grupo puede ser sincronizado con la red lo más rápidamente posible cualesquiera que sean las condiciones marginales.

El arranque de la turbina es por tanto controlado vía 2 aberturas programables de los alabes directrices en caso de una turbina Francis o por un control de aceleración de la velocidad que puede ser activado y este controla de manera constante la aceleración de la turbina desde la condición de máquina parada hasta la velocidad nominal. En cierto límite de velocidad el regulador de velocidad asumirá el control para sincronizar la máquina. Mediante dos umbrales de velocidad ajustables se emiten las órdenes para la conexión de la excitatriz y del sincronizador. Después de que el interruptor sea cerrado, el regulador automáticamente activa la regulación de Potencia.

##### **Secuencia de Arranque**

La Figura 2.9 muestra la secuencia de arranque realizada desde el punto de vista del regulador con las condiciones de sus entradas y salidas y no corresponden a la secuencia completa de arranque que se dan por el sistema SACADA



**Figura 2. 9.** Secuencia de arranque del regulador de velocidad para una turbina Francis.<sup>16</sup>

### Proceso de parada:

En caso de una parada normal los alabes directrices son cerrados hasta una posición de operación sin carga. Después de alcanzar la posición sin carga será generada una señal que se puede utilizar para abrir el interruptor del generador y luego cerrar los alabes directrices a la máxima velocidad hasta la posición

<sup>16</sup> \* Son parametrizados vía IHM y pueden ser ajustados en el comissionamiento

totalmente cerrado. La parada normal es comandada por la avivación de la entrada digital “Parar Regulador” vía comando Local o Remoto.

En caso de un fallo debe ser activada la entrada de parada para el “cierre rápido”, en el que el regulador cambia también a “parada”, pero los alabes directrices se cierran inmediatamente a la velocidad máxima.

Secuencia de Parada:

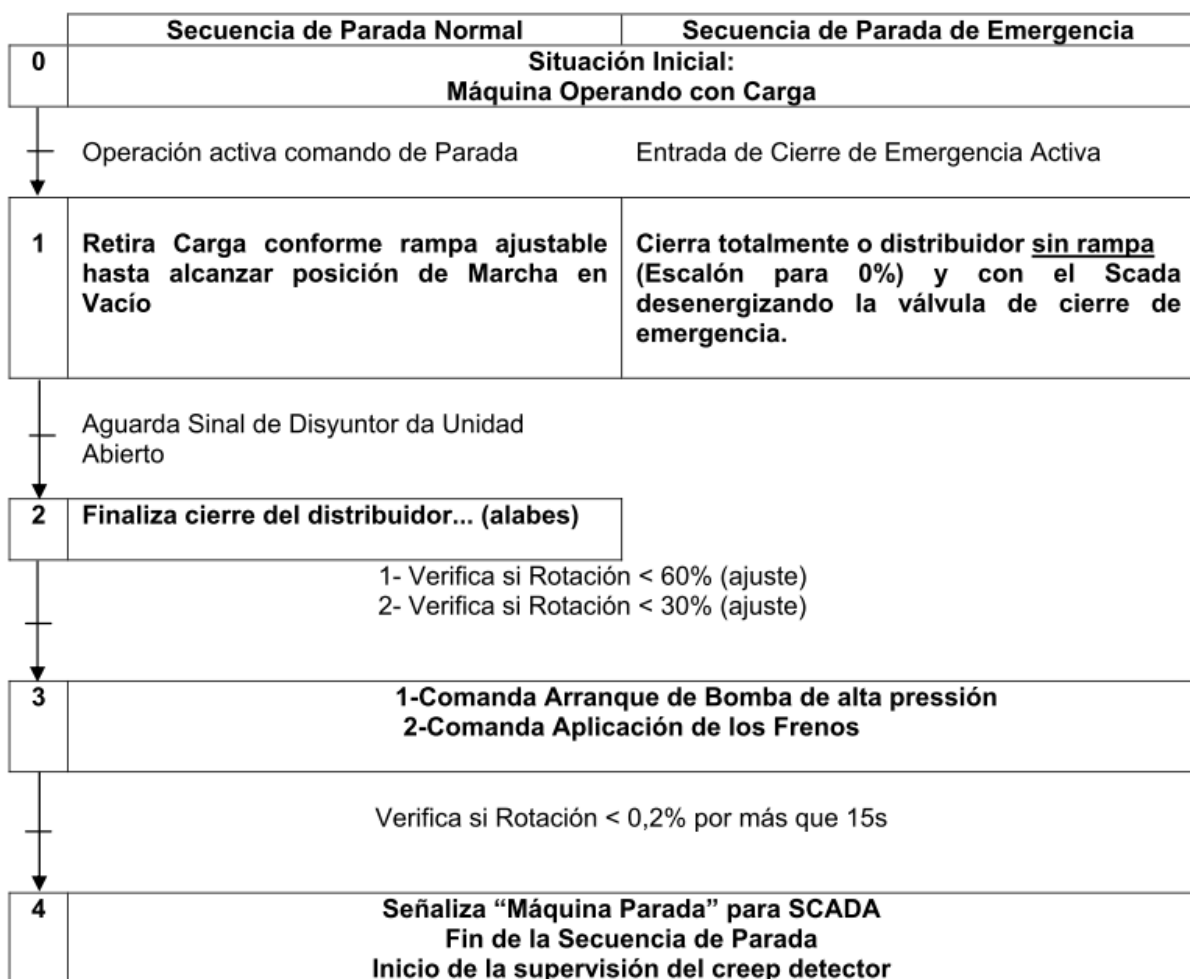


Figura 2. 10. Secuencia de parada del regulador de velocidad.

#### **2.1.4.2. Indicación/entrada de parámetros**

Esta función permite la indicación y edición de todos los parámetros del regulador, gamas de medición, valores límites así como puntos de apoyo para curvas de uso en el regulador ofreciendo al usuario una herramienta muy potente pero aún fácil de manejar para llevar a cabo la mayor parte de los trabajos de mantenimiento, sin necesidad de una unidad de programación compleja.

Desde el HMI pueden modificarse todos los parámetros mediante esta función siempre que el usuario tenga los derechos de acceso necesarios, lo que es controlado por la entrada de una palabra clave.

#### **2.1.4.3. Generación de valores límite**

El regulador de turbina genera los valores límites de velocidad y posición de directrices o apertura de los inyectores, requeridos por el sistema de control de la central. Todos los valores límites pueden ser variados por la entrada de parámetros.

#### **2.1.4.4. Monitorización**

Todas las señales analógicas introducidas en el regulador de 4-20mA o 0-10Vdc son monitorizados contra fallo. La señal de velocidad se verifica en función de la posición de los alabes directrices, es decir tiene que existir una señal de velocidad cuando éstas están abiertas por un tiempo determinado. De esta forma se efectúa también la monitorización contra un fallo del sistema de detección de velocidad, además se monitoriza la desviación de la consigna del valor real de la posición de los alabes directrices, es decir se detecta un fallo en el bucle analógico de regulación de apertura, así como un fallo en los posicionadores hidráulicos y se proporciona una señalización de falla, la función del programa del regulador es vigilada por un watch dog.



## **Salidas de señalizaciones de fallas**

El regulador de turbina emite una indicación de falla centralizada así como una alarma centralizada. Esta última deberá provocar la parada de la unidad a través del sistema de protección.

### **2.1.4.5. Detección de velocidad independiente del regulador**

Con un segundo sensor de velocidad y un relay de velocidad separado se efectúa una detección e indicación de sobre velocidad redundante, adicional a la monitorización interna del regulador. Con la ayuda de la salida analógica del relay de sobre velocidad la función del último es monitorizada mediante un control de verosimilitud en el regulador. La segunda señal de velocidad puede ser aprovechada para la regulación de velocidad al fallar la primera.

### **2.1.4.6. Parámetros adaptativos para los bucles de regulación de velocidad y de potencia**

Los parámetros adaptativos para el bucle de regulación de velocidad pueden reportar una mejora notable de las propiedades transientes del sistema regulado. Adicionalmente a los tres juegos de parámetros para marcha en vacío, régimen interconectado y régimen aislado, los parámetros del regulador PID (P) se definen como función del salto actual y de la apertura de los alabes directrices.

### **2.1.4.7. Regulador redundante**

Gracias al uso exclusivo de módulos y componentes de estándar industrial de alta calidad los reguladores digitales ofrecen una disponibilidad muy alta. Aun así, no puede excluirse al cien por ciento una falla en el sistema. Para satisfacer los máximos requerimientos de un funcionamiento a prueba de fallos del regulador de turbina esta prevista una solución “hot stand by” con redundancia total de hardware y software (permanentemente activo) del PLC utilizado.

Hay una redundancia total del regulador digital con excepción del panel operador, es decir tanto las unidades centrales de proceso (CPUs), memoria, fuente de alimentación como también todas las entradas, salidas y contadores están duplicados. Todos los bucles de control son seguidos tal que, al fallar el regulador principal, el regulador redundante pueda hacerse cargo sin demora de la regulación conmutando las salidas. Gracias al seguimiento la conmutación es suave sin que el funcionamiento del grupo fuese comprometido.

El fallo del PLC principal se indica por la caída de la señal de Watch Dog, en esta situación el PLC auxiliar asume inmediatamente el control de la turbina, y todos los bucles de control se mantienen, sin ninguna transición en el sistema hidráulico. Cuando se vuelve al PLC principal, el operador puede transferir el control usando la llave "PC/PLC MAIN" en el panel de operación. Esta conmutación mantendrá la máquina con la misma carga sin ninguna alteración en el sistema.

Las salidas analógicas y digitales son controladas por PLC activo, un PLC puede enviar solamente un comando a una salida cuando tiene el control activo. Las entradas analógicas y digitales del regulador son leídas simultáneamente por ambos PLCs.

#### **2.1.4.8. Software base y sistema de desarrollo**

Será suministrado un ordenador personal con el sistema de desarrollo incluidos el software de programación y el programa de aplicación adaptados a la central que está destinado el regulador. Además de las funciones de mantenimiento, las cuales pueden manejarse directamente desde el panel de operador sin unidad de programación, el sistema brinda al usuario el pleno acceso a todas las funciones necesarias para programar el regulador.

Están incluidas las siguientes funciones:

- Transmitir el programa al sistema de destino
- Leer y escribir parámetros
- Ensayo en línea con funciones de osciloscopio
- Modificaciones del programa con el editor gráfico de diagramas lógicos

#### **2.1.4.9. Comunicación Serial con SCADA**

El protocolo de comunicación entre Regulador de Velocidad y el SCADA puede ser el PROFIBUS-DP o el MODBUS

#### **2.1.4.10. Comportamiento en caso de falla de la comunicación serial con SCADA**

Todas las señales convencionales necesarias para mantener la turbina en condiciones de operación en caso de falla de comunicación con el SCADA, están disponible vía interface convencional punto-a-punto.

#### **2.1.5. Caída de velocidad (estatismo o compensación)**

Es una característica propia del regulador por medio de la cual cada vez que se presente una disminución en la velocidad de la turbina, se produce un incremento en la apertura del órgano de admisión, en decir es la diferencia de velocidad en porcentaje permitida cuando las unidades están operando entre 0 y 100% de apertura. La caída de velocidad puede ser permanente o temporal.

$N_R$ : Velocidad sincrónica

G: Apertura

$G_R$ : Apertura de referencia

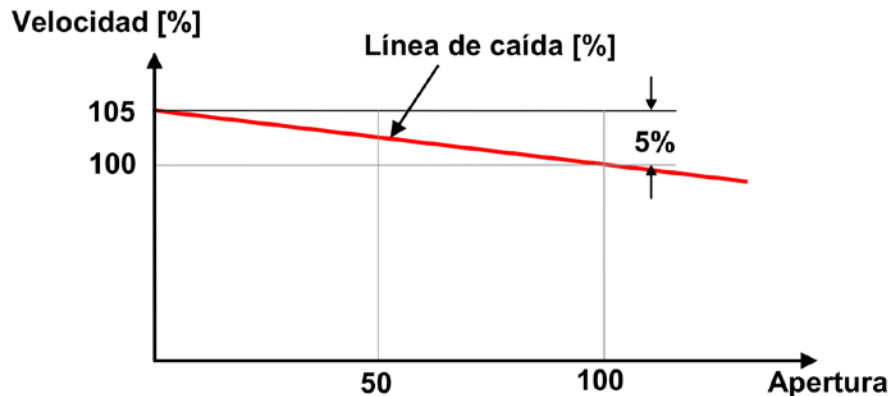


Figura 2. 11. Curva de la caída de velocidad

**Caída de velocidad permanente (compensación primaria o estatismo permanente).** Es la caída de velocidad que permanece en estado estable después que decae la acción del dispositivo amortiguador y se completa dicha acción, se utiliza para repartir carga entre las unidades cuando operan en paralelo. Generalmente su valor es del 5% aunque puede alcanzar hasta el 10%.

**Estatismo temporal (compensación secundaria).** Debido a que en las turbinas hidráulicas, el estatismo permanente no es suficiente para estabilizar el sistema debido a la inercia del agua en la tubería, por tanto se requiere dotar a los reguladores del estatismo temporal, que es la caída de velocidad que ocurriría si la acción descendente del dispositivo amortiguador fuera bloqueada o el estatismo permanente se hiciera inactivo. El valor de este parámetro se encuentra entre el 35% y 70%, no obstante, puede alcanzar valores hasta del 150%.

### 2.1.6. Estabilidad del regulador

Se dice que un grupo turbina-generador es estable si las oscilaciones de velocidad seguidas a un cambio de carga se amortiguan en un tiempo razonable, y se dice que es inestable si la amplitud de la velocidad crece con el tiempo.

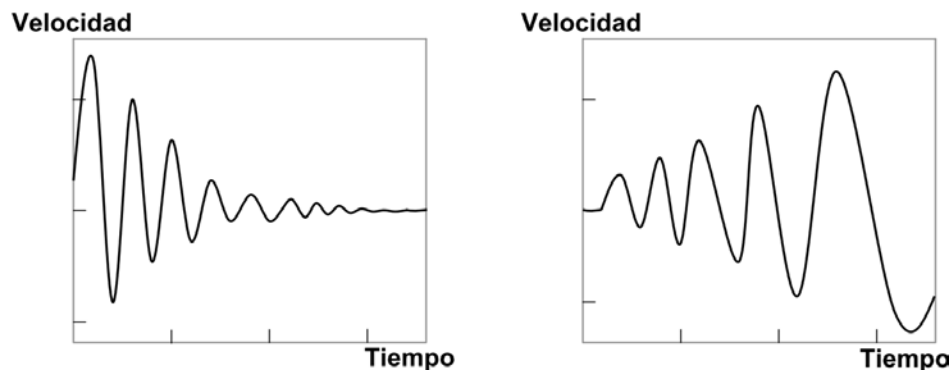


Figura 2. 12. Representación de estabilidad e inestabilidad

### 2.1.6.1. Tiempo de arranque del agua $T_w$ .

Es el tiempo requerido para acelerar el flujo en una tubería, desde cero hasta una velocidad  $V_0$  cuya energía potencial es  $H_0$  en una longitud  $L$  (valores típico bajo carga: 0.5 - 4seg), la ecuación para obtener el tiempo de arranque del aguas es:

$T_w$ , para una tubería de longitud  $L$ :

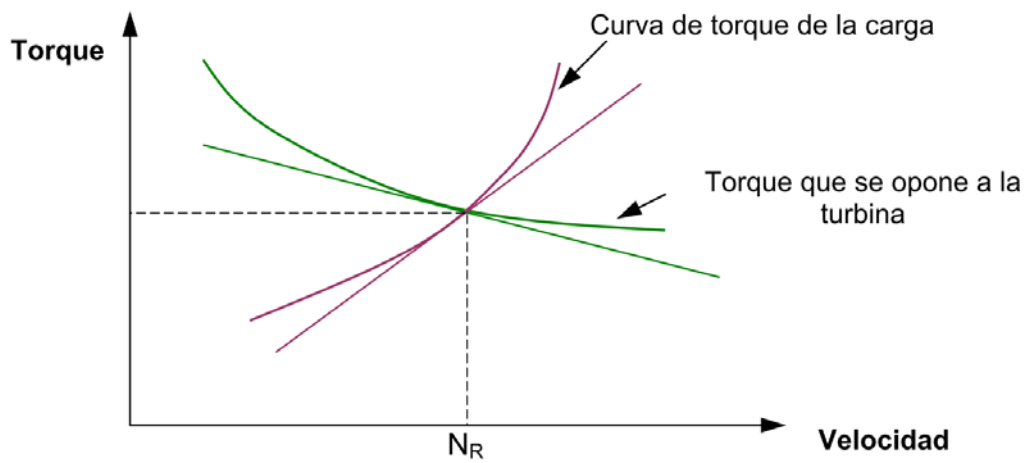
y dividirla por la semisuma del área mayor y del área menor del corte transversal al eje de la tubería. Para evaluar la descarga a través del tubo de aspiración se tomarán longitudes medias de los tramos y se dividirá por la semisuma de las áreas inicial y final de cada uno de ellos.

El tiempo que se evalúa sin tener en cuenta el aporte de la descarga de la turbina se denomina  $T'_w$  que se utilizará en el criterio de estabilidad de *Gordon*.

#### **2.1.6.2. Tiempo mecánico de arranque $T_m$ .**

Es el tiempo en el cual la unidad se acelera desde cero hasta velocidad nominal cuando se aplica el torque nominal, el cual está dado por la siguiente ecuación:

**Coeficiente de autorregulación  $\alpha$ .** Se define como la diferencia algebraica entre el coeficiente de autorregulación de la carga y el de la turbina.



#### 2.1.6.4. Inercia del generador.

Se dota de una cantidad adecuada de inercia al grupo turbina-generador para mantener los aumentos de velocidad subsecuentes a un rechazo de carga dentro de límites razonables. La inercia del generador se mantendrá tan pequeña como sea posible (con base en las características del regulador).

Los siguientes factores se consideran en la selección de la inercia del generador:

- **Fluctuaciones de frecuencia admisibles.** Dependen del tipo de carga.
- **Tamaño del sistema.** Una unidad se diseñará como estable para operación aislada si alimenta el 40% o más de la carga del sistema, o si existen posibilidades de que llegue a estar aislada por fallas en las líneas de transmisión. La estabilidad total del sistema se incrementa si la mayoría de las unidades de dicho sistema son estables en operación aislada.
- **Tipo de carga.** Periódicamente cambian las cargas que contribuye a la inestabilidad del sistema, por lo tanto se requerirá más inercia si este tipo de cargas están presentes en el sistema.
- **Conducción del agua.** Uno de los factores más importantes en la selección de la inercia es el tamaño, longitud y trayectoria de la conducción del agua a la planta. Si se aumenta el tamaño de la conducción podría disminuirse la inercia del generador.
- **Tiempos del regulador.** Disminuyendo los tiempos de apertura y cierre del regulador, se puede mejorar la estabilidad del sistema, pero no pueden disminuirse arbitrariamente dado que debe garantizarse que la presión de golpe de ariete se mantenga dentro de los límites de diseño.

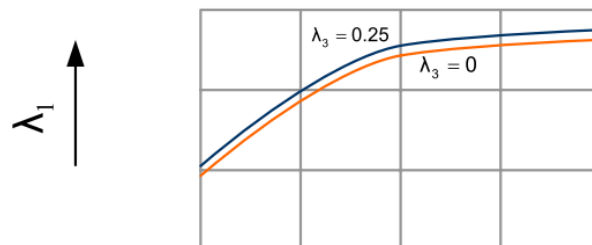
La relación que permite calcular la inercia normal del generador es:



Donde:  $N_R$  : Velocidad sincrónica [rpm]  
kVA : Potencia nominal del generador  
I: Memento de inercia polar [ $kg \cdot m^2$ ]

#### 2.1.6.5. Criterios de estabilidad

- **Criterio de Routh–Hurwitz.** Introduciendo parámetros adimensionales, se tienen:



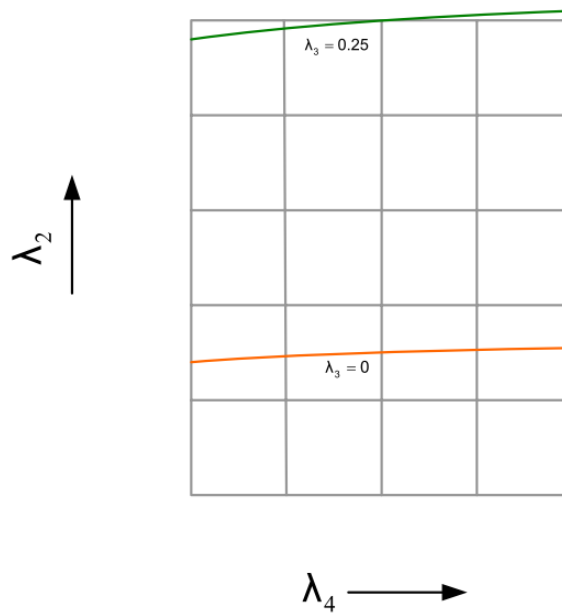


Figura 2. 14. Valores del coeficiente de autorregulación  $\alpha$ .<sup>20</sup>

- **Criterio del Bureau of Reclamation** <sup>21</sup>. Para una buena regulación es que la relación entre el tiempo mecánico y el tiempo del agua sea mayor que 2:

$\lambda$

seleccionando un punto de la zona de buena estabilidad se pueden determinar los tiempos efectivos de apertura y cierre del regulador. El  $T'_w$  es el tiempo del agua sin incluir la contribución de la descarga de la turbina de reacción. Si se trata de una turbina Pelton, ambos tiempos son iguales.

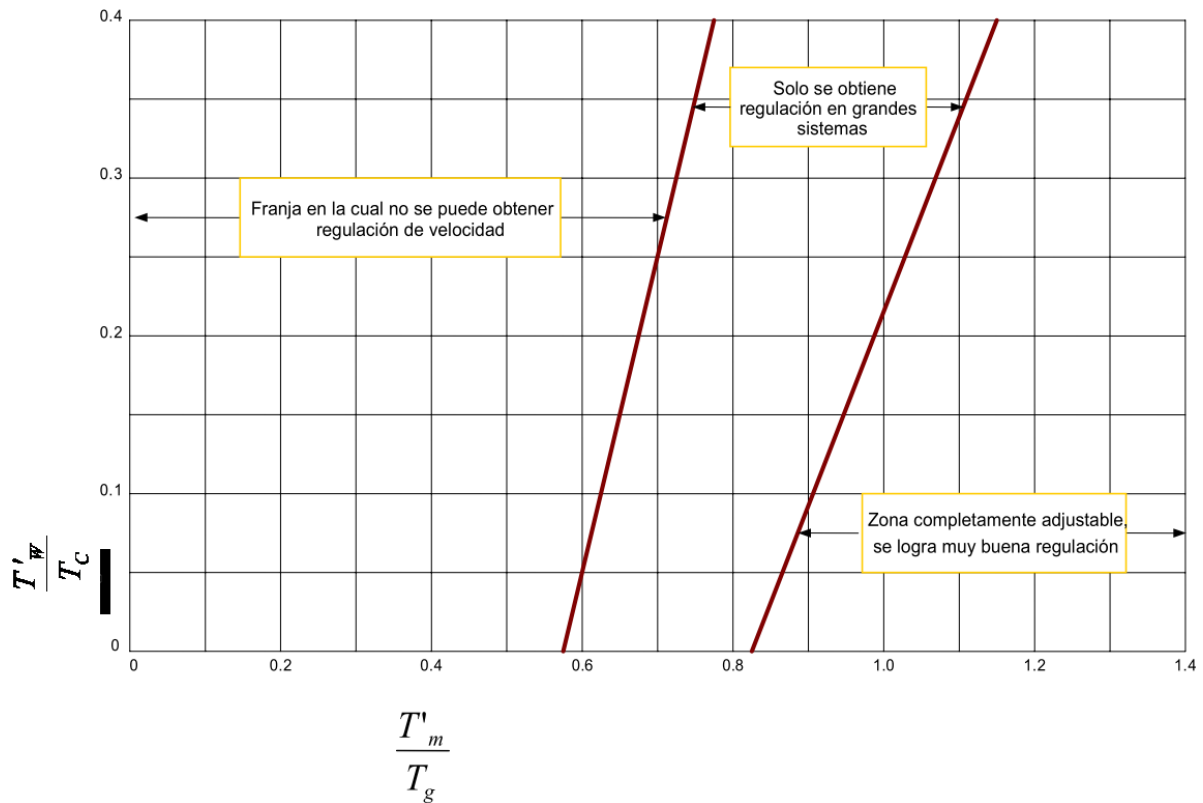
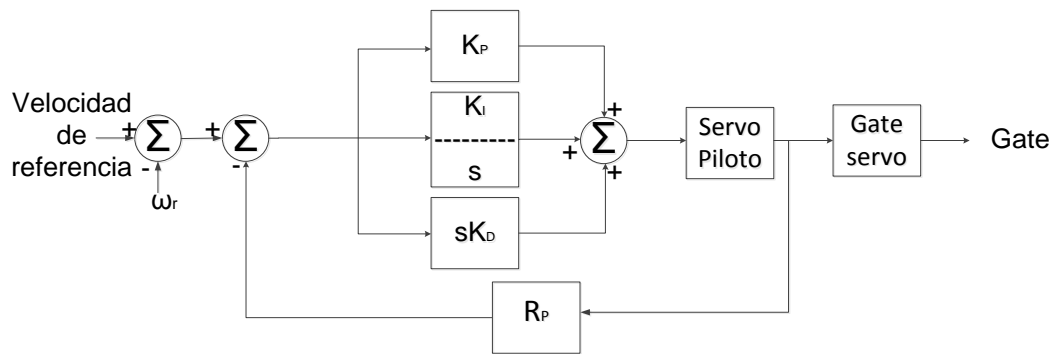


Figura 2. 15. Curva de estabilidad de Gordon

### 2.1.7. Controlador

El controlador del Regulador es tipo PID. El hardware del controlador dispone de una unidad para la captación de valores medidos, el desacoplamiento y la conversión de señales (Ver Figura 2.16).



**Figura 2. 16.** Controlador PID aplicado en modo general para reguladores electrónicos de velocidad<sup>22</sup>

### 2.1.8. Modernización del sistema hidráulico

Se resume que además de la sustitución del regulador de velocidad existente por un regulador electrónico también se debe suministrar una moderna unidad hidráulica de potencia.

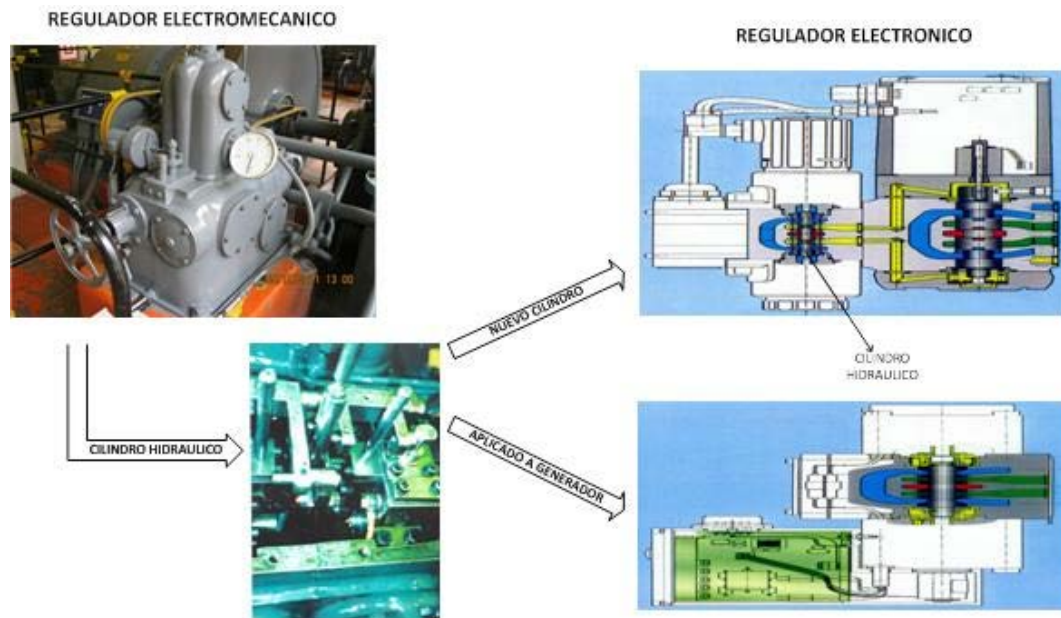
Dicha unidad es responsable por garantizar la filtración necesaria, suministrar presión suficiente de aceite, acumular aceite presurizado y limitar la presión del sistema, permitiendo el ajuste de la forma de operación de las bombas para el modo continuo o intermitente.

La solución consiste en sustituir el cilindro hidráulico, por uno moderno y nuevo, capaz de responder de manera óptima ante el accionamiento de las agujas de la turbina (Actuador Servomotor), a su vez, sustituir el regulador mecánico, válvulas, y equipos de control asociados antiguos, por nuevos y modernos equipos electromecánicos.

El nuevo cilindro hidráulico comandara los servomotores de los inyectores, a través del sistema de acoplamiento mecánico disponible en el regulador mecánico

<sup>22</sup>(<http://biblioteca.cenace.org.ec/jspui/bitstream/123456789/826/32/Regulaci%C3%B3nVelocidad%201.pdf>)

actual. Este cilindro contará con un sensor de posición en su eje, para permitir el ingreso de su señal al controlador.



**Figura 2. 17.** Diagrama de cambio de actuador de servomotor (Cilindro hidráulico)<sup>23</sup>

### 2.1.9. Funciones principales del regulador de velocidad digital

El Regulador electrónico es una unidad de adquisición, registro y control de velocidad de la turbina. Las funciones principales del regulador electrónico son las siguientes:

- Regulación automática de velocidad con banda de regulación ajustable.
- Regulación PID, con ajustes independientes para operación en vacío o en carga.
- Partida controlada para aceleración adecuada de la unidad.
- Regulación Manual por posición del distribuidor.

<sup>23</sup> **Carrera Orellana, Jorge Andrés.** 2011. "Modernización del Sistema de Regulación de Velocidad en la Central Hidroeléctrica Carlos Mora". Cuenca, Azuay, Ecuador : s.n., 05 de Diciembre de 2011.

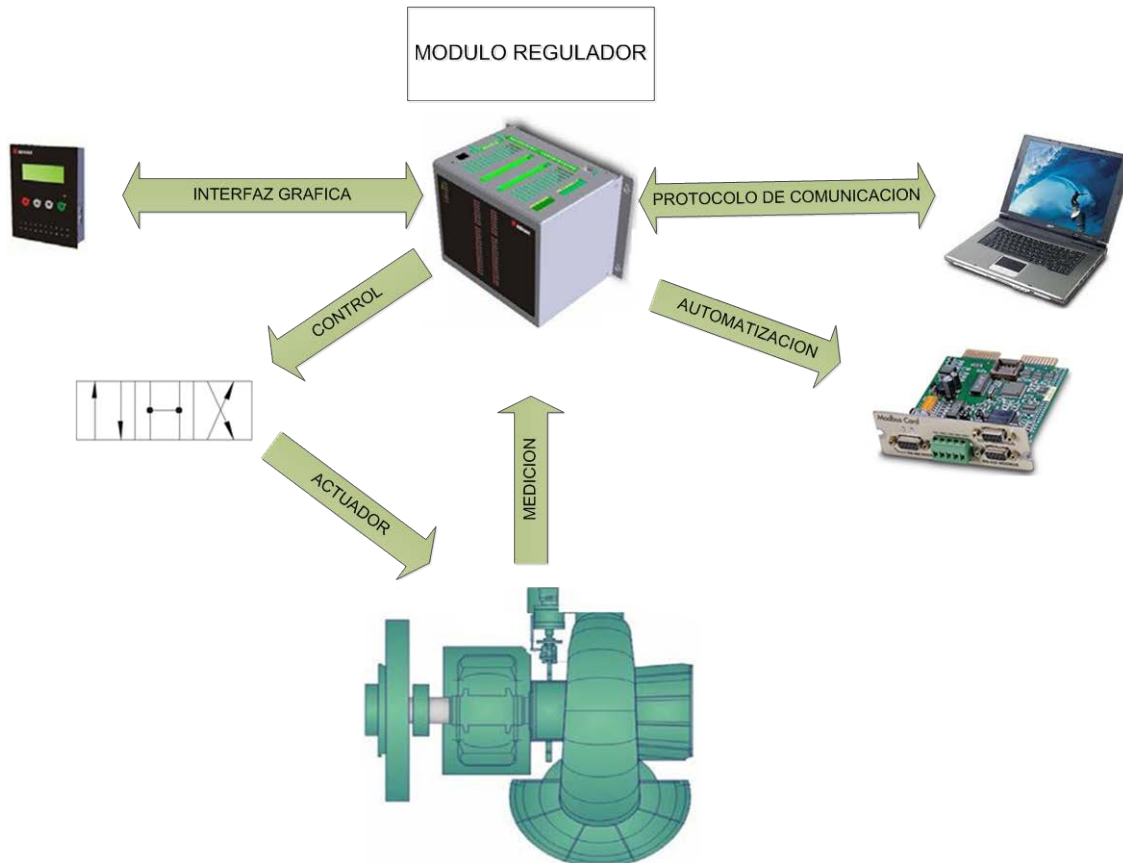
- Control PID del servomotor del distribuidor.
- Ajustes vía Interfaz hombre-Máquina (HMI).
- Limitador de apertura servomotor de aguja y deflector.
- Comunicaciones a través de un protocolo de comunicación industrial.
- Controlar una turbina hidráulica a través de referencias de posición, velocidad y potencia activa, manteniendo la operación de forma estable y segura.
- Ejecutar automáticamente los procesos de arranque y paro de la unidad de modo integral o paso-a-paso.
- Controlar la unidad hidráulica y todos sus componentes.
- Supervisar el proceso de regulación de velocidad, actuando en el caso de fallas y alarmas.
- Establecer comunicación con el SCADA de la central a través de protocolo industrial y de señales analógicas, digitales para indicar, respectivamente los estados de todos los componentes.

#### **2.1.10. Especificación electrónica**

El regulador de velocidad es netamente electrónico constituidos por un módulo digital, cuyo controlador es de tipo PID. Como proyección debe contener una unidad programable, un panel de control local, amplificadores de salida, aparatos e instrumentación adicionales requeridos para la captación de valores medidos, el desacoplamiento y la conversión de señales.

El regulador de velocidad dispondrá de una entrada de comunicaciones mediante un protocolo de comunicación industrial como el PROFIBUS, MODBUS o ETHERNET para ingresar datos y ser compatibles con el sistema SCADA existente o para ingresar estos mismos parámetros remotamente, a través de oficina de operación u oficina de comunicaciones remota. Las limitaciones en los servomotores de apertura y cierre de aguja, deflectores y las indicaciones de velocidad deberán estar disponibles en el módulo electrónico digital y desde ahí

por medio de un PLC (sistema SCADA) controlara las mismas para su monitoreo y al tablero de control para su operación.



**Figura 2. 18.** Aplicación del Regulador digital<sup>24</sup>

Los reguladores controlan el arranque automático, sincronización, operación de las unidades con carga y proceso de parada (normal y emergente). Garantizará el control de velocidad en un rango de 90 y 110% de la velocidad nominal.

Los reguladores en su parte de control y automatización, deberán limitar la sobrepresión al ingreso de las turbinas al 15% de su altura neta (m), al producirse un rechazo de carga con el 100% de la carga normal en las turbinas y la sobre-velocidad al 20%. La banda muerta no será mayor a 0,02 de la velocidad nominal, bajo las condiciones más críticas.

<sup>24</sup> <http://www.reivax.com/br/es/productos/linea-energy/regulador-de-velocidade-rvx-energy.html>

Los módulos de memoria principal deberán disponer de baterías para seguir operando, incluso en fallo de suministro de energía eléctrica. El Regulador puede disponer de un puerto de comunicación RS-485 y uno de Ethernet con protocolo MODBUS, PROFIBUS por ejemplo para las comunicaciones.

Los Reguladores de Velocidad podrán funcionar en los siguientes modos de operación:

- Limitador de Apertura.
- Control de potencia.
- Control de velocidad.

#### **2.1.11. Especificación de la unidad hidráulica**

La proyección de la unidad hidráulica para un grupo dado de la central estará asociada a cada regulador electrónico de velocidad y PLC de las máquinas; la que a su vez, permitirá interactuar todas las partes del sistema de control de velocidad para las condiciones de operación normal y emergente.

Debido a fallas mecánicas y discontinuidad del lote de repuestos se debe hacer el remplazo de: bombas, válvula distribuidora de aceite, implementación de una cámara de aire-aceite en caso de que no dispusiera la central, accesorios y componentes para una correcta operación del anillo distribuidor en las diferentes posiciones de apertura y cierre de servomotores de las agujas y el deflector.

La unidad hidráulica, deberá disponer de electroválvulas con indicadores de actuación, para el accionamiento de los servomotores en la operación de apertura y cierre de las agujas y deflectores de las turbinas.

La unidad hidráulica, deberá incluir también:

- Filtros de aceite.
- Manómetros.
- Válvula reguladora del caudal de aceite.
- Válvula de seguridad para sobrepresión del sistema oleo hidráulico.
- Instrumentación digital hacia el módulo electrónico digital.



- Todas las conexiones desde el unidad hidráulica hacia los dispositivos que comandarán que se realizarán a través de tubería de acero inoxidable, al igual que sus acoples.

Los sensores de velocidad para cada turbina, serán de tipo inductivo garantizando una alta resistencia a los golpes y a la vibración.

### **2.1.12. Automatización**

Este sistema de control será compatible para operar con el sistema SCADA implementado en la central si así fuera el caso, consistirá, en instalar nueva instrumentación de campo, adaptable o acoplable a los distintos sistemas de medición o de control existentes en la central. El sistema de control y supervisión contará con varias pantallas para visualizar los sistemas de control, medición y secuencias de arranque, parada y sincronización. Al interior de casa de máquinas existirán actuadores para las válvulas que estarán conectadas mediante un protocolo de comunicación industrial al respectivo PLC.

El PLC realizará las funciones de control requeridas para las operaciones normales de la central, detectar condiciones anormales; proteger al personal y equipos de posibles eventualidades. Las rutinas de seguridad realizan funciones de paradas de emergencia tanto eléctrica como mecánica en la unidad, para la comunicación el PLC envía y recibe datos del sistema supervisora a través de la red Ethernet TCP/IP por ejemplo. El PLC deberá tener módulos de entradas/salidas analógicas.

Por otro lado, en nuestro país, el CENACE requiere que se envíen, utilizando el protocolo DNP3.0, datos de la unidad y de protecciones de la central, para lo cual el PLC de la unidad dispondrá de un módulo con este protocolo y se deberá tener una red DNP3.0 y los equipos de protecciones. De toda la central deberá salir un sola comunicación en DNP3.0 hacia el CENACE y deberá ser utilizando fibra óptica.

### **2.1.13. Instrumentos y equipos utilizados en la modernización de un regulador mecánico.**

- Regulador electrónico digital con controles en velocidad, apertura, y Potencia.
- Módulo electrónico digital con control Tipo PID, con hardware programable y compatible con el sistema de control y medición de la central.
- Panel de visualización y control LCD, de manera remota o local con protocolo de comunicación de comunicación industrial y/o Ethernet.
- Módulos de entradas y salidas analógicas y digitales que garanticen la integración al sistema de control distribuido de la central.
- Una unidad lógica Programable (PLC) conectada a los servomotores de apertura y cierre de agujas y deflectores adaptables al módulo electrónico digital.
- Tarjeta de memoria Flash o EPROM para garantizar óptimo funcionamiento del Software frente a fallas eléctricas.

Para la Unidad Hidráulica se tiene lo siguiente:

- Válvula distribuidora responsable de distribuir el aceite a los puertos de apertura y cierre de los servomotores.
- Tuberías y acoples y demás accesorios para la instalación de la válvula distribuidora.
- Bomba de aceite, está en todos los sistemas del regulador digital con interfaz al módulo electrónico digital y PLC.
- Electroválvulas con indicación de actuación para el accionamiento de los servomotores.
- Manómetros, con interfaz al módulo electrónico digital.
- Tanque de presión o acumulador aire-aceite.
- Comando para servos del anillo distribuidor de la turbina.
- Sensores de velocidad tipo inductivo, resistente a la vibración y un rango óptimo de rpm.

Para las Comunicaciones se tiene:

- Tarjeta con puerto de comunicación de acuerdo al protocolo de comunicación usado para las comunicaciones.
- Tarjetas con interfaz ETHERNET con un puerto USB para interconexión con una PC del operador.

## **2.2. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO DEL DIAGRAMA ELECTRÓNICO DE REGULADORES DE VELOCIDAD.**

### **2.2.1. Generalidades.**

Los reguladores de velocidad electrónicos o digitales, debido a su gran diferencia con los reguladores mecánicos, necesitan un estudio de los sistemas de control, comunicaciones y detalles técnicos. Por ello se estudiara para nuestro trabajo un controlador PID, protocolos de comunicación MODBUS y software asociado al regulador con los que podremos comandar e intercambiar información con varios dispositivos por medio de los protocolos estándar IEC 60870-5-101; IEC 60870-5-103.

### **2.2.2. Criterios generales de diseño**

#### **Habilitación y Señalización de Fallas**

Poseer una completa interfaz de habilitación y señalización de falla, posibilita una operación plenamente supervisada, por lo que se debe tomar en cuenta en el diseño. Para manera de ejemplo de un cierto tipo de regulador de velocidad electrónico se puede apreciar en las tablas 2.2 y 2.3 características de entrada y salida para su diseño.

## Entradas

Función	Descripción
Niveles	Alto: 18~30VCC Bajo: 0~5VCC
Corriente	<10Ma
Impedancia de entrada	Igual a o mayor que 10k $\Omega$
Protección contra sobre tensión	Varistor 30V
Tensión de Aislamiento	2500V RMS, 1 min, norma IEC. Conectores con relación a puesta a tierra del panel

Tabla 2. 2. Entradas para habilitación Regulador electrónico.<sup>25</sup>

## Salidas

Función	Descripción
Tipo de contacto	Estado sólido polarizado
Resistencia	Contacto Cerrado: Menor que 5 $\Omega$ Contacto Abierto: Mayor que 250M $\Omega$
Tensión Máxima	250VCC
Corriente Máxima	200mA
Frecuencia Máxima	500 Hz
Vida Útil de los Contactos	Virtualmente infinita, sin degradación Mecánica
Protección	Tensión Excesiva: Varistor 250V
Tensión de Aislamiento	Conectores con relación a puesta a tierra del Panel

Tabla 2. 3. Salidas para habilitación Regulador electrónico.<sup>26</sup>

## Señales digitales

Las salidas digitales, son capaces de comandar entradas digitales de otros dispositivos, o accionar pequeñas cargas inductivas.

<sup>25</sup> Fuente: (DAUX, RVX energy manual regulador automático de velocidad, 2008)

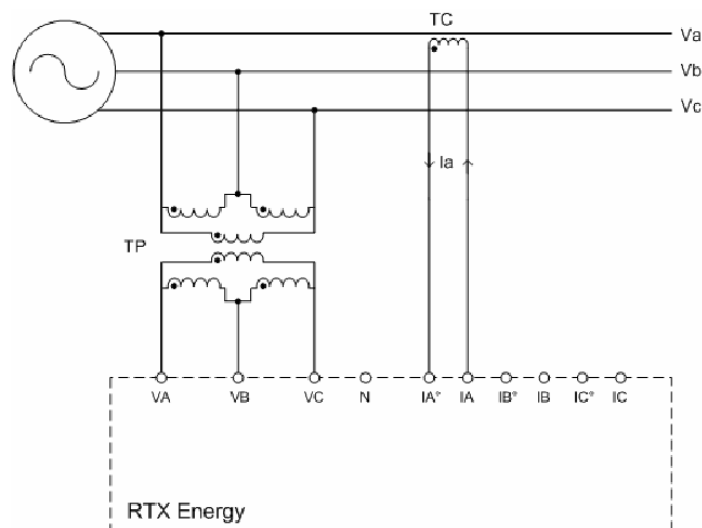
<sup>26</sup> Fuente: (DAUX, RVX energy manual regulador automático de velocidad, 2008)

El sistema contará con señales digitales, tanto las entradas como salidas, cada una de ellas con una alimentación a 24 ó 125 Vcc dependiendo de la aplicabilidad del sistema.

### Señales analógicas

Estas señales son utilizadas para adquirir valores de transductores de posición, temperatura, corriente, tensión entre otros.

Además el regulador está capacitado para adquirir un conjunto completo de mediciones trifásicas, y procesarlas internamente. El acondicionamiento de las entradas permite que señales provenientes de TP y TC puedan ser conectadas directamente al módulo. Los bloques de medición de corriente y tensión son aislados entre sí. La forma más completa de conexión es indicada en la figura 2.19.



**Figura 2. 19.** Conexión TP delta-delta y un TC ( $I_a$  o  $I_b$  o  $I_c$ ).

### Interfaz de comunicaciones

El Regulador posee algunas formas de interacción con el usuario y con los otros sistemas de la central donde está instalado. Las interfaces pueden ser:

- HMI.
- Interfaz Serial.
- Interfaz de comunicación industria como el MODBUS.

## **Configuración Padrón**

El principio de funcionamiento del dispositivo consiste en contestar a los requisitos que llegan a través de sus puertos de comunicación disponibles, permitiendo a los dispositivos maestros la lectura / escritura en línea o tiempo real de señales en el esclavo. Por lo que se debe tomar en cuenta la configuración de la interface, protocolo, velocidad de transmisión, bits asignados para datos, paridad, direccionamientos, tiempos y códigos de función.

## **Interfaz Gráfica de control y operación**

La interfaz gráfica presentará una estructura con 6 pantallas básicas: Principal, Operación, Ensayos, Alarmas, Gráficos y Setup. Éstas pueden subdividirse en otras pantallas, sin embargo están estructuradas de forma estándar. El control de acceso esta dado o comandado en la Pantalla Inicial.

### **2.2.2.1. Instrumentación y descripción operativa**

#### **Interfaz Gráfica PAN 15**

Es una microcomputadora de panel con pantalla de cristal líquido sensible al toque. La sensibilidad al toque dispensa el uso de teclados o mouse, otorgando mayor comodidad en la utilización del Regulador, precisión, datos en tiempo real y por ende una mayor rapidez.

## Instrumentación

En ella será posible efectuar comandos y visualizar los valores medidos así como las indicaciones de algunas variables. Los comandos solamente serán aceptados después de su confirmación. Como consecuencia, una ventana de diálogo será abierta solicitando su confirmación como por ejemplo se puede apreciar en la figura 2.20.



**Figura 2. 20.** Ejemplo de Pantalla de Operación e instrumentación (Central Los Chillos REIVAX).

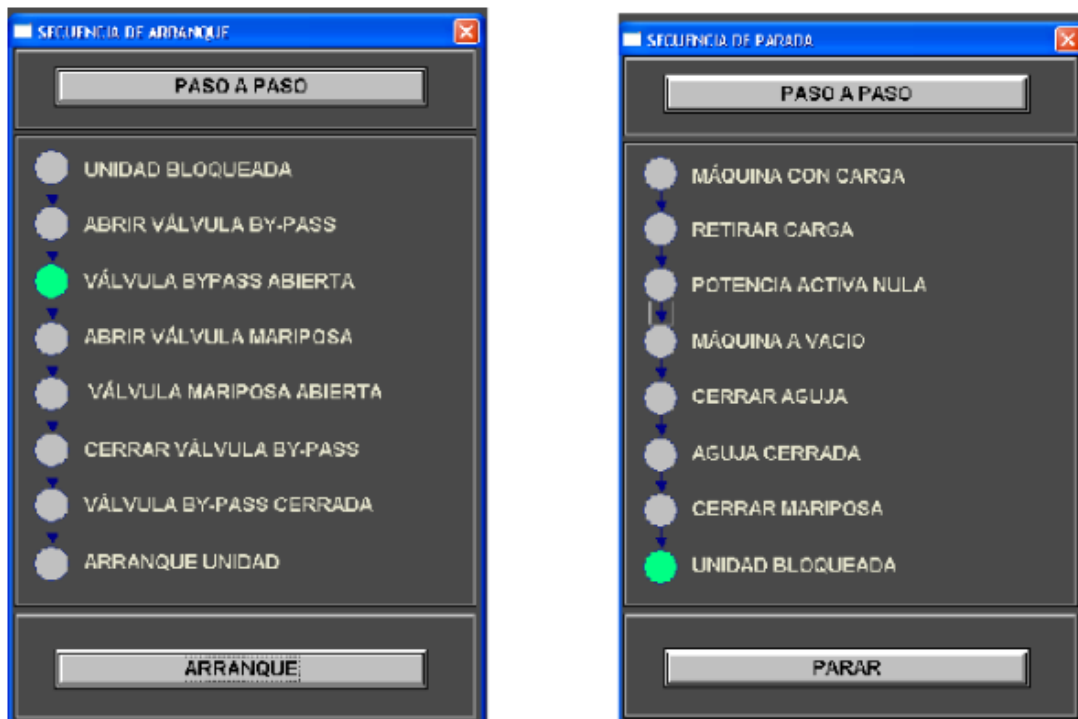
La selección de control (potencia, frecuencia o apertura) del regulador es modificada por el usuario a través de un comando llamado comúnmente “Modo de Control”.

Con relación a las indicaciones, son mostrados textos donde se puede asumir 4 colores que significan:

- **Blanco:** Indica que determinada condición es verdadera.
- **Verde:** Condiciones normales o que no afectan la operación del regulador.
- **Amarillo:** Condiciones que, si persistieren, pueden ocasionar alarmas en el regulador.
- **Rojo:** Ocurrencia de alarma en el regulador.

En la siguiente pantalla (figura 2.21) se describe el control de la unidad generadora para la central de los chillos.

Están disponibles los comandos de aumentar/disminuir las referencias de frecuencia, potencia, apertura y limitador; selección de bomba; arranque/paro de la unidad. Presenta las indicaciones de fin de curso, fallas, sobre velocidad, relés de bloqueo, potencia nula, modo de prueba, escalón aplicado en referencia, entre otros. Además, contiene las mediciones de Frecuencia, Potencia Activa, Limitador de Apertura, Presión y Temperatura en la unidad hidráulica.



**Figura 2. 21.** Secuencia de arranque y paro (Central los Chillos REIVAX).



## **Ajuste del Controlador de Posicionamiento del Servomotor:**

El Ajuste de la malla de posicionamiento del servomotor es el ajuste de posicionamiento del distribuidor, el de la válvula distribuidora, así como el ajuste de la salida de control de la malla.

Para la efectividad del ajuste depende de la precisión a la que se debe controlar el distribuidor y de la válvula distribuidora. Para lo cual se realiza por lo general el control por medio de la respuesta al escalón aplicado para las referencias o setpoint, con un mínimo error ajustando los respectivos parámetros del controlador PID en nuestro caso.

La salida de control es la conversión de la señal del diagrama de control en la CPU en señales de tensión. Los parámetros que ajustan esta salida son ganancia y offset.

## **Giro Mecánico / Arranque Controlado**

El Giro Mecánico consiste en abrir levemente el distribuidor durante un pequeño intervalo de tiempo de manera que la turbina girara en baja velocidad. Este procedimiento sirve para verificar si hay obstrucciones al movimiento de giro de la turbina. En el Arranque Controlado, se realiza la elevación por grados de la velocidad de giro de la turbina a través del comando directo.

## **Ajuste del diagrama de Control de Velocidad**

Para obtener un buen control de velocidad, es necesario ajustar el diagrama del distribuidor de modo que se pueda lograr una buena característica estática (estable), con una buena respuesta dinámica en toda la banda operativa. Esto se

obtendrá ajustando adecuadamente los controladores de la válvula distribuidora y a su vez del distribuidor.

## Diagrama de Control de Potencia

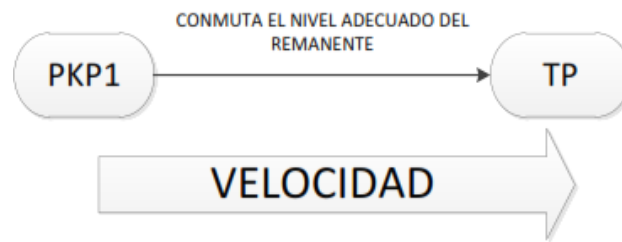
En esta etapa se ajusta el diagrama de control de potencia activa y rampa de carga. De manera similar, el diagrama de control de velocidad y los parámetros del mismo se refieren al estatismo transitorio. La diferencia es que en condición de carga, los parámetros del estatismo transitorio actúan en el sentido de disminuir el efecto del estatismo permanente durante las perturbaciones. Por ello para controlar la potencia se ajustan los parámetros de ganancia del controlador del servomotor, así como su estatismo transitorio, constante de tiempo, referencia y ajuste de curva de apertura.

### 2.2.2.2. Descripción operativa

## Medición de Frecuencia

La funcionalidad básica del regulador utiliza dos formas para medir la velocidad que va a controlar:

- **TP:** medición de la frecuencia en la onda de tensión terminal.
- **Pick-up:** medición de la frecuencia adquirida con un sensor inductivo montado junto a una rueda dentada en el rotor. Esta medición es más adecuada para el arranque y el paro de la máquina. Una secuencia habitual de operación es la siguiente:



**Figura 2. 22.** Medición de Frecuencia en el Arranque.

La máquina parte con la frecuencia siendo medida por el pick-up, y acelera hasta alcanzar el remanente suficiente para que la medida de frecuencia por el TP sea confiable.

### **Automatismo del sistema hidráulico**

El automatismo del sistema hidráulico es esencial ya que la sincronización mecánica con la parte electrónica debe ser óptima y exacta (sin margen de error) para el control adecuado de la turbina. La configuración controlable por el regulador es la siguiente:

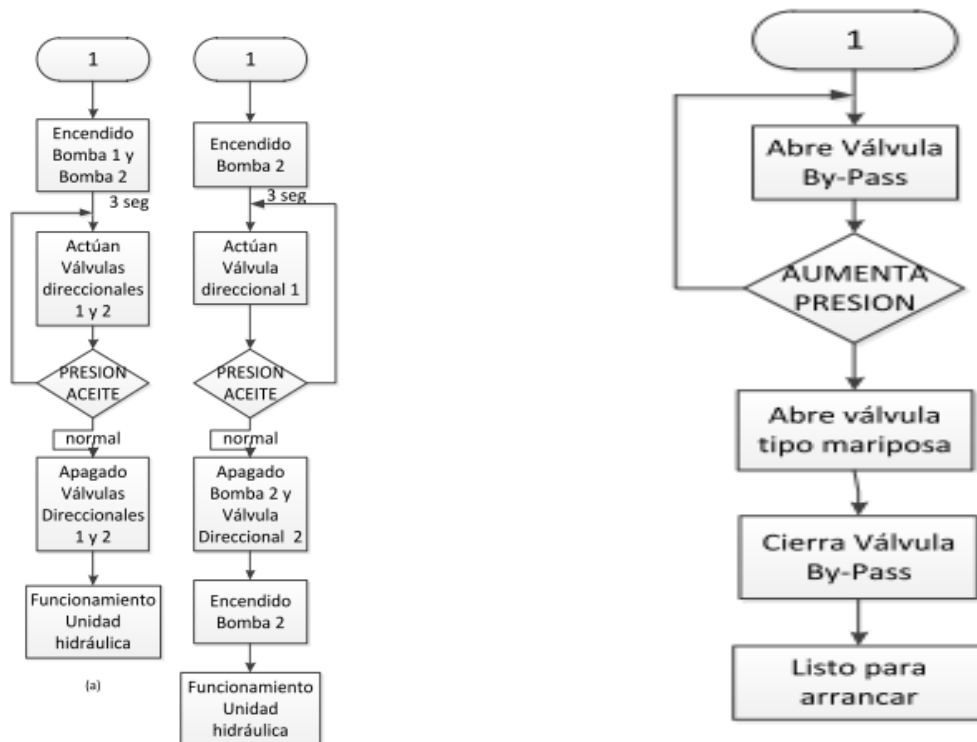
- Actuación de dos válvulas direccionales.
- Actuación de dos bombas de aceite.
- Medición de temperatura del aceite.
- Medición de presión del aceite.
- Señalización de filtro sucio.
- Señalizaciones de nivel de aceite en el reservatorio.
- Señalización de presión del aceite.

### **Operación manual y automático**

En la operación manual, las dos bombas actúan en la presurización del sistema hidráulica hasta el valor considerado normal. Después de la entrada en la banda de presión normal, la bomba 1 se vuelve responsable por el mantenimiento de la presión (figura 2.23).

## Automatismo Válvula Mariposa y By-Pass

Para el automatismo de la válvula mariposa y la válvula By-Pass, en el estado de encendido actúa la válvula By-Pass, si aumentase la presión, abre la válvula mariposa e inmediatamente actúa el cierre de la By-Pass y el regulador está listo para su funcionamiento (figura 2.24).



**Figura 2. 23.** Operación manual UH (a); Operación automática UH (b).

**Figura 2. 24.** Automatismo VB y BM.

## Arranque

Para que pueda darse el comando de arranque de la turbina, es necesario que el Regulador de Velocidad esté en el estado de Regulador Listo para arrancar y con los parámetros satisfechos entre ellos la unidad hidráulica presurizada; válvulas bypass y tipo mariposa posicionadas correctamente. El arranque puede ser realizado de modo automático o del modo paso a paso.

El proceso de arranque de la máquina podrá ser inicializado en el modo de operación remoto, o a través de comando local, desencadenando las siguientes acciones:

1. Comando local o remoto para arrancar la unidad.
2. Posicionamiento de las válvulas bypass y tipo mariposa.
3. El solenoide de arranque deberá estar energizado para pre disponer el circuito hidráulico y consecuentemente el servomotor pueda ser controlado por el regulador.
4. La electroválvula de arranque/paro se acciona por comando de presión (válvulas del piloto hidráulico), permitiendo que la válvula proporcional controle la acción de los servomotores del distribuidor y de las palas del rotor de la turbina.
5. La referencia de velocidad es elevada a 1pu (velocidad nominal). El Sistema de regulación comanda la apertura del distribuidor hasta la posición "Arranque 1".
6. Después de haber alcanzado una velocidad pre-ajustada, el distribuidor cierra hasta la posición definida en "Arranque 2", llevando la unidad hasta la velocidad nominal, evitando sobrepaso.
7. Cuando la máquina alcanza velocidad de 1pu, se inicia efectivamente el control de velocidad.

### **Actuador Hidráulico**

El actuador hidráulico, servirá como etapa de amplificación mecánica de la señal de control generado por la CPU. Es compuesto básicamente por:

- Válvula Proporcional.
- Filtros de Aceite.
- Válvula Arranque / Paro.

La señal de control eléctrico, generada en la etapa electrónica del sistema de regulación de velocidad, es transmitida para la válvula proporcional. Por lo que la

válvula proporcional transmite una señal hidráulica para el servomotor de forma a mantener la velocidad de la turbina estable y en el valor definido por la referencia de frecuencia. El estado primario de amplificación, se realizara por la válvula proporcional, que dirige el aceite bajo presión para la cámara de control, otra para el lado de apertura, otra para el lado de cierre del servomotor. Éste efectúa el control de velocidad de la turbina, actuando sobre las paletas del distribuidor y sobre las palas del rotor de la turbina. Un sistema de moto-bombas es responsable por mantener el nivel y la presión de aceite del globo aire/aceite dentro de los parámetros operacionales.

### **Operación con carga**

El estado operativo “Generador con Carga” es identificado por el Sistema de Regulación de Velocidad a través de la habilitación de la entrada digital, definiendo una nueva condición operativa, en la cual son contemplados:

- Los ajustes de ganancia y de las constantes de tiempo de adelanto y retroceso del controlador directo. Los cuales, son conmutados automáticamente de los valores a vacío para los valores en carga.
- El ajuste del limitador de carga es liberado para variaciones de 0 a 1pu.
- Los ajustes de estatismo transitorio son conmutados de los valores a vacío para valores en carga.
- Es activado el estatismo permanente de potencia para el modo de operación seleccionado: red aislada o red interconectada.
- La referencia de potencia es llevada a un valor determinado (potencia inicial).

### **Paro del Generador**

El regulador fue desarrollado para realizar 3 tipos de paros distintos de parada las cuales se detallan a continuación:

## 1. Paro Normal

El comando de paro normal para el Regulador de Velocidad es recibido por la CPU a través de una entrada digital. La CPU al recibir el comando de paro lleva la referencia del Regulador (setpoint carga) gradualmente a cero, lo que hace que la potencia generada disminuya de acuerdo con una tasa pre-definida. Cuando la potencia activa sea menor que el valor determinado, es energizado un relé de potencia nula (RPN). Un contacto normalmente abierto (NA) de este relé, podrá ser usado para comando de apertura del disyuntor de grupo. Concretada la apertura del disyuntor principal, el regulador activará algoritmos de paro que conduzcan la referencia de velocidad y limitador de apertura hasta cero. Como consecuencia, la turbina tendrá su velocidad reducida, hasta su paro. Después del bloqueo del distribuidor, se iniciará el cierre de la válvula tipo mariposa, llevando la unidad al estado de bloqueo.

## 2. Paro Parcial

El comando de paro parcial para el Regulador de Velocidad es recibido por la CPU a través de una entrada digital. La CPU al recibir el comando de paro parcial lleva la referencia del Regulador (setpoint carga) gradualmente a cero, lo que hace con que la potencia generada disminuya de acuerdo con una tasa pre-definida. Cuando la potencia activa sea menor que determinado valor, es energizado un relé de potencia nula (RPN). Un contacto NA de este relé disponible es usado para comando de apertura del disyuntor de grupo. Concretada la apertura del disyuntor principal, el regulador mantendrá la unidad generadora funcionando en la velocidad nominal a vacío. El limitador será cerrado automáticamente para la posición de "Arranque 2", definido previamente en el panel del control. Con la máquina operando a vacío, el comando de paro parcial llevará la referencia de velocidad y el limitador de apertura a cero, cerrando el distribuidor. Un paro parcial adicional hará con que la válvula tipo mariposa cierre.

### 3. Paro de Emergencia

El comando de paro de emergencia puede de ser provocado por la actuación del relé de bloqueo de la unidad generadora (causas externas), por la actuación directa de la CPU de control, a través del relé de falla (causas internas). El disparo del relé de bloqueo desenergiza el solenoide de arranque provocando el cierre del distribuidor y consecuentemente, la reducción de la velocidad de la turbina hasta su paro total. El tiempo de cierre del distribuidor será en velocidad máxima, determinada por la propia velocidad y vaciamiento de la válvula distribuidora.

#### 2.2.2.3. Sistema hidráulico (Unidad hidráulica)

La unidad hidráulica tiene la función principal de actuar como un amplificador mecánico de los comandos generados por el regulador de velocidad y controladores auxiliares, suministrando potencia compatible para el accionamiento del servomotor.

Además, deberá cumplir funciones auxiliares tales como: Acondicionar el aceite de manera apropiada, garantizar la filtración necesaria, suministrar presión suficiente, acumular aceite presurizado, limitar la presión del sistema y señalar condiciones de falla.

#### Principios de funcionamiento de la unidad hidráulica

El Panel de la Unidad Hidráulica (PUH) cumplirá las funciones de comando y supervisión del sistema de reposición de aceite en el acumulador de presión.

Una señal analógica de presión será enviada al panel de control, donde en el conversor analógico/digital, es programado los valores de ajuste de presión de



aceite, para control de la reposición automática de aceite en el acumulador por medio de una señal analógica de 4 a 20mA proveniente del transmisor de presión. Además de la señal analógica, está disponible en el PUH, los contactos de alarma y bloqueo de la unidad.

### **Funcionalidades básicas**

- Moto bomba del regulador

Su funcionamiento se da por medio de dos comandos que definen el modo de operación manual o automático. En el modo automático, la bomba entra en funcionamiento solamente a través del comando de partida, proveniente del controlador. En este caso, la bomba entra en carga cuando el acumulador alcanza la presión de baja intermitencia y opera a vacío en el intervalo, entre esta presión y la presión de alta intermitencia. Este ciclo se repite a lo largo de la operación de la máquina.

En el modo manual, la bomba entra en operación, independiente del comando del controlador. Este modo de operación es útil para calibrar el sistema y hacer ajustes en el servomotor sin que sea necesario iteración con la parte electrónica del regulador.

- Presión de aceite

La señal analógica de presión de aceite será enviada al panel de la unidad hidráulica (PUH), a través de transmisor de presión. En el módulo conversor de presión serán programados los setpoint de presión de aceite, que energiza los relés de presión activa, presión de disparo, presión alta y presión baja en el acumulador. Los valores de setpoint de presión son ajustables. Está disponible una señal analógica de presión, proveniente del módulo electrónico del PUH, y también contactos secos de los relés de presión.

- Niveles de aceite

Una señal digital, proveniente de la Unidad Hidráulica, entra en el circuito de comando de las bombas, para que estas operen protegidas contra operación con nivel bajo de aceite. O sea, cuando el nivel de aceite del reservatorio tenga un nivel bajo, las bombas serán desconectadas o desactivadas automáticamente.

- Temperatura del aceite

Una señal proveniente de un sensor de temperatura a instalarse en el reservatorio de aceite, entra en el PUH y se dirige para un módulo conversor. Este módulo posee dos salidas a relé, con puntos de actuación ajustables, de acuerdo con los niveles de temperatura deseados (temperatura alta y muy alta). En la siguiente tabla se puede ver las señales comunes de la planta para la unidad hidráulica.

- Señales de la planta para la Unidad hidráulica

Comandos	Función
Apertura / Encierro Válvula Mariposa	Comanda la apertura / encerramiento de la Válvula Mariposa remotamente
Apertura / Encierro Válvula Bypass	Comanda la apertura / encerramiento de la Válvula Bypass remotamente
Partida/parada	Comanda de la Válvula de partida/parada Remotamente
Partida PUH	Comanda la partida del PUH remotamente

**Tabla 2. 4.** Comandos principales usados en la unidad hidráulica.<sup>27</sup>

<sup>27</sup> Fuente: DAUX, R. J. (2008). *Manual técnico de la unidad hidráulica*.

### 2.2.3. Control, automatización y equipos

#### Funciones de Transferencia

A continuación se presenta los diagramas de control y modelos simplificados para estudios de estabilidad que contemplen de manera fiel el comportamiento dinámico.

Los valores típicos presentados corresponden los valores de análisis típicos durante el montaje y diseño de la máquina.

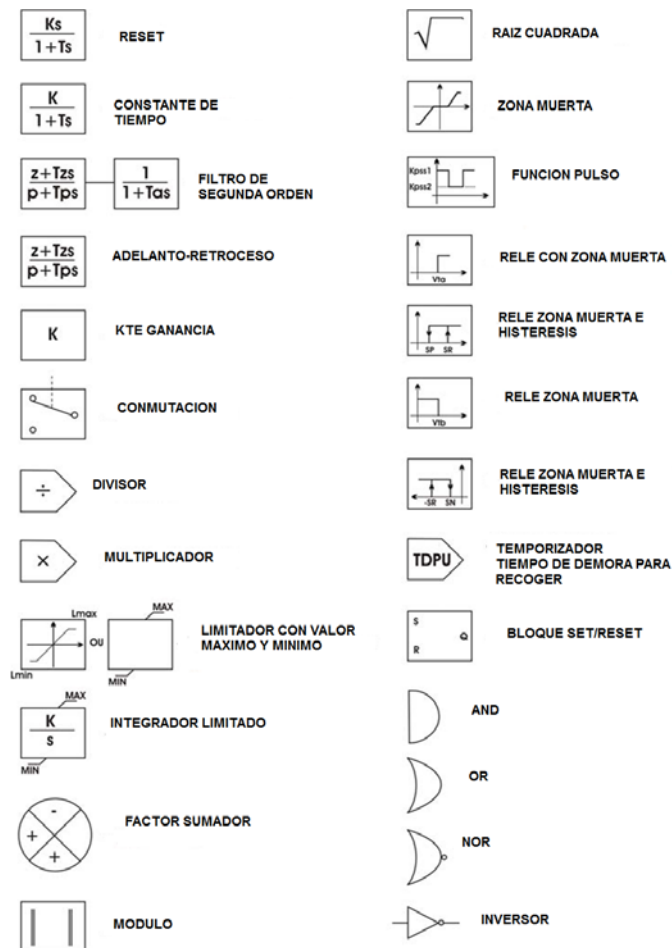
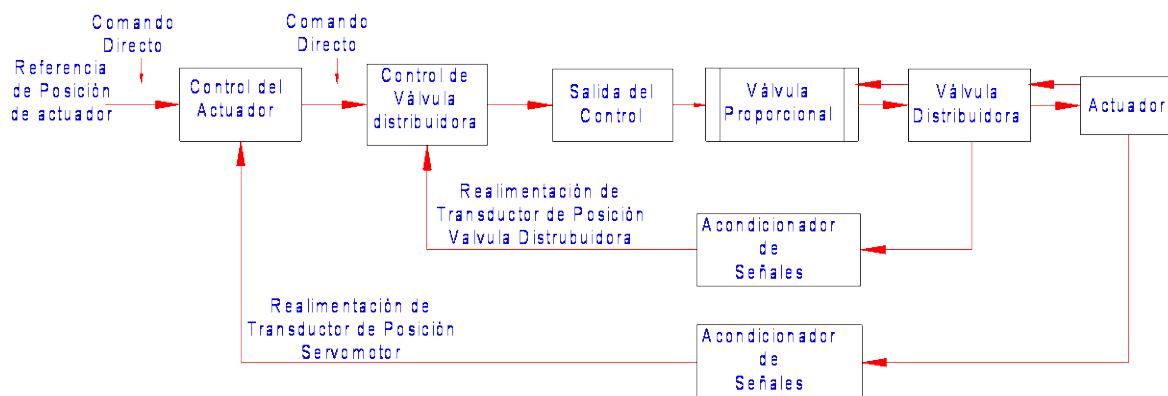


Figura 2. 25. Simbología (manual Usuario REIVAX).

## Diagrama de bloques del regulador de velocidad

El diagrama de control de velocidad comprende un actuador con válvula proporcional. Esta configuración posiciona el actuador a través de una señal de tensión directo de la CPU a la válvula proporcional OBE (sobrepaso electrónico). La misma estructura es utilizada para el posicionamiento del rotor. La señal de posición del actuador utiliza un sensor de posición, con valor realimentado directo para la CPU, pudiendo haber escalonamiento externo por circuito condicionado. La figura 2.26 presenta esta configuración.



**Figura 2. 26.** Diagrama de bloques con válvula proporcional y distribuidora.

La figura 2.27 presenta el diagrama de control de velocidad, que puede ser descrita de una forma simplificada en un control PID. Las diferencias básicas en relación al PID clásico son las siguientes:

- El PID está compuesto por la cascada de un control PI con un PD.
- El PD (

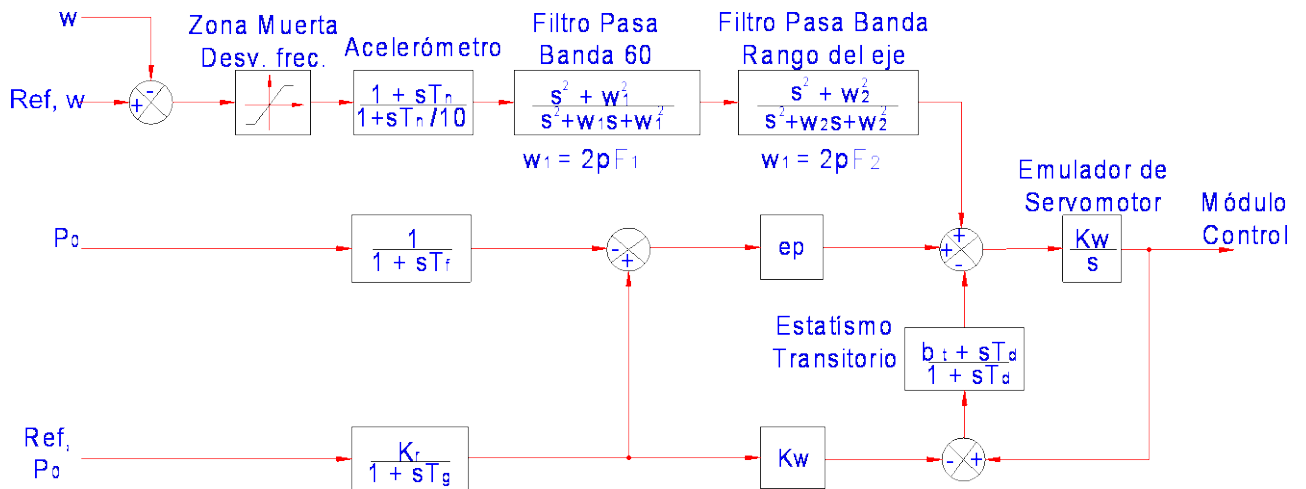


Figura 2. 27. Función de Transferencia de Control de Carga y Velocidad.

**Parámetros de la Función de Transferencia del Regulador de Velocidad:**

Sím.	Parámetro	U.	Mín.	Típico	Máx.
	Ganancia del emulador del servomotor	pu/pu	1	50	327,67
	Estatismo transitorio	pu	0	0,3	3,27
	Constante de tiempo derivativo	s	0	10	32,76
	Corta franja 60 (F1)	Hz	1	60	327,67
	Corta franja eje (F2)	Hz	1	30	327,67
	Constante del acelerómetro	s	0	0	32,76
	Estatismo permanente	pu	0	0,05	3,27
	Constante de tiempo en la medición de potencia	s	0	0,01	32,76
	Ganancia de la medición de la referencia de Pe	pu	0	50	327,67
	Constante de tiempo en la medición de la referencia de Pe	s	0	0,01	32,76

Tabla 2. 5. Parámetros generales de la función de transferencia del regulador de velocidad.<sup>28</sup>

<sup>28</sup> Fuente: DAUX, R. J. (2008). RVX energy manual regulador automático de velocidad.

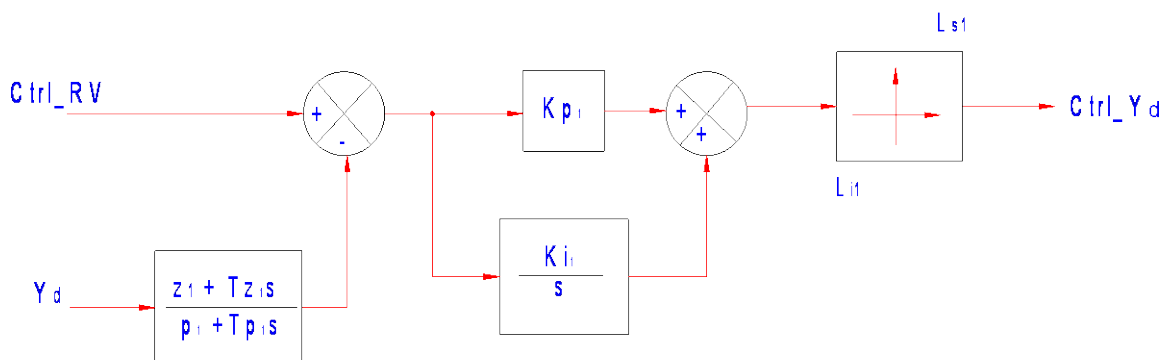
## Función de Transferencia de la Malla de Control del Distribuidor

En el sistema de control de distribuidor, se asume los siguientes parámetros:

Símbolo	Parámetro	Unidad	Mínimo	Típico	Máximo
	Ganancia proporcional de la malla de control de la Yd	pu	0	20	327,67
	Ganancia integral de la malla de control de la Yd	pu	0	40	327,67
	Límite superior de la malla de control de la Yd	pu	0	0,15	32,76
	Límite inferior de la malla de control de la Yd	pu	-32,76	-0,15	0
	Valor fijo en "1"	-	-	-	-
	Valor fijo en "1"	-	-	-	-
	Constante de Tiempo de Avance	-	0	0,05	32,76
	Constante de Tiempo de Atraso	-	0	0,05	32,76

**Tabla 2. 6.** Parámetros generales de la función de Transferencia de malla de control del Distribuidor<sup>29</sup>.

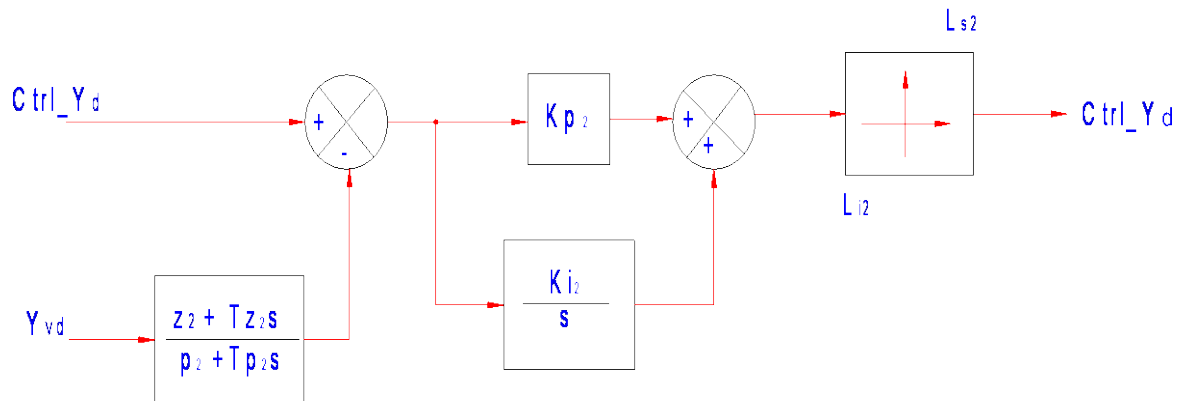
La función de transferencia del distribuidor es la siguiente:



**Figura 2. 28.** Función de Transferencia de la Malla de Control del Distribuidor.

<sup>29</sup> Fuente: DAUX, R. J. (2008). RVX energy manual regulador automático de velocidad.

### Función de Transferencia de la Malla de Control de la Válvula Distribuidora



**Figura 2. 29.** Función de Transferencia de la Malla de Control de la Válvula Distribuidora.

Los Parámetros de la Función de Transferencia de Control de la Válvula Distribuidora son los siguientes:

Símbolo	Parámetro	Unidad	Mínimo	Típico	Máximo
	Ganancia proporcional de malla de control la Yvd	Pu	0	20	327,67
	Ganancia integral de malla de control de Yvd	Pu	0	40	327,67
	Límite superior del lazo de control de Yvd	Pu	0	0,15	32,76
	Límite inferior del lazo de control de Yvd	Pu	-32,76	-0,15	0
	Valor fijo en "1"	-	-	-	-
	Valor fijo en "1"	-	-	-	-
	Constante de tiempo de avance	-	0	0,05	32,76
	Constante de tiempo de retroceso	-	0	0,05	32,76

**Tabla 2. 7.** Parámetros generales de la función de Transferencia Control de la Válvula Distribuidora<sup>30</sup>.

<sup>30</sup> Fuente: DAUX, R. J. (2008). *RVX energy manual regulador automático de velocidad*.

## CAPITULO III

### 3. ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN REGULADOR ELECTRÓNICO SOBRE UN MECÁNICO.

La curva 3.1, representa el comportamiento de fallas dentro de la vida útil de cualquier dispositivo o equipo, el regulador de velocidad también se encuentra sujeto a éste comportamiento, donde  $\lambda$  son la tasa fallas por unidad de tiempo, el período de infancia presenta una tasa de fallas altas debido al equipo nuevo que puede presentar fallas imprevistas hasta realizar los ajustes al sistema por motivos de pruebas, de la misma manera en el período de vejez presenta una tasa de fallas con mayor frecuencia, siendo esta región la más crítica y por la cual se debe decidir la modernización antes de llegar al envejecimiento donde se presentan fallas imprevistas y recurrentes, la región intermedia presenta una tasa de fallas constante en principio, que dependerá de la calidad de mantenimiento desarrollado.

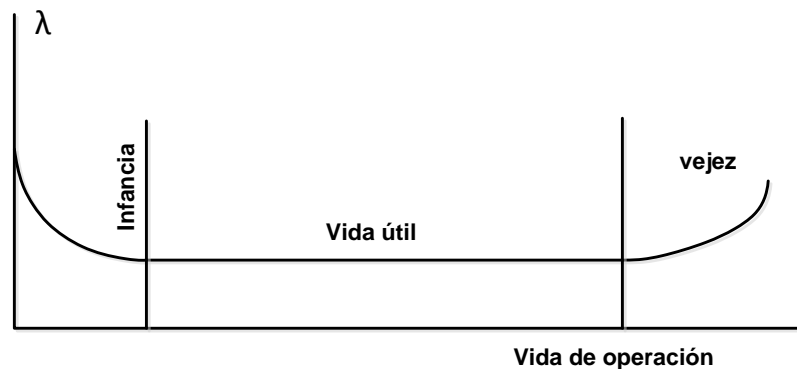


Figura 3. 1. Vida útil de los equipos<sup>31</sup>

<sup>31</sup> Billinton, R y Allan, R.N. 1996. Reliability Evaluation of Power System. 2da Plenum, New York, USA : s.n., 1996.



Para describir y analizar las ventajas de la modernización del regulador mecánico, dividimos en dos secciones, la primera que se refiere a las ventajas técnicas que ofrece la modernización y por otra parte el análisis costo-beneficio, en donde analizaremos los riesgos del regulador previo a la modernización, la seguridad y el lucro cesante en caso de la no generación de energía eléctrica y finalmente expondremos el análisis de los resultados.

### **3.1. ANÁLISIS TÉCNICO DE LAS VENTAJAS DE LA MODERNIZACIÓN DE UN REGULADOR DE VELOCIDAD ANTIGUO.**

Luego de haber estudiado los principios del regulador de velocidad mecánico y el de los reguladores de velocidad electrónicos, vamos a hacer una diferencia entre éstos y analizar cada una de las ventajas que se presenta en la modernización del regulador antiguo, para los cuales se usan los mismos principios pero con diferente tecnología. En la Figura 3.1 se puede observar una analogía entre los principales dispositivos de un regulador de velocidad antiguo y los de un control electrónico, para lo cual podemos observar las siguientes diferencias y ventajas:

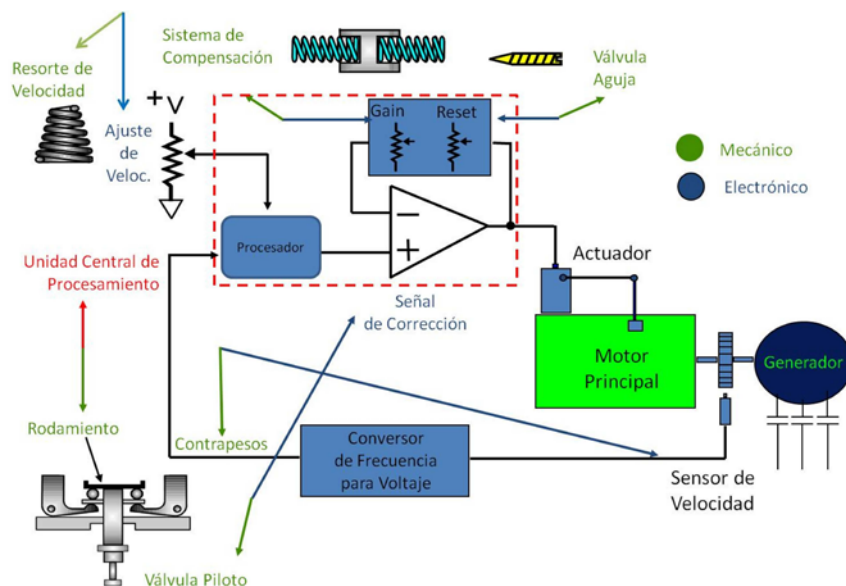
#### **3.1.1. Contrapesas vs Sensor de velocidad inductivo**

El sensado de velocidad en un regulador de velocidad antiguo se realiza mediante contrapesas en donde la fuerza centrífuga de las mismas es llevada a ejercer una fuerza hacia el rodamiento donde será comparada con la fuerza ejercida por el resorte de fijación de velocidad como se puede apreciar en la figura 3.2, por otra parte en el sistema electrónico, la velocidad es medida por un sensor de velocidad inductivo, este sensor emite una frecuencia proporcional a la velocidad, la cual es convertida en una señal de 4 a 20mA para la comparación con la señal de referencia, esta señal es mucho mas exacta debido a que se usa componentes electrónico de alta calidad y que puede detectar diferencias de mili y hasta de

micro segundos, además no se incluyen elementos sujetos a desgaste como el regulador mecánico.

Debido al avance tecnológico esta señal de velocidad se puede monitorear a gran distancia mediante dispositivos de comunicación permitiéndonos con esto tener un control remoto de la velocidad de la turbina, los cuales no son posible en el regulador mecánico.

Su reducido tamaño, la precisión y la rapidez en la medida de la velocidad en los reguladores electrónicos es otra ventaja que este ofrece sobre el sistema de contrapesas de los reguladores mecánicos, éstas señales de velocidad son muy importantes, por lo que su transporte son expeditas y directamente al sistema de control distribuido que las procesa, no obstante podrán ser monitoreadas a distancia y definida su carga dentro de los límites permitidos.



**Figura 3. 2.** Comparación de dispositivos de control antiguo y eléctrico<sup>32</sup>

<sup>32</sup> Billinton, R and Allan, R.N. 1996. Reliability Evaluation of Power System. 2da Plenum, New York, USA : s.n., 1996.

El sensor de velocidad electrónico tiene una estructura simple comparada con el sistema mecánico, lo cual se hace sencillo el montaje del mismo ya que se puede acoplar al eje de la unidad mediante engranajes o una rueda dentada.

### **3.1.2. Resorte de fijación de velocidad vs Ajuste electrónico de velocidad.**

En el sistema mecánico se utiliza un resorte para fijar la velocidad deseada de la turbina como se ve en la figura 3.2, según el estado de éste permite pasar mas o menos combustible en el caso de centrales térmicas y mas o menos agua en caso de una central hidráulica, en un sistema electrónico se puede usar un potenciómetro que envía una señal de corriente de 4 a 20 mA para fijar la señal de referencia de velocidad, la cual va ser comparada con la señal del sensor de velocidad. En el caso del regulador mecánico, con el tiempo éste resorte está sujeto a fatiga mecánica, dando lugar a descalibraciones, mala regulación, salidas imprevistas de servicio, mayores intervenciones para mantenimiento y mayor lucro cesante.

Los controles electrónicos presenta una gran ventaja porque la referencia puede ser fácilmente modificada a través de un potenciómetro (figura 3.2), o también realizar un control remoto mediante software, mediante el teclado del computador o alguna Interfaz Hombre-Maquina HMI o mas bien mediante la pantalla del Sistema SCADA, logrando con esto tener un control a distancia con gran rapidez de manera eficiente y segura. Las tarjetas electrónicas son alimentadas con una fuente de voltaje continuo de usualmente 24 Vcc como se explicó en el capítulo anterior.

El ajuste de referencia de la velocidad es preciso en los reguladores de velocidad electrónicos en comparación con los reguladores mecánicos que usa un tornillo para su ajuste imposibilitando el control remoto.

### **3.1.3. Resorte de compensación/Válvula aguja vs constante integral (reset)/Contante derivativa**

Como se puede ver en la figura 3.2 en un sistema de regulación de velocidad mecánico, los resortes de compensación y la válvula aguja son complementos en el sistema de control para corregir los efectos de variación de las cargas o fallas, mientras que el regulador de velocidad electrónico se varia la constante integral y derivativa que vienen a ser complementos al control proporcional de los reguladores de velocidad electrónicos, ya que permiten corregir efectos similares, por ejemplo: las pequeñas oscilaciones pueden ser corregidas con la válvula aguja del sistema mecánico, en un sistema electrónico es corregida mediante constante derivativa del sistema.

Presenta la ventaja de usar componentes electrónicos de alta capacidad, velocidad, y precisión que facilita la medición y el control de la turbina, evitando las consecuencias de los elementos mecánicos sujetos a desgaste y fatiga durante la operación.

Los elementos electrónicos empleados en el control PID muchos de ellos son de libre mantenimiento, aliviando ésta tarea en comparación con los elementos correspondientes en los reguladores mecánicos.

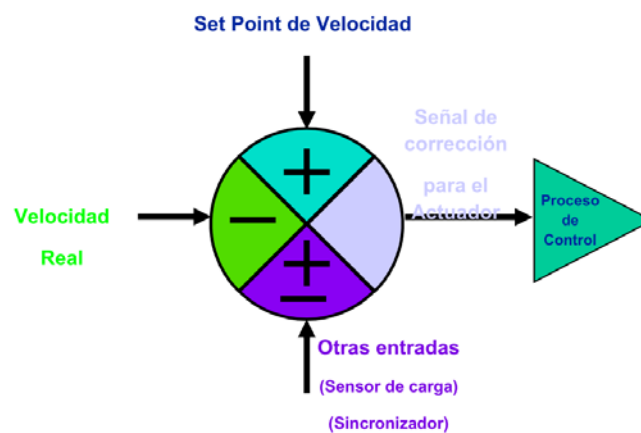
### **3.1.4. Rodamiento vs Unidad central de procesamiento (CPU).**

Mientras que en el regulador de velocidad mecánico las acciones correctivas de velocidad nacen del rodamiento que está entre las contrapesas y el resorte de fijación de velocidad, comparando las fuerzas verticales que ejercen las mismas en sentido contrario, y por consecuencia moverán el pistón de poder en la dirección necesaria para realizar la corrección de velocidad en función de la señal de error. (Ver figura 3.2).

En los reguladores electrónicos se compara las señal de referencia de velocidad (set point) y la velocidad sensada, para esto estas dos señales se convierten en su valor equivalente en corriente de 4 a 20mA, la señal de error resultante se procesa en la unidad central de procesamiento la cual generara una acción correctiva de velocidad hacia el actuador que fijará la velocidad a la que se desea como se ve en la figura 3.3.

El regulador electrónico presenta la ventaja de mayor rapidez, y una acción correctiva mucho más exacta que el de los reguladores mecánicos y además son de tamaño reducido y ocupan menor espacio.

Cuando la suma de las señales es cero y permanece constante en el tiempo, no se generara ninguna señal correctiva, manteniendo la misma señal de corriente hacia el actuador.



**Figura 3. 3.** Unidad central de Proceso.

En la unidad central de proceso se adicionan las señales de sensores de carga que se toman directamente de la salida del generador de potencia a través de TCs y TP's y transductores de señal para tomar acciones correctivas una vez que la unidad de generación entre en servicio.

### **3.1.5. Modos de Control**

Unas de las ventajas más importantes en la modernización es el control eficiente y seguro del regulador, es por eso que en este apartado analizaremos los distintos modos de control de un regulador electrónico, los modos de control comúnmente usados en los reguladores de Velocidad electrónicos son:

- ON – OFF
- Proporcional
- Integral
- Derivativo

#### **3.1.5.1. Modo ON – OFF**

Es el modo de control mas sencillo para entender este tipo de control es el encendido y apagado de un cierto dispositivo través de un interruptor, en el regulador electrónico presentaría la ventaja de poder comandar a distancia con solo hacer un clic en la pantalla del sistema SCADA o simplemente presionar la pantalla del HMI que comanda al regulador. Esta es una opción que está disponible para las acciones que juzgue necesario el operador.

#### **3.1.5.2. Control Proporcional**

Es una constante que actúa directamente sobre la señal correctiva de manera proporcional a los cambios de la señal de error. En otras palabras es una constante que se multiplicaría por el valor del error para corregir la desviación. Si la señal de error es muy grande, la acción correctiva cambiará significativamente, en el mismo caso si es pequeña, la señal correctiva será mínima.

#### **3.1.5.3. Control Integral**

Proporciona una respuesta adicional a la proporcional, está en función no solo de la magnitud de la desviación, sino también, de su duración. Permanecerá activa mientras la diferencia entre la velocidad deseada y la actual este presente. La

variable integral reduce el “offset” que se presenta entre el valor de referencia y el valor sensado, esta acción integral puede aumentar la respuesta proporcional en función del tiempo de duración de error entre la velocidad actual y la deseada.

#### **3.1.5.4. Control Derivativo**

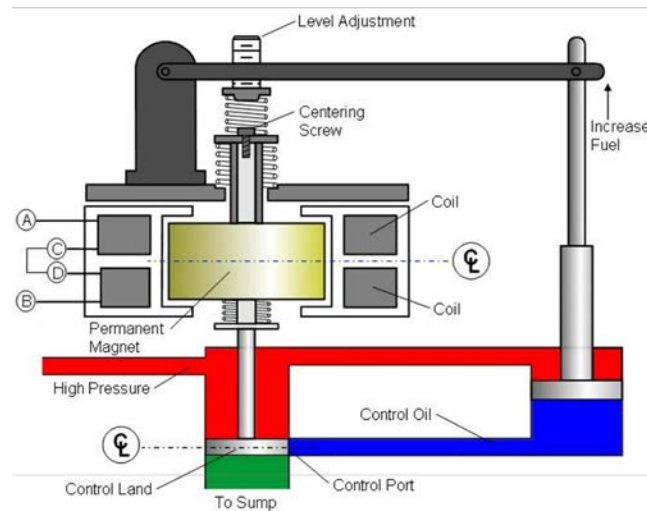
Otra ventaja que presenta los reguladores de velocidad electrónicos es el control derivativo optimizado, este control se manifiesta cuando hay un cambio en el valor absoluto del error (si el error es constante, solamente actúan los modos proporcional e integral).

La acción de la constante derivativa se caracteriza por el tiempo de acción derivada en minutos de anticipo. La acción de esta constante es adecuada cuando hay retraso entre el movimiento de la válvula de control y su repercusión a la variable controlada, siendo el tiempo óptimo de acción derivativa es el que retorna la variable al punto de consigna con las mínimas oscilaciones.

Las variables derivativa e integral son complementos de la variable proporcional y trabajan siempre junto a esta.

#### **3.1.6. Actuadores**

En la Figura 3.4 podemos observar un esquema típico de los componentes de un actuador proporcional electromecánico.



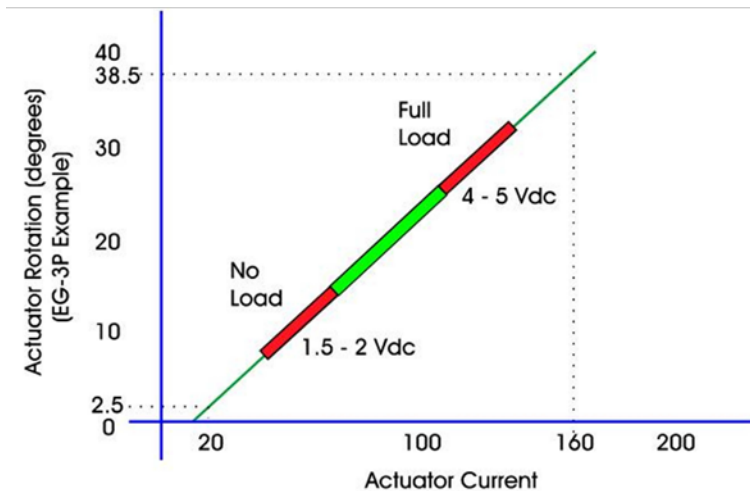
**Figura 3. 4.** Esquema de un actuador.

La señal eléctrica de entrada alimenta una bobina, ubicada en el interior del actuador, el cual a su vez genera un campo magnético que posiciona un ferromagneto permanente en relación al valor de la corriente que circula por las bobinas.

El magneto permanente está acoplado a la válvula piloto, está centrada en un buje con orificios que permiten o bloquean el paso de aceite hacia o desde el pistón de fuerza. De esta manera la corriente de entrada se convierte en una posición lineal del pistón de fuerza y de acuerdo al mecanismo interno del eje terminal del actuador, en un ángulo de posición en el eje terminal, éste mediante el sistema de varillaje a la bomba de inyección o válvula de suministro de combustible, corrigiendo de ésta manera la velocidad.

La posición del eje terminal del actuador (ángulo de rotación) es proporcional a la señal eléctrica en la entrada del mismo. La señal eléctrica es enviada por el regulador de velocidad electrónico, esto podemos observar en la Figura 3.5.





**Figura 3. 5.** Relación entre la señal eléctrica de entrada y la rotación del eje Terminal del actuador.

El tipo de entrada eléctrica en los actuadores puede variar de acuerdo al equipo de control y al tipo de actuador, ejemplo: 0 – 20mA, 20 – 160mA, 0 – 5V, etc.

La unidad no esta en servicio cuando la posición del eje terminal del actuador es de 0 grados que equivale a la posición de apagado en la bomba de inyección de aceite para el caso de unidades pequeñas o el cierre de la válvula de suministro de aceite presurizado desde el tanque de acumulación en caso de unidades de gran potencia. Esto asegura que si se presenta un fallo la señal a la entrada del actuador será de 0mA lo que apagará de inmediato la unidad. La señal de un botón de parada de emergencia o de un equipo de apagado de emergencia de manera independiente al control debe ser usada para cortar la señal de control hacia el actuador en caso de ser requerido para parar la de manera inmediata.

La presión de aceite necesaria para mover el eje terminal del actuador es generada en una bomba de piñones interna que esta acoplada al eje de la unidad para el caso de unidades pequeñas (Figura 3.6), mientras que en una unidad de generación de gran potencia el suministro de aceite es a través de un tanque de presión el cual almacena el aceite presurizado (Figura 3.7).

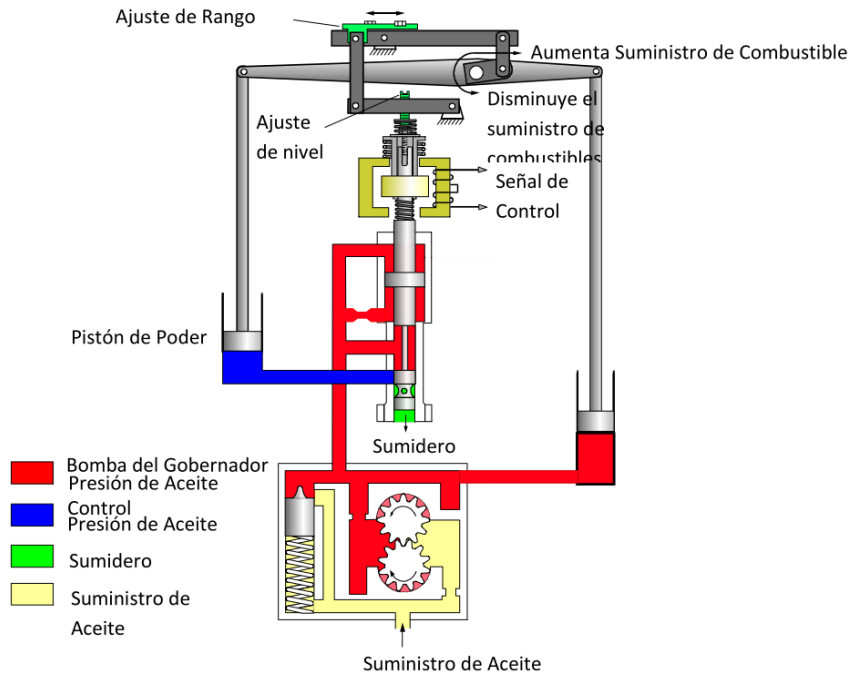


Figura 3. 6. Esquema de un Actuador con bomba de aceite interna para unidades pequeñas.

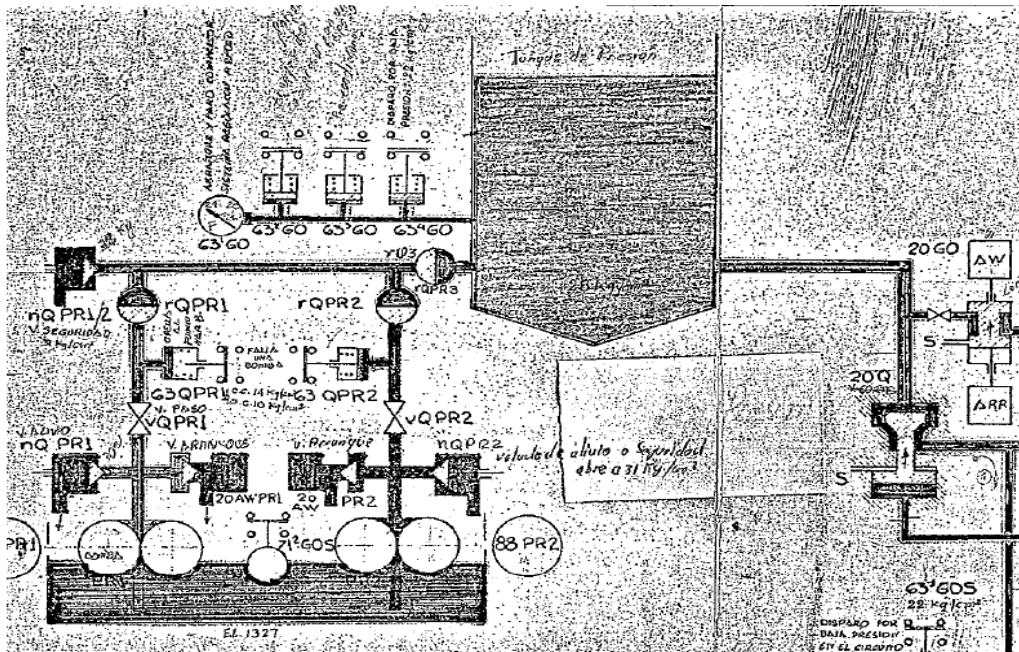


Figura 3.7. Sistema de acumulación de aceite presurizado del sistema de regulación de velocidad.

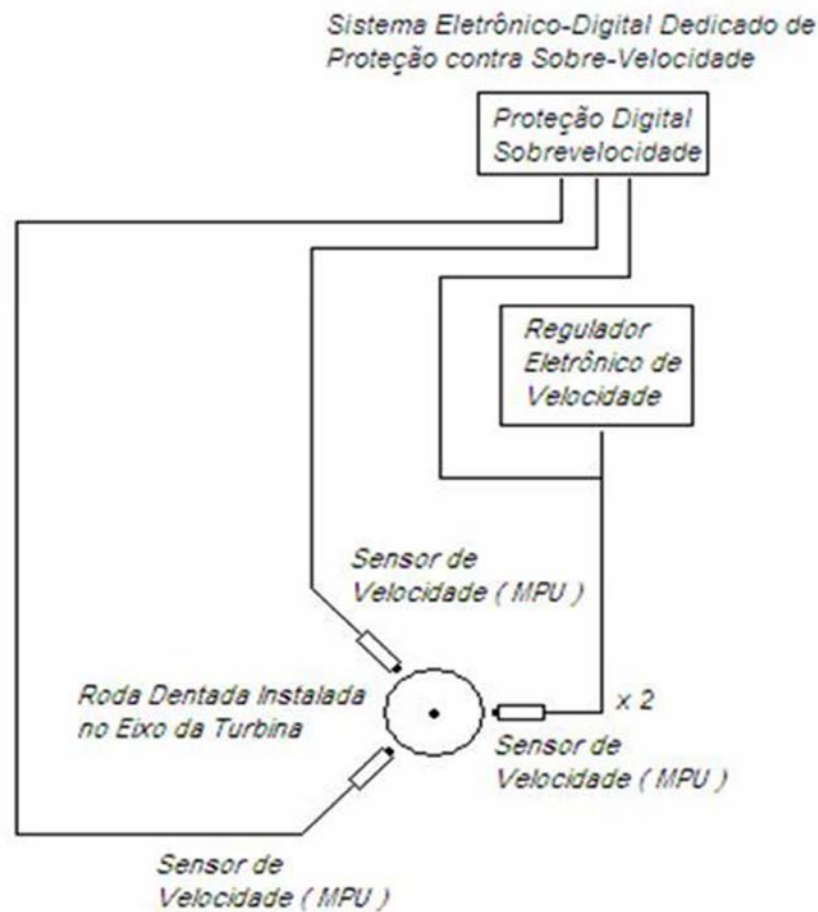
### 3.1.7. Protecciones del regulador de velocidad

Otra de las ventajas en la optimización del regulador, es la modernización de las protecciones del sistema de regulación de velocidad como son:

- Sobre velocidad.
- Baja y alta presión de aceite del sistema de regulación de velocidad.
- Baja presión de agua de enfriamiento del sistema de regulación de velocidad.
- Alta temperatura.
- Falla en el suministro de combustible en caso de centrales termoeléctricas.

El regulador de Velocidad Electrónico tiene un número de entradas y salidas análogas y digitales configurables que se pueden usar para distintos propósitos. Depende de la configuración específica y requerimientos del sistema, el determinar su uso. Es recomendable tener un sistema redundante de protecciones de regulación de velocidad, lo cual protegerá los equipos en caso de producirse una falla de las protecciones principales que actuarán directamente en los actuadores que comandan el paro de la unidad de generación evitando pasar por elementos secundarios.

**Protección de Sobre velocidad:** Existen equipos especializados en protecciones de sobre velocidad, los cuales usan la señal de 3 sensores de velocidad para garantizar un control redundante y muy seguro de un sistema, la unidad irá al paro cuando 2 de los 3 sensores hayan actuado, esta protección para las turbinas es necesario para evitar sobrevelocidades peligrosas que pudieran producir pérdidas humanas y materiales. En la Figura 3.8 se puede observar un esquema básico para un equipo de protección de sobre velocidad triple redundante.



**Figura 3. 8.** Esquema para un sistema de protección de sobre velocidad.

Las protecciones de alta temperatura, baja presión de aceite del sistema de potencia, baja presión de agua en la turbina, entre otras protecciones del regulador de velocidad se las puede configurar en las entradas análogas del sistema de control para visualizar los estados de los sistemas de protección y determinar las posibles fallas de los mismos y tomar decisiones para el paro de la unidad, en caso de falla los sistemas de protección actuarán directamente sobre la unidad llevándole al paro forzado.

### Condiciones eléctricas

Al cambiar de sistemas mecánicos a electrónicos hay que considerar la necesidad de una fuente redundante de energía eléctrica para la alimentación del sistema de

control de regulación de velocidad. La fuente de alimentación más utilizada en sistemas de Control es de 24 ó 48Vcc redundante. Estas pueden ser alimentadas por baterías usando cargadores.

Entre otras ventajas del regulador electrónico tenemos:

Sus múltiples entradas analógicas y discretas configurables permiten fácil conexión y comunicación con equipos de administración de unidad múltiples operando en paralelo (SCADA), muy usados en la industria de la generación eléctrica.

Los reguladores de velocidad electrónicos permiten personalizar la secuencia de arranque de la unidad, siendo posible configurar o programar varios set point de velocidad en escalones de referencias temporizadas mediante señales analógicas externas mediante un control local o mediante un control remoto en el cual intervendría un PLC o el Sistema SCADA, lo que permite diseñar y controlar la secuencia de arranque de la unidad.

Internamente en el equipo se realizará una interpolación lineal para encontrar el equivalente en velocidad de cada nivel de corriente entre el rango de 4 a 20mA. Esto permite un ajuste fino de velocidad a partir de una fuente de control externa remota dentro de los límites permisibles.

El regulador de velocidad electrónico detecta el estado de operación en que se encuentra la unidad (arranque, velocidad ralentí, calentamiento, velocidad nominal, control de velocidad, parada) esto permite agregar funciones como la limitación de suministro de combustible en el caso de centrales térmicas o agua en caso de las centrales hidráulicas al momento del arranque, también permiten cambiar el modo de control de velocidad con caída de velocidad (Droop) e Isócrono a través de señales eléctricas discretas sin necesidad de reprogramar el equipo.

La modernización permiten operar, visualizar, controlar y monitorear variables del regulador de velocidad electrónico a distancia mediante señales analógicas y puertos de comunicación que serán implementadas en el Sistema SCADA o el HMI personalizado de acuerdo a cada aplicación permitiendo tener acceso a todas las variables de control.

Los Reguladores de Velocidad electrónicos facilita el mantenimiento de los equipos ya que varios dispositivos mecánicos son remplazados por el software y elementos de estado sólido.

La modernización del regulador de velocidad aumenta la disponibilidad y confiabilidad de la operación y tiende a disminuir el tiempo de reposición de la unidad en caso de una falla en caso de contar con los repuestos disponibles.

Adicionalmente la modernización del regulador de velocidad mecánico a electrónico permite:

Automatizar varios procesos de acuerdo a la necesidad de cada aplicación, es decir, dar flexibilidad a la operación, al registro de fallas, eventos y tendencias de variables asociadas, con los cuales se puede realizar el análisis de fallas y parámetros operativos para implementar acciones correctivas, preventivas y predictivas.

La modernización permite mejorar la velocidad de respuesta de la unidad a los cambios de carga, ya que el regulador de velocidad es una pieza fundamental para el funcionamiento de los generadores, la misión del mismo es controlar la velocidad de giro para permitir la sincronización del generador a la red de interconexión con el sistema. Y si está conectado propiamente a la red, tiene la misión de contribuir a la regulación frecuencia-potencia del generador y el sistema.

La actuación del regulador electrónico de velocidad permite un control mejorado en la precisión y estabilidad del sistema, incremento en la seguridad y simplificación del régimen de operación.

La calidad del control de velocidad y potencia en un sistema de regulación antiguo es bajo en relación al sistema moderno, debido a que las mediciones de las variables se realizan en sitio en el caso de un regulador antiguo, mientras que en el sistema de regulación moderno la monitorización de las variables se pueden realiza a distancia.

La unidad hidráulica tiene la función principal de actuar como un amplificador mecánico de los comandos generados por el regulador de velocidad y controladores auxiliares, suministrando potencia compatible para el accionamiento del servomotor, además, debe cumplir funciones auxiliares tales como: acondicionar el aceite de manera apropiada, garantizar la filtración necesaria, suministrar presión suficiente, acumular aceite presurizado, limitar la presión del sistema y señalar condiciones de falla.

## **3.2. Análisis costo-beneficio de la modernización del regulador de velocidad mecánico.**

### **3.2.1. Generalidades**

Para hacer un análisis general del costo-beneficios al modernizar un regulador de velocidad mecánico, se debe tomar en cuenta los problemas y los riesgos que se tiene en el mismo, para luego analizarlos y de ser el caso continuar con el análisis para la modernización respectiva.

Por lo general los costos de modernización de un regulador de velocidad electrónico son altos, pero se podría justificar al obtener mayor facilidad de manejo en los sistemas electrónicos y sobre todo mayor seguridad tanto para la turbina como para el personal, además en caso de una falla en los dispositivos



mecánicos se debe contar con los repuestos necesarios, de no contar con el repuesto a mano el costo y tiempo de adquisición son altos debido a que la producción en serie de los equipos están fuera de línea por parte del fabricante, mientras que en uno electrónico siempre se tiene redundancia disminuyendo las salidas imprevistas de la unidad, evitando el lucro cesante.

### 3.2.2. Análisis de riesgos

La presente sección contiene un análisis de los riesgos asociados al regulador de velocidad mecánico, lo cual nos ayuda a describir la necesidad de la modernización del regulador de velocidad, respecto al potencial de afectación que el mismo podría tener sobre la integridad del medio ambiente, del personal, de los equipos aledaños a éste y a la producción de energía. El análisis de riesgos sirve para determinar y evaluar posibles fallos de los dispositivos para luego tomar decisiones necesarias para mantener una confiabilidad, disponibilidad y FOR en los márgenes aceptables. Estos riesgos se deben llevar al mínimo posible para evitar pérdidas por la no producción de energía.

La tasa de salida forzada (FOR), es un estimador de probabilidad de fallos de la unidad.

La Confiabilidad, es la probabilidad para que un equipo o sistema funcione sin fallar durante un período de tiempo especificado y se relaciona con la habilidad del sistema para cumplir con su función <sup>33</sup>.

Riesgo es la probabilidad de que ocurra un efecto adverso a la producción de energía eléctrica en una central por la exposición de un agente peligroso como pueden ser las fallas en los distintos dispositivos vinculados al regulador de velocidad.

---

<sup>33</sup>IEE Std. Dictionary



El análisis de riesgo es una combinación de la estimación del riesgo y de la evaluación del mismo, los riesgos que se presentan son.

- Los riesgos a la seguridad.
- Los riesgos de fallos de dispositivos
- Los riesgos a la salud.
- Los riesgos al ambiente.
- Los riesgos de la producción de energía.

Se puede indicar que existe un riesgo cuando se satisfacen las siguientes condiciones:

1. Debe estar presente una fuente de riesgo.
2. Debe existir un proceso de exposición.
3. Debe existir un proceso causal.

#### **3.2.2.1. Estimación de Riesgo**

En la estimación de riesgo se asumen valores para la probabilidad de ocurrencia del evento analizado y se determina la potencial severidad de consecuencias que podría ocasionar dicho evento.

Para la modernización del regulador, las estimaciones del riesgo de falla de equipos que se plantean son los asociados con los siguientes eventos:

1. Avería del sistema hidráulico.
2. Riesgo de fallo en las contrapesas, éste es el dispositivo sensor de velocidad mecánico.
3. Riesgo de fallo en los rodamientos, que procesa el control correctivo de velocidad.
4. Riesgo de falla en resorte de ajuste de velocidad, que fija la velocidad de referencia.
5. Riesgo de falla de la válvula aguja y sistema de compensación, que son acciones complementarias del sistema de control.

6. Riego de falla del actuador.
7. Riesgo de falla de los servicios auxiliares.

Estos eventos pueden generarse por factores externos, como movimiento sísmicos o por factores internos como la falta de mantenimiento de la estructura física, falta de lubricación de las partes mecánicas en movimiento, desgaste de cada una de las partes del regulador debido al envejecimiento, falla de los servicios auxiliares como la ventilación, refrigeración etc.

La unidad ya modernizada aun sigue teniendo riesgos de fallos, pero de grado menor debido a que son elementos nuevos:

1. Avería de sensores.
2. Avería del sistema hidráulico.
3. Avería del sistema de control o tarjeta electrónica.
4. Avería de sistemas auxiliares, como pueden ser ventilación, refrigeración etc.

El análisis de riesgo se realiza en base a la probabilidad de ocurrencia y la severidad de las consecuencias.

#### **3.2.2.2. Probabilidad de Ocurrencia**

La probabilidad de ocurrencia se considera como la posibilidad de que un evento ocurra durante el ciclo de vida del regulador de velocidad:

1. No se espera que ocurra durante el ciclo de vida.
2. Se espera que ocurra no más de una vez durante el ciclo de vida.
3. Se espera que ocurra varias veces durante el ciclo de vida.
4. Se espera que ocurra más de una vez en un año.

### 3.2.2.3. Severidad de Consecuencias

La severidad de las consecuencias se califica adoptando una cuantificación de la afectación a la salud, el medio ambiente y pérdida de producción que tienes que ver directamente con el nivel económico.

1	Vida y Salud	Sin daños o efectos sobre la vida y la salud.
	Consecuencias al Ambiente	Sin daños o impactos al ambiente, efectos localizados.
	Pérdidas de producción	Pérdidas económicas pequeñas.
2	Vida y Salud	Daños o efectos sobre la salud menores.
	Consecuencias al Ambiente	Contaminación ligera, efectos localizados.
	Pérdidas de producción	Pérdidas económicas moderadas.

3	Vida y Salud	Daños o efectos sobre la salud moderados.
	Consecuencias al Ambiente	Grave contaminación, efectos localizados.
	Pérdidas de producción	Pérdidas económicas considerables.
4	Vida y Salud	Muerte o efectos sobre la salud.
	Consecuencias al Ambiente	Grave contaminación, efectos difundidos.
	Pérdidas de producción	Pérdidas económicas grandes.

**Tabla 3. 1.** Severidad de consecuencias.

### 3.2.2.4. Resultado de la Evaluación de Riesgos

Una vez analizadas los resultados de la probabilidad de ocurrencia versus la severidad de las consecuencias, la evaluación de riesgo provee, la importancia de cada evento analizado, mediante la aplicación de los valores establecidos en la Tabla 3.2. La Tabla 3.3 presenta la escala de jerarquía del riesgo.

PROBABILIDAD DE OCURRENCIA	SEVERIDAD DE LAS CONSECUENCIAS			
	1	2	3	4
1	IV	IV	IV	III
2	IV	IV	III	II
3	IV	III	II	I
4	III	II	I	I

**Tabla 3. 2** Matriz de evaluación de riesgos.

NÚMERO	CATEGORÍA	DESCRIPCION
I	Inaceptable	El riesgo debe ser reducido o si es posible eliminado. Situaciones donde los esfuerzos de rescate son muy difíciles y se hacen extensivos a las autoridades locales. Se debe tomar medidas de prevención y control en área. Debe ser mitigado con controles administrativos y/o de ingeniería hasta un rango de riesgo de III o IV.
II	Indeseable	Implementación de planes de emergencia y brigadas de rescate. Se debe tomar medidas de prevención y control en área. Debe ser mitigado con controles administrativos y/o de ingeniería hasta un rango de riesgo de III o IV.
III	Aceptable con controles	Medidas de prevención y control en área. Implementación de planes de emergencia.
IV	Aceptable como está	Medidas de prevención Implementación de planes de emergencia.

**Tabla 3. 3.** Categoría de importancia del riesgo.

### 3.2.2.5. Riesgos en las fases de la modernización del regulador mecánico

Los riesgos que presenta el regulador mecánico por el desgaste y descalibraciones aleatorias de sus partes afectando la eficiencia, la confiabilidad, la disponibilidad de la unidad de generación debido al envejecimiento del regulador, este es el motivo por el cual se plantea este tema de investigación para la modernización del mismo con equipos de última generación que presentan ventajas técnicas analizadas en la sección anterior, sin embargo el regulador ya modernizado aun cuenta con riesgos debido al avance rápido de la tecnología, aunque de un grado mucho menor.

Para la modernización se debe considerar los riesgos en la fase de operación del regulador mecánico previa a la modernización (siendo este análisis el más importante para poder justificar la modernización del regulador), y la fase de operación con el regulador modernizado.

## **Riesgos por envejecimiento de un regulador de velocidad mecánico.**

La vida útil indicada en los manuales de los fabricantes de los equipos es referencial, y esta se define mayoritariamente por las condiciones del régimen operativo y del mantenimiento desarrollado.

En muchos casos debido al transcurso considerable de tiempo la adquisición de repuestos se hace excesivamente caro ya que éstos han salido fuera de producción por parte del fabricante, siendo éste un elemento adicional para considerar la decisión de proceder con la modernización con equipos de control con arquitecturas abiertas, amigables con distintas tecnologías bajo estándares internacionales que se pueden conseguir rápidamente, dando como resultado final mayor versatilidad en la consecución de repuestos.

La confiabilidad y disponibilidad del regulador antiguo puede llegar a ser baja debido a equipos descontinuados de fabricación, afectando a la tasa de salida forzada (FOR) debido a las fallas imprevistas, además para mantener la disponibilidad y confiabilidad de la unidad en condiciones aceptables se debe incrementar las intervenciones por mantenimiento, lo cual incrementa los costos y lucro cesante.

Los riesgos mas importantes son los daños de algún dispositivo mecánico que conforma el regulador de velocidad, debido a que se debe parar la unidad para cambiarlo por otro, en caso que se tenga el repuesto necesario, caso contrario las pérdidas de producción de energía se incrementan aún más, afectando la confiabilidad y disponibilidad de la unidad.

A continuación analizaremos los riesgos que presentan las partes principales del regulador mecánico.

### Contrapesas.

Este sistema corre el riesgo de que se trabe las palancas debido a la falta de lubricación, la suciedad o deterioro del elemento por desgaste, pudiendo producir daños en la unidad o bien una salida forzada que contribuiría a la indisponibilidad por el mal funcionamiento ante una variación brusca de carga.

Las reparaciones se deben realizar desarmando el sistema y remplazando las partes dañadas, los problemas comunes son: atascamiento en el movimiento, desgaste y desajuste de los contrapesos, si un contrapeso se desprende puede romper la carcasa del regulador y afectar todo el sistema. Las precauciones de seguridad son las que se deben tomar cuando se trabaja en partes con movimiento, por otro lado el medio ambiente puede verse afectado si se producen derrames de aceite cuando se lo desarma, por lo tanto hay que tomar las precauciones correspondientes.

### Resorte de Fijación de Velocidad deseada.

Para mantener al resorte en buenas condiciones se debe revisar y darle el mantenimiento adecuado, cuando este sufre un daño se debe de disponer de los repuesto necesarios, para realizar el cambio se tendrá que parar la unidad, lo cual conlleva a la pérdida de producción de energía.

Cuando el resorte se encuentra en mal estado o presenta fatiga mecánica se corre el riesgo de fijar la velocidad erróneamente, lo que afecta directamente a la frecuencia de generación de la unidad.

### Resorte de Compensación/Válvula Aguja.

Los resortes de compensación y la válvula aguja son mejoras en el sistema de control de un regulador de velocidad mecánico, por lo que los riesgos que se

corren con estos dispositivos pueden llevar al paro inesperado de la unidad produciéndose pérdidas en la producción de energía.

Rodamiento.

Los riegos de este elemento mecánico deben ser los mínimos posibles ya que si este elemento llegara a sufrir una avería no se podrá procesar el control de la regulación de velocidad por lo que igualmente, a los casos anteriores, se presentará una indisponibilidad de la unidad produciéndose pérdidas económicas.

Actuadores.

El riesgo en la producción de energía tiene mucho que ver con el funcionamiento del actuador, ya que este regula la cantidad de agua que entra hacia la turbina, si no llega la señal de mando al actuador desde el sistema de control este no realizara el trabajo que se desea y por lo cual no se podrá regular la velocidad de la turbina, quedando fuera de control tanto la frecuencia como la producción de energía. La falla de los elementos antes descritos pueden llevar a consecuencias adicionales tales como:

- Sobre velocidad.
- Baja presión de aceite.
- Alta temperatura.
- Falla en el suministro de combustible o de agua debido al mal funcionamiento del servomotor.

### **Fase de desmontaje de dispositivos mecánicos y montaje de dispositivos electrónicos en la modernización del regulador de velocidad mecánico.**

En esta fase se procurará minimizar el riesgo de tener fuera de servicio a la unidad de generación haciendo coincidir la modernización con un overhaul y

mantenimiento mayor de la unidad, además de riesgo de tener un accidente o muerte al momento de desmontar elementos mecánicos de gran tamaño y peligros, por otro lado se corre el riesgo de contaminación del medio ambiente debido a derrames de aceite o químicos.

El riesgo que corre la producción de energía es inminente, pero se deberá reducir al mínimo posible, para esto, antes de proceder con el desmontaje de las partes mecánicas del regulador, de antemano ya se deben tener disponibles las partes electrónicas para la modernización que realizarán la misma función, de esta manera los cronogramas de modernización se cumplirán de manera óptima.

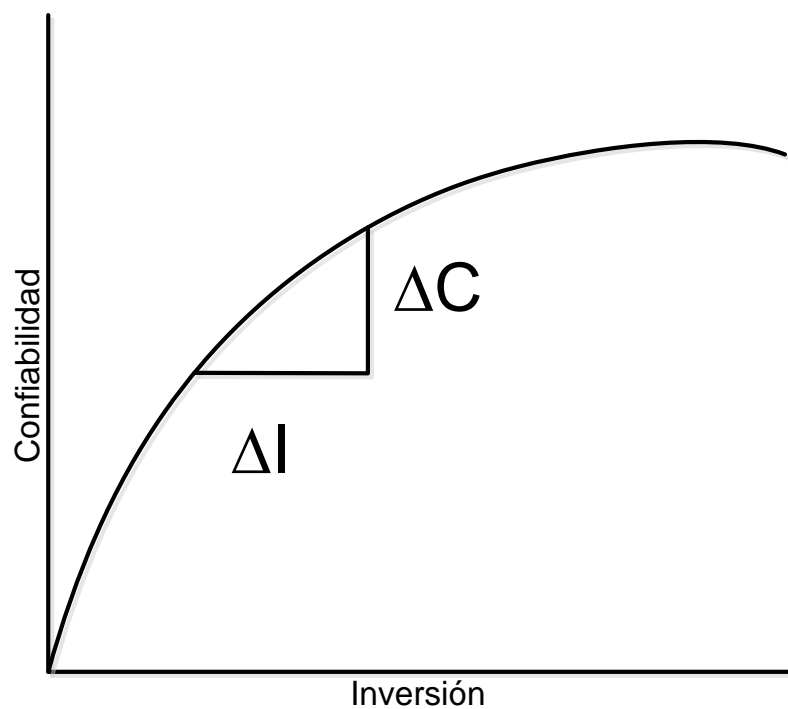
### **Fase de operación del regulador electrónico.**

En esta fase los riesgos son reducidos debido a que la disponibilidad y la confiabilidad de la unidad son mayores que cuando contaba con un regulador mecánico, no obstante que la nueva instalación parará por período de ajuste durante su operación inicial, con ello conseguimos disminuir la tasa de salida forzada de la unidad (FOR), para el cálculo del FOR se tiene la siguiente fórmula:



Las horas de salida forzada se reducirán al mínimo debido a la modernización, mientras que las horas en servicio se incrementarán ya que todos los dispositivos de control, medición y protección del regulador modernizado tienen redundancia, siendo este la principal ventaja sobre los mecánicos cuyos repuestos tomaban tiempos considerables en la sustitución, por otro lado el costo de adquisición de los repuestos se volvía oneroso debido a la no producción en línea por parte del fabricante.

El riesgo de producción de energía es mucho menor que antes, pero la inversión para la modernización es grande, mientras mayor confiabilidad se tiene, mayor es el costo de inversión y viceversa, esto se puede apreciar en la Figura 3.9.



**Figura 3. 9.** Curva Confiabilidad Vs Costo de inversión.<sup>35</sup>

<sup>35</sup> Billinton, R y Allan, R.N. 1996. Reliability Evaluation of Power System. 2da Plenum, New York, USA : s.n., 1996.

Al incrementar la confiabilidad en la generación se incrementan los costos de inversión por parte del generador, asegurando la disponibilidad de energía.

No obstante lo indicado anteriormente, la modernización del regulador presenta el inconveniente ligado al avance tecnológico, pues se requiere realizar actualizaciones de hardware y software en períodos no más allá de los 15 años conforme recomendaciones del fabricante<sup>36</sup>.

### 3.2.3. Seguridad del sistema

La seguridad que presenta un regulador mecánico de muchos años de operación, tanto para el personal de operación y mantenimiento como para la producción de energía eléctrica podría no ser la adecuada debido al envejecimiento, desgaste, abrasión, adhesión, erosión y fatiga de los equipos, estos y otros mas son los motivos por el cual se deberá considerar la modernización del regulador mecánico.

Es necesario conocer en un sistema de control automático, luego de ocurrida una contingencia, los daños que podrían sufrir cada uno de los elementos, esta tarea presenta dificultades cuando miles de posibilidades deben ser evaluadas.

El análisis de seguridad normalmente se lo realiza considerando contingencia simple. El criterio de considerar la ocurrencia de una única contingencia se basa en el hecho de que la probabilidad de ocurrencia de dos o más fallas de forma simultánea es muy baja.

Los operadores y el personal de mantenimiento de la central de generación deben analizar las diferentes variables asociadas con el proceso de generación y sus tendencias para valorar de manera rápida y confiable los eventos que pueden

---

<sup>36</sup> Seminario Internacional de experiencias en construcción de proyectos hidroeléctricos.

causar fallas en la operación normal de la unidad generadora. Este criterio de seguridad es ampliamente usado como regla de operación segura.

El ahorro anual por energía no vendida por reducción de fallas, se calcula de la siguiente manera:

realizar análisis no destructivos y mantenimiento predictivo en equipos y partes asociados a los reguladores de velocidad para realizar estudios de vida residual de los componentes y de equipos sensibles para así tomar un margen de seguridad y disminuir los riesgos de probabilidad de falla, evitando así el lucro cesante por paros innecesarios.

### **3.2.4. Costos**

#### **3.2.4.1. Descripción de costos**

A continuación realizaremos una comparación de costos entre los dispositivos modernos y sus predecesores.

##### *Dispositivos de sensado*

Los reguladores de velocidad mecánicos cuentan con un mecanismo de contrapesas, que debido al envejecimiento, erosión y desgaste es necesario su remplazo, cabe indicar que los repuestos de las unidades antiguas has salido de producción en serie por parte del fabricante, por tanto solicitar repuestos se torna excesivamente caro. Por otro lado un regulador de velocidad electrónico se minimizan los elementos sujetos a desgaste y los repuestos son de fácil consecución, pues son fabricados con tecnología estándar.

##### *Dispositivos de control*

El costo de la unidad central de procesos, conlleva una serie de gastos tales como:

- Conversores analógico/digital.
- CPU's robustos y redundantes.
- Software
- Relés
- Relés Auxiliares

- Personal calificado para la operación y mantenimiento del sistema.
- Botones de mando de emergencia.
- Alarmas
- Fuente de corriente continua redundante.
- HMI

### *Dispositivos hidráulicos*

Los dispositivos en esencia son similares tanto para reguladores de velocidad electrónicos como mecánicos, ya que son los elementos de fuerza como son el servomotor, distribuidor, sistemas de acumulación de aceite y bombas, así, también como elementos adicionales como son las agujas, pistones, válvulas y deflector.

Los costos del sistema hidráulico se incrementarían debido al uso de dispositivos transductores para su control y monitorización. Esto debido a que el regulador de velocidad electrónico opera mediante señales eléctricas para su debido funcionamiento.

### *Dispositivos digitales adicionales*

Los costos de los elementos digitales o hardware del regulador electrónico consisten en módulos de entradas/salidas analógico y digitales, el panel para el manejo local y amplificadores de salida. Las centrales antiguas no cuentan con estos sistemas. Se debe tomar en cuenta que la implementación de reguladores de velocidad electrónicos con dispositivos digitales implica compra de software y protocolos de comunicación, los mismos que forman parte del suministro del regulador. Las conexiones entre dispositivos son otros costos adicionales que se debe tomar en cuenta, como son las conexiones seriales así como componentes de sujeción, canaletas, gabinetes y elementos que permitan la adecuada operación de los mismos.

### 3.4.2.2. Análisis de costos

#### Central Hidroeléctrica

Para el análisis de costos usaremos los costos referenciales de la modernización del regulador de velocidad del proyecto hidroeléctrico Carlos Mora Carrión, para una unidad con turbina Pelton de 600 kW, los costos referenciales del regulador de velocidad para la unidad 2 se dan en la Tabla.<sup>38</sup>

<b>INFORMACION DE LA MODERNIZACION DEL REGULADOR DE VELOCIDAD DE LA CENTRAL CARLOS MORA DE LA UNIDAD 2</b>	
<b>Dispositivo</b>	<b>[USD]</b>
Regulador electrónico de velocidad y partes componentes	36.087,05
Válvula distribuidora principal, accesorios y partes componentes	94.781,40
Cámara de aire-aceite, accesorios, partes componentes	8.741,00
Control - Mando hidráulico y accesorios para la instalación	16.193,72
Dispositivos de control de velocidad	1.900,00
Dispositivos de protección mecánica para sobre velocidad de la turbina	20.986,56
Mano de obra	64.000,00
<b>TOTAL</b>	<b>242.689,73</b>

**Tabla 3. 4.** Costos referenciales de la modernización del sistema de regulación de velocidad de la central hidroeléctrica Carlos Mora.

Considerando el costo variable de producción de energía hidroeléctrica, la cual está definida por la REGULACIÓN No. CONELEC 013/08 en un valor de 0.2 cUSD/kWh<sup>39</sup>. Entonces con este valor podemos evidenciar lo que representa la inversión para la modernización del regulador de velocidad en días equivalentes de generación: El equivalente en dólares de la generación diaria es:



## Central Termoeléctrica

El siguiente ejemplo considera el caso real del proceso de modernización que se está llevando a cabo actualmente en la unidad TV3 de 73 MW de la central termoeléctrica a vapor G. ZEVALLOS perteneciente a la empresa CELEC-EP-ELECTROGUAYAS, que usa combustible FUEL OIL para la generación, cuyo costo variable de producción es de 5,00 cUSD.<sup>41</sup>

El costo para la modernización del regulador de velocidad se aprecia en la Tabla 3.6, donde se detalla el precio de cada uno de los dispositivos que se utiliza en la modernización.

INFORMACION DE DEL REGULADOR DE VELOCIDAD DE UNA UNIDAD A VAPOR TV3	
Dispositivo	[USD]
2 Paneles	200.000,00
Sistema de filtro	40.000,00
Válvula proporcional	40.000,00
Accesorios y sensores	10.000,00
Mano de obra	60.000,00
Total por unidad	<b>350.000,00</b>

**Tabla 3. 6.** Costo de modernización del Regulador de velocidad de la unidad G. ZEVALLOS TV3<sup>42</sup>.

La generación diaria es:





La desviación de energía producida, se refiere a las variaciones que tiene la producción de las unidades de cada central respecto a la energía despachada, esta variación de energía se pierde de vender; para este fin se considera que mediante reguladores de estado sólido se puede controlar la desviación de la generación, es decir logrando como beneficio la mejora del rendimiento. La producción de energía mejora en un 3% <sup>44</sup> por el uso adecuado y óptimo del agua en unidades hidroeléctricas o combustible en caso de generadoras térmicas, con el nuevo sistema de regulación se podrá monitorear el rendimiento de las máquinas en función del agua o combustible que consumen y se logrará determinar el caudal óptimo para cada grupo generador.

La modernización de los dispositivos de control facilita el mantenimiento de los mismos, reduciendo el peligro de accidentes del personal de mantenimiento.

Los sistemas de control necesitan señales eléctricas de los dispositivos hidráulicos para realizar un control constante sobre las mismas, por lo que se necesitan de mecanismos hidráulicos modernos y de gran calidad con lo que se reduciría los tiempos de mantenimiento.

Los sistemas digitales hacen la operación segura para el operario, brindando datos y señales para actuar de manera eficaz, esto en referencia a sistemas de control mecánicos antiguos en donde existen elementos móviles sujetos a desgaste que con el tiempo pueden aumentar el riesgo de una falla intempestiva, dando lugar lucro cesante.

Disminuye el riesgo de los equipos, instalaciones, personal y lucro cesante.

---

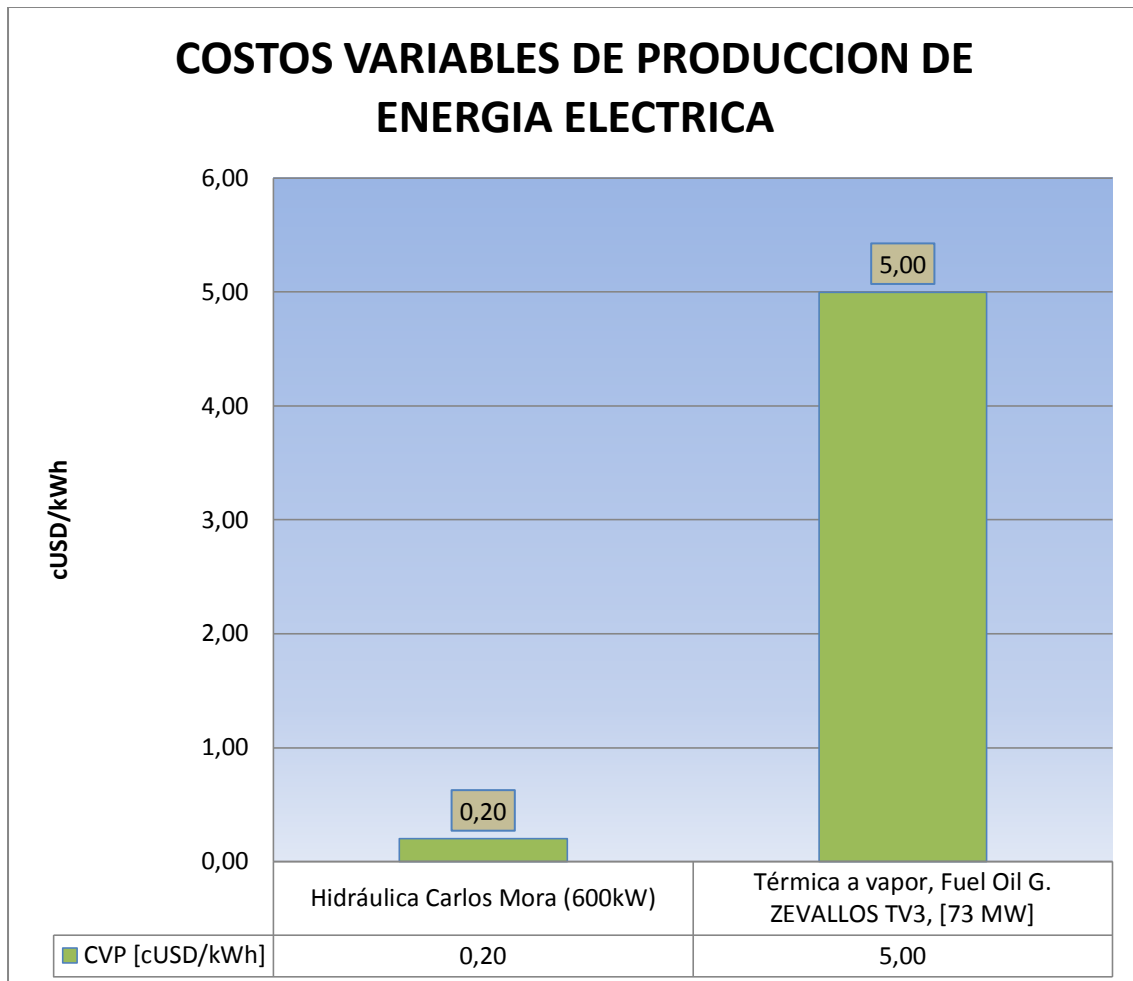
<sup>44</sup> **Calero Freire, Fabián Mauricio. 2007.** Estudio técnico económico de la implementación del centro de control de las centrales hidroeléctricas Illuchi e Illuchi 2 de ELEPCO S.A. Quito, Pichincha, Ecuador : s.n., Octubre de 2007.

Disminuye los costos adicionales por mantenimiento.

Permite tener un control más adecuado de las variables del proceso a través del monitoreo y análisis tendencias de las variables del proceso de control.

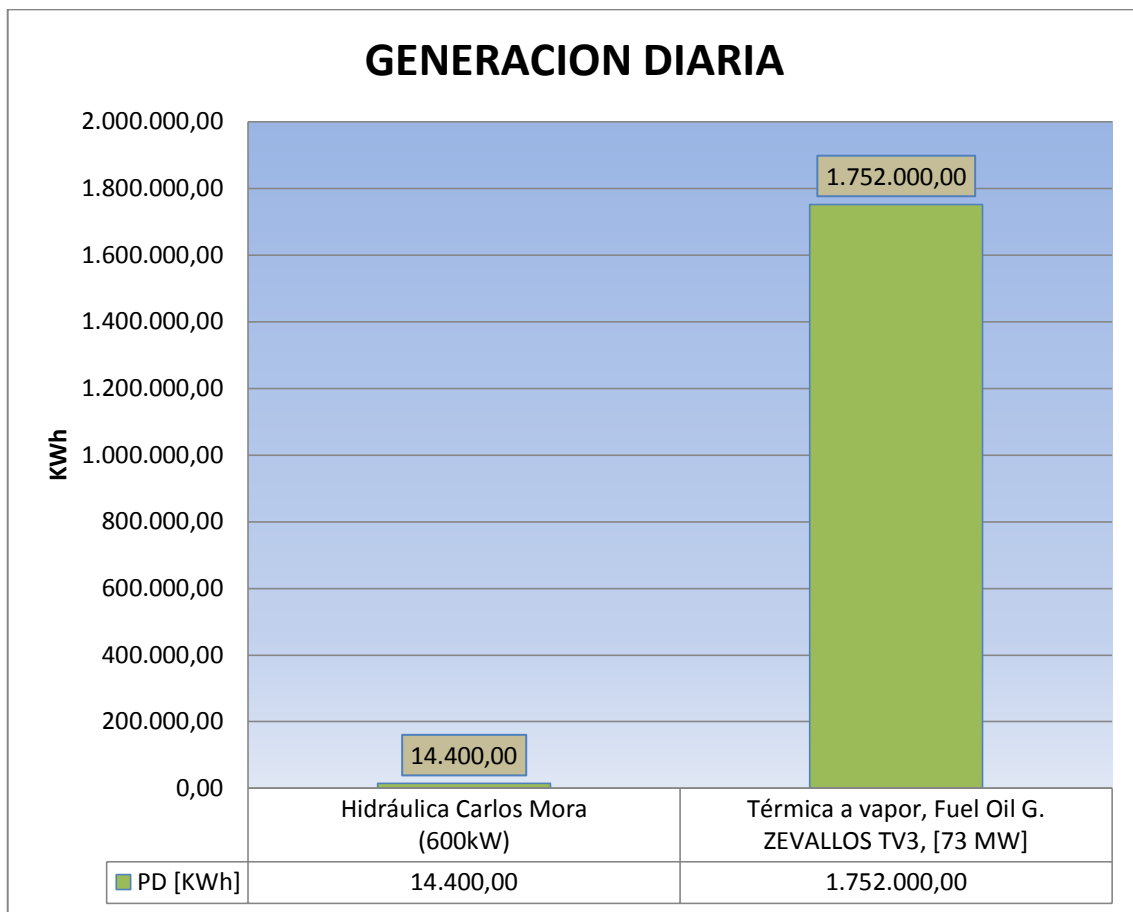
### 3.4.3. Análisis de resultados.

El costo variable de producción de energía hidroeléctrica es mucho menor que el costo variable de producción de la central Termoeléctrica G. ZEVALLOS TV3, debido a que éste último usa Fuel Oil como combustible para la generación de energía eléctrica, estos resultados se aprecia en la siguiente figura.



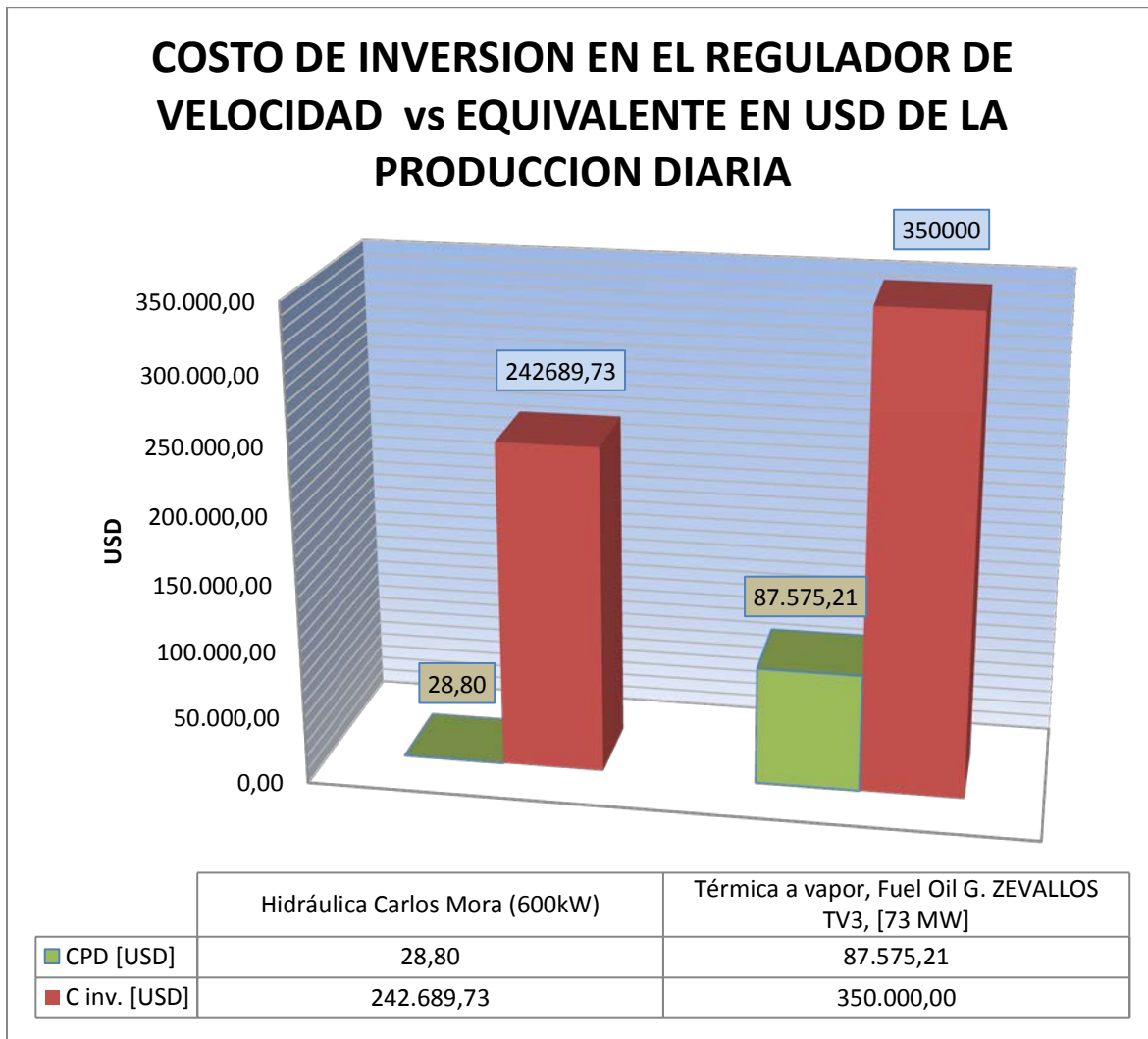
**Figura 3. 10.** Costos variables de producción de energía eléctrica.

En caso de una falla o mala operación del sistema de control la pérdida de producción de energía diaria es igual al producto de la potencia de la unidad por las horas del día, en la siguiente figura 3.11, se observa para las dos unidades analizadas siendo la unidad G. ZEVALLOS TV3 la de mayor generación diaria, asumiendo una generación de 24 horas al día:



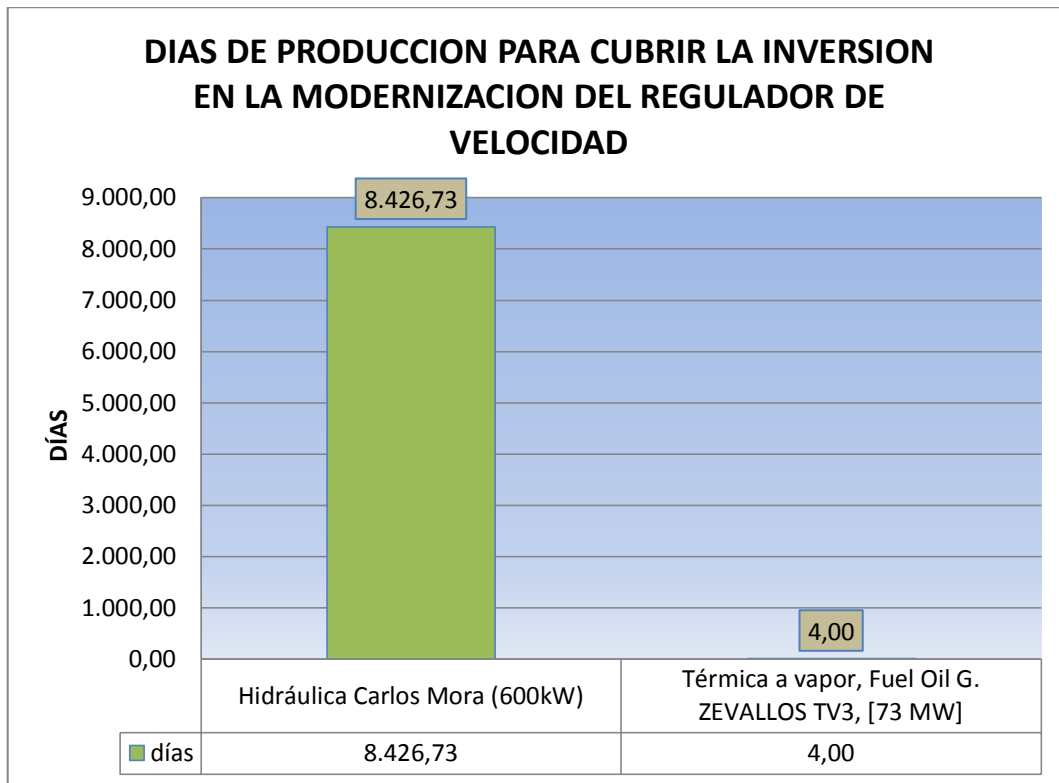
**Figura 3. 11.** Generación diaria de energía eléctrica.

En la siguiente figura podemos observar el costo de inversión de la modernización del regulador de velocidad y el equivalente en dólares de producción de energía eléctrica tanto para la unidad 2 de la central hidroeléctrica Carlos Mora como para la unidad TV3 G. Zevallos.



**Figura 3. 12.** Costo de inversión del regulador de velocidad vs equivalente en dólares de producción diaria.

El tiempo en días de producción de energía eléctrica para cubrir la inversión del regulador de velocidad se muestra en la Figura 3.13, en donde para la unidad TV3 G. Zevallos es de aproximadamente de 4 días, entonces la modernización de la unidad TV3 G. Zevallos es totalmente viable desde el punto de vista económico y financiero, pues la inversión se cubriría con 4 días de producción, mientras que en la central hidroeléctrica Carlos Mora es de aproximadamente de 8400 días, de éste último se conoce que esta unidad estaría por ser modernizada en su totalidad y que este trabajo debe ser definido dentro de la modernización global de la planta.



**Figura 3. 13.** Días de pérdida de energía correspondiente a la inversión del regulador de velocidad.

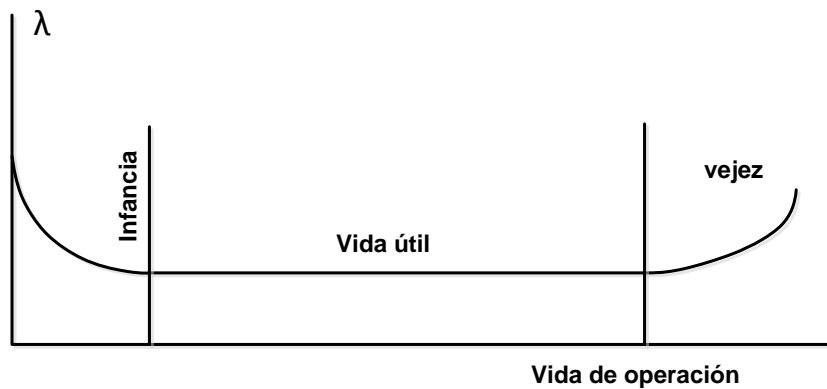
## CAPITULO IV

### 4. CONCLUSIONES-RECOMENDACIONES

#### 4.1. CONCLUSIONES

En una unidad de generación uno de los elementos más importantes es el regulador de velocidad, pues este cumple con la misión de controlar la velocidad de giro del rotor el cual tiene un gran momento de inercia en rotación; cuando la unidad de generación está conectada propiamente a la red, tiene la misión de contribuir a la regulación de frecuencia–potencia del generador y del sistema eléctrico.

El comportamiento de las fallas en el tiempo de un equipo o dispositivo cualquiera de una industria durante su vida útil sigue la tendencia mostrada en la Figura 4.1, donde  $\lambda$  es la tasa de fallas por unidad de tiempo, el período de infancia presenta una tasa de fallas altas debido al equipo nuevo que puede presentar fallas imprevistas hasta que se realicen los ajustes al sistema durante un periodo de pruebas, de la misma manera en el período de vejez presenta una tasa de fallas aleatorias de mayor frecuencia, siendo esta región la más crítica del dispositivo o equipo, finalmente la región intermedia presenta una tasa de fallas por periodo constante en principio lo cual dependerá del régimen operativo y la calidad de mantenimiento implementada. Los reguladores de velocidad de una unidad de generación de energía eléctrica no se salvan de este comportamiento, por éste motivo se debe modernizar el sistema de regulación de velocidad antes de llegar al envejecimiento evitando las fallas recurrentes en equipos antiguos en base a ésta curva representando menos confiabilidad, mayores costos por mantenimiento, lucro cesante debido a salidas intempestivas de la unidad.



**Figura 4. 1.** Vida útil de los equipos.

La modernización del regulador mecánico de velocidad contribuye a mejorar la seguridad de las instalaciones y la de la unidad de generación, reduciendo los riesgos de un equipo tan sensible que controla la elevada inercia de un rotor en movimiento y por ende la tasa de salida forzada de la unidad, incrementa además la producción de energía debido a una mayor exactitud de datos y rapidez de medida que se realiza en tiempo real obteniéndose con esto mayor estabilidad en las acciones correctivas del regulador de velocidad.

La redundancia tanto del hardware como del software de la modernización nos permite tener una mayor seguridad y confiabilidad del sistema, facilita el mantenimiento de los dispositivos sin el riesgo de pérdida de producción, disminuye el riesgo de salidas imprevistas y paros innecesarios por mantenimiento.

El costo de inversión en la modernización del regulador de velocidad mecánico es considerable, pero se ve compensado con la mayor disponibilidad de la unidad para la generación de energía, además debido al envejecimiento, erosión y fatiga de los dispositivos mecánicos es necesario contar con repuestos, cabe recalcar también que los costos de los repuestos de un sistema antiguo muchas veces se tornan excesivamente caros por estar fuera de producción en serie por parte de los fabricantes.



Los dispositivos electrónicos utilizados en la modernización nos permiten almacenar cantidades de datos y tendencias para realizar análisis y estructurar métodos y procedimientos de operación de la unidad de generación, obteniendo menores costos de operación y fijar óptimos programas de mantenimiento.

La confiabilidad de las partes del regulador de velocidad se incrementa debido a que las partes giratorias son reemplazadas por dispositivos electrónicos.

El costo variable de producción de energía de la unidad de 2 de 600kW de la centra Carlos Mora es de 0.2 cUSD/kWh, mientras que su generación diaria es de 14400 kWh, obteniéndose con estos valores el equivalente en dólares de la producción diaria de energía hidroeléctrica de 28,80 USD. El costo de inversión en la modernización del regulador de velocidad es cubierta por aproximadamente 8400 días de producción de energía, finalmente del análisis realizado concluimos que no es factible la modernización de esta unidad, mas bien se conoce que esta unidad estaría por ser modernizada en su totalidad y que este trabajo debe ser definido dentro de la modernización global de la planta.

El costo variable de producción de energía de la unidad TV3 G. Zevallos de 73MW es de 5,00 cUSD/kWh, mientras que su generación diaria es de 1572000 kWh, obteniéndose con estos valores el equivalente en dólares de la producción diaria de energía hidroeléctrica de 87.575,21 USD, por lo que el costo de inversión en la modernización del regulador de velocidad es cubierta por aproximadamente 4 días de producción de energía. Finalmente la modernización de la unidad TV3 G. Zevallos es totalmente viable desde el punto de vista económico y financiero, pues la inversión se cubriría con 4 días de producción

A pesar que el costo de modernización en la central térmica TV3 es mayor que el costo de modernización de la central hidroeléctrica, ésta representa menos días de producción que la central hidroeléctrica por que el costo unitario de producción de la central térmica es mucho mayor que el de una central hidroeléctrica. Cabe recalcar que el análisis fue realizado para las mejores condiciones de la unidad

es decir trabajando las 24 horas al día, sin considerar el paro de la unidad por motivos de despacho, fallas o mantenimiento que sacaría fuera de servicio a la unidad.

## 4.2. RECOMENDACIONES

Conforme lo indicado en el capítulo III, se debe realizar un análisis de la calidad del mantenimiento en unidades antiguas, para dar énfasis en técnicas de mantenimiento basado en condición (RCM), se trata de una estrategia de mantenimiento que consistente en medir con carácter periódico una variedad de parámetros de la unidad, tales como vibración, temperatura, presión, caudal, etc., para determinar su condición o estado. El objetivo es realizar un análisis de tendencia de los datos con el fin de identificar a tiempo las condiciones de las tendencias que definan a futuro un posible fallo y así de manera anticipada tomar las acciones necesarias para evitar averías que puedan provocar un tiempo de parada imprevisto y sus correspondientes consecuencias, además se debe realizar análisis no destructivos y mantenimiento predictivo en equipos y partes asociados a los reguladores de velocidad para realizar estudios de vida residual de partes y equipos sensibles para tomar un margen de seguridad que disminuya los riesgos posibles de falla de estos equipos antiguos, así como evitar el lucro cesante por paros innecesarios.

Se recomienda realizar la implementación de la modernización del sistema de regulación de velocidad antes de llegar a la etapa de envejecimiento ya que en la etapa de envejecimiento involucra tener una estadísticas de fallas para poder proyectar el beneficio de la modernización, lo que implica un enfoque reactivo frente a la administración de operación y mantenimiento de una central de generación, razón por la cual se recomienda tener un criterio de análisis para la modernización de un sistema, pues entre otros se basa en aspectos basado en el análisis de vida residual de los equipos, partes y componentes del sistema; siendo este un enfoque netamente proactivo, evitando las fallas recurrentes, en base a la curva de la Figura 4.1.

Se debe aclarar que una vez implementado un sistema de regulación de última generación se debe considerar un horizonte óptimo de funcionamiento de hasta 15 años, luego de lo cual deberá realizarse actualizaciones de hardware y

software, debido a la continua renovación tecnológica que causa la discontinuidad de los equipos usados.

Se recomienda la capacitación y adiestramiento del personal de operación y mantenimiento que permite el aprovechamiento de los beneficios, mediante un incremento del nivel de ingeniería y tecnología del personal de la central.

Es recomendable minimizar el tiempo de implementación de los equipos de modernización para evitar el riesgo de pérdida de generación de energía que conllevaría a pérdidas económicas, este tipo de modernización debe coincidir con la intervención de un mantenimiento mayor u overhaul de la unidad de generación para así evitar disminuir costos por no generación.

## BIBLIOGRAFIA

**Billinton, R y Allan, R.N. 1996.** Reliability Evaluation of Power System. 2da Plenum, New York, USA : s.n., 1996.

**Calero Freire, Fabián Mauricio. 2007.** Estudio técnico económico de la implementación del centro de control de las centrales hidroeléctricas Illuchi e Illuchi 2 de ELEPCO S.A. Quito, Pichincha, Ecuador : s.n., Octubre de 2007.

**Carrera Orellana, Jorge Andrés. 2011.** "Modernización del Sistema de Regulación de Velocidad en la Central Hidroeléctrica Carlos Mora". Cuenca, Azuay, Ecuador : s.n., 05 de Diciembre de 2011.

**CENACE. 2012-08-16.** *Informe Trimestral Abril-junio 2012.* CENACE. 2012-08-16.

**CONELEC. 2008.** *REGULACIÓN No. CONELEC 013-08 REGULACION COMPLEMENTARIA No. 1 PARA LA APLICACIÓN DEL MANDATO CONSTITUYENTENO 15.* Quito : s.n., 2008.

**Delia y Colomé, Delia Graciela. 2001.** *Operación de Sistemas Eléctricos de Potencia.* Quito, Ecuador : s.n., Julio de 2001.

**Kundur, Prabha S. 2011.** *Power System Stability and Control.* Duisburg : s.n., 2011.

**Mejía Castañeda, Jorge Eduardo. 2011.** Modernización de Reguladores de Velocidad Hidromecánicos. Quito, Pichincha, Ecuador : s.n., Enero de 2011.

**Ochoa Coronel, Jaime Mauricio, Parodi Ocaña, Elsy Alexandra y Arteaga Cordero, José Felicísimo. 2001.** Control Automático Para la Regulación de Frecuencia en las Centrales Térmicas De Electroguayas. Guayaquil, Guayas, Ecuador : s.n., 2001.

**Society, IEEE Power Engineering. 2007.** IEEE Standard Definitions for Use in Reporting Electric Generating Unit Reliability, Availability, and Productivity. New York, USA : s.n., 15 de Marzo de 2007.

**Suescún Monsalve, Ismael.** Centrales Hidráulicas. Antioquia : s.n.

**T, STEIN. 1948.** The influence of self regulation and the damping perion on the WR2 value of hydroelectric power plant. s.l. : The Engineers' Disgest, Junio de 1948.