

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO



FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA Y MECÁNICA

• Escuela Profesional:

INGENIERÍA ELÉCTRICA

AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA DE REGULACIÓN DE VELOCIDAD DE LA MINI CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE COLINE, EN MARCAPATA

Tesis, para optar al título profesional de Ing. Electricista

• Autor:

Br. Humberto Pacheco Espinosa

• Asesor:

Msc. Edgar Z. Alarcón Valdivia

Cusco, 2019

DEDICATORIA

Dedico este Trabajo de Tesis, a los habitantes de la comunidad de Puyca, quienes viven y conservan la armonía con la naturaleza, y así como ellos, a otras comunidades campesinas, que todavía se encuentran aisladas y postradas en su desarrollo.

A mi madre Vidya, por su abnegado trabajo y valiosos consejos de vida.

A mi Padre Efraín y mi abuela Carmela, que desde el cielo me dieron la fuerza para seguir adelante con este proyecto y concluirlo.

INDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	II
INDICE DE CONTENIDO	III
LISTA DE SÍMBOLOS	X
LISTA DE FOTOS.....	XII
LISTA DE FIGURAS.....	XIII
LISTA DE CUADROS.....	XVI
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO I	3
1.1. Aspectos Generales.	3
1.1.1. Sumario.	3
1.1.2. Introducción.	3
1.2. Zona del Proyecto.	4
1.2.1. Ubicación Política.	4
1.2.2. Ubicación Geográfica.....	4
1.3. Descripción del Proyecto.	5
1.3.1. Localización y Accesibilidad.	5
1.3.2. Aspectos Físicos y Ambientales.....	6
1.3.2.1. Condiciones Ambientales de la Zona.....	6
1.3.3. Aspectos Generales del Lugar.....	7
1.3.3.1. Población.....	7
1.3.3.2. Servicios Básicos.	7
1.3.3.3. Social y Económicamente.	7
1.4. El Problema de Estudio.....	8
1.4.1. Área Problemática.	8
1.5. Justificación del Estudio.	8
1.5.1. Desde el Punto de Vista Técnico.....	8
1.5.2. Desde el Punto de Vista Económico.	8
1.5.3. En el Aspecto Social.	9
1.5.4. En el Ámbito Académico.	9
1.5.5. En el Ámbito Profesional.	9
1.6. Objetivos:	9
1.6.1. Objetivo General.	9
1.6.2. Objetivos Específicos:.....	10
1.7. Alcances y Limitaciones:	10
1.7.1. Alcances.	10

1.7.2. Limitaciones.....	11
1.8. Marco Normativo.....	11
1.8.1. Base Legal y Normatividad:.....	11
1.9. Marco Metodológico.....	12
1.9.1. Metodología.....	12
1.9.2. Técnica de Recolección de Datos.....	12
1.9.3. Procesamiento de Datos.....	13
1.10. Inversión y Financiamiento.....	13
1.10.1. Inversión del Proyecto.....	13
1.10.2. Financiamiento del Proyecto.....	14
CAPÍTULO II.....	15
2.1. Marco Teórico.....	15
2.1.1. Revisión Bibliográfica.....	15
2.1.1.1. Antecedentes.....	15
2.1.2. Bases Teóricas.....	20
2.1.2.1. Central Hidroeléctrica.....	20
2.1.2.2. Clasificación de las Centrales.....	20
2.1.2.3. Turbina Hidráulica.....	20
2.2. Turbina de Flujo Transversal.....	21
2.2.1. La Turbina Michell - Banki.....	22
2.2.1.1. Descripción.....	23
2.2.1.2. Fabricación.....	24
2.2.1.3. Funcionamiento.....	24
2.2.1.4. Rendimiento.....	24
2.3. El Generador Síncrono.....	26
2.3.1. Componentes del Generador.....	28
2.3.2. Excitación del Generador.....	28
2.3.3. Especificaciones del Generador.....	29
2.4. Regulación de Velocidad en Turbinas.....	29
2.4.1. Conceptos Generales.....	29
2.4.2. El Regulador de Velocidad Centrífugo.....	30
2.5. Calidad de la Energía Generada.....	32
2.5.1. Cargas que Afectan la Calidad de la Energía.....	34
2.6. Regulación de Tensión y Frecuencia.....	34
2.6.1. Como Mantener los Parámetros Eléctricos.....	36
2.7. Principio de Funcionamiento del Regulador de Velocidad.....	37
2.8. Estructura del Sistema de Regulación.....	40

2.9. Formas de Regular la Velocidad	41
2.9.1. Regulación por Caudal.....	41
2.9.2. Regulación por Carga.....	44
2.9.2.1. La Carga Constante.	45
2.9.2.2. Funcionamiento.....	45
2.9.3. Regulación Mixta.	48
2.9.3.1. Funcionamiento.....	49
2.9.3.2. Descripción y Características.	49
CAPITULO III	51
3.1. Reguladores de Velocidad de Turbinas.....	51
3.1.1. Introducción.	51
3.2. Clasificación de los Reguladores.	51
3.2.1. Regulador Mecánico - Hidráulico.....	52
3.2.2. Regulador Electro - Hidráulico.	54
3.2.3. Regulador Electrónico - Analógico.....	57
3.2.4. Regulador Electrónico - Digital.	60
3.2.4.1. Análisis del Controlador PID.	63
3.2.4.2. Ajustes del Controlador PID.	63
3.2.5. Regulador Electrónico de Carga.	64
3.3. Componentes de la Regulación de Velocidad.....	65
3.3.1. Elementos Principales.	65
3.3.2. Funciones Básicas.	66
CAPITULO IV	69
4.1. La Central Hidroeléctrica de Coline.....	69
4.1.1. Introducción.	69
4.1.2. Antecedentes de la Central.....	69
4.2. Otras Centrales en la Zona.	71
4.3. Estudio Hidrológico.	72
4.3.1. Hidrología del lugar.	72
4.3.2. Fuente de Captación.....	73
4.3.3. Estudio de la Cuenca.	74
4.3.4. La Micro Cuenca.....	75
4.4. Registro de Caudales.....	75
4.4.1. Aforos.....	75
4.4.2. Velocidad y Caudal.	77
4.4.3. Sedimento.....	77
4.5. Descripción de la Central.	77

4.5.1. Distribución de los Usuarios.....	79
4.5.2. Distribución de la Carga.....	79
4.5.3. Diagrama Unifilar del Sistema.....	81
4.6. Función de las Obras Civiles.....	82
4.7. Parámetros de Diseño.....	82
4.8. Obras Civiles e Hidráulicas.....	84
4.8.1. Listado de las Obras Civiles.....	84
4.8.2. Descripción de Obras.....	84
4.9. Componentes Hidroeléctricos.....	89
4.9.1. Descripción de Componentes.....	90
4.9.1.1. La Turbina y sus Partes.....	90
4.9.1.2. La Junta de Montaje.....	91
4.9.1.3. La Válvula Mariposa.....	92
4.9.1.4. El Regulador de Velocidad.....	93
4.9.1.5. El Multiplicador de Velocidad.....	94
4.9.1.6. La Volante de Inercia.....	95
4.9.1.7. Los Acoples Elásticos.....	95
4.9.1.8. El Generador.....	96
4.9.1.9. El Regulador de Tensión.....	97
4.9.1.10. El Tablero de Control y sus Partes.....	98
4.9.1.11. La Puesta a Tierra.....	100
4.9.1.12. El Transformador.....	100
4.9.1.13. El Pórtico de Izaje.....	101
4.9.2. Distribución Eléctrica.....	102
4.9.2.1. Interruptores, Tomacorrientes e Iluminación.....	102
4.10. Impactos de la Central.....	103
4.10.1. Impacto Ambiental.....	103
4.10.2. Impacto Social.....	104
4.10.3. Impacto Económico.....	104
CAPITULO V.....	105
5.1. Diagnóstico de la Central de Coline.....	105
5.1.1. Generalidades.....	105
5.2. Diagnóstico de los Equipos de Generación.....	105
5.2.1. Condiciones Ambientales.....	105
5.2.2. Evaluación de Componentes.....	106
5.2.3. Pruebas Específicas.....	108
5.2.4. Alcances Complementarios.....	108

5.3. Diagnóstico de Operación del Sistema.....	109
5.3.1. Comportamiento del Sistema de Generación.....	110
CAPITULO VI	111
6.1. Estudio de la Demanda.....	111
6.1.1. Comportamiento de la Demanda.....	111
6.1.2. Estimación de la Demanda.....	111
6.1.2.1. Ubicación y levantamiento de información.....	112
6.1.2.2. Preparación de ficha de encuesta	112
6.1.2.3. Objetivos.....	112
6.1.3. Ficha de Encuesta.....	112
6.1.3.1. Datos Estadísticos:	112
6.1.3.2. Alcances del trabajo de Campo.....	113
6.1.4. Promedio de Consumo.....	114
6.1.5. Calificación Eléctrica.....	116
6.2. Cálculo de la Demanda	116
6.2.1. Diagrama de Carga.....	117
6.2.2. Parámetros Hallados.....	118
6.2.2.1. Energía Consumida (Ec).....	118
6.2.2.2. Factor de Carga (Fc).....	118
6.2.2.3. Potencias Consumidas.....	118
6.2.2.4. Factor de Simultaneidad (Fs).....	119
6.2.2.5. Factor de Utilización (Fu).....	119
CAPITULO VII.....	120
7.1. Fundamentos de la Regulación de Velocidad.....	120
7.1.1. Introducción.....	120
7.2. Comportamiento Dinámico.....	120
7.2.1. Masas Rotativas.....	120
7.2.2. Inercia del Sistema.....	122
7.3. Sistema de Generación.....	124
7.3.1. Análisis del Generador.....	124
7.3.2. Análisis de la Carga.....	126
7.3.3. Análisis de la Turbina.....	127
7.3.4. Aumento de la Inercia.....	128
7.4. Estudio de la Estabilidad del Sistema	129
7.4.1. Análisis de Estabilidad de la Central.....	131
7.4.2. Lugar Geométrico de las Raíces.....	132
7.5. Tipos de Carga Demandada.....	135

7.6. Regulación en la Velocidad del Sistema.....	135
7.6.1. Control de la Frecuencia.....	136
7.6.2. Tiempo de Maniobra del Regulador.....	139
CAPITULO VIII.....	140
8.1. Modelamiento de la Regulación de Velocidad.....	140
8.1.1. Introducción.....	140
8.1.2. El sistema de Control de Velocidad.....	140
8.2. Modelo Matemático del Sistema.....	141
8.2.1. Función de Transferencia del Modelo Lineal.....	141
8.2.2. Función de Trasterencia de la Turbina.....	141
8.2.3. Inercia del Agua en el Conducto.....	146
8.2.4. Modelo de la Turbina y su Conducto para Coline.....	147
8.3. Modelo de la Turbina No Ideal.....	148
8.3.1. Características de la Turbina.....	150
8.3.2. Análisis de la Variación de Potencia.....	151
8.3.3. Cálculo de la Caída Hidráulica.....	153
8.3.4. Respuesta de la Carga a la Desviación de Frecuencia.....	154
8.4. Modelo del Regulador de Velocidad Constante.....	156
8.4.1. El Actuador y el Servomotor.....	159
8.5. Simulación de la Respuesta Dinámica.....	159
8.5.1. Conclusión de las Simulaciones.....	163
CAPITULO IX.....	164
9.1. Mecanismo Regulador de Velocidad.....	164
9.1.1. Componentes Reguladores de Caudal.....	164
9.1.2. La Unidad Amplificadora de Potencia.....	165
9.2. Componentes de la Turbina para Regular el Caudal.....	167
9.2.1. Descripción de Componentes.....	167
9.2.1.1. El Álabe Regulador.....	167
9.2.1.2. La Cámara Inyectora.....	168
9.2.1.3. Las Levas.....	168
9.2.1.4. Los Rodamientos.....	168
9.2.1.5. Otras Piezas.....	168
9.3. Cálculos Mecánicos para la Turbina.....	169
9.3.1. Potencia de la Turbina (P_m).....	169
9.3.2. Diámetro del Rodete (D_r).....	170
9.3.3. Velocidad de Rotación (N_r).....	170
9.3.4. Relación de Transmisión (R_t).....	171

9.4. Accionamiento del Alabe Directriz.....	172
9.4.1. Fuerza Necesaria Para Mover el Alabe.....	172
9.4.1.1. Fuerza de Empuje del Pistón (F_a).....	172
9.4.1.2. Fuerza de Impacto del Chorro (F_{ch}).....	174
9.4.1.3. Fuerza Total Necesaria (F_t).....	174
9.4.1.4. Capacidad de Trabajo del Servomotor.....	175
CAPITULO X.....	176
10.1. Selección del Regulador de Velocidad.....	176
10.1.1. Introducción.....	176
10.1.2. Condiciones Previas del Regulador.....	176
10.1.3. Comparativa del Regulador Electrónico y Mecánico.....	177
10.2. Condiciones Evaluables Para la Selección.....	179
10.2.1. Alternativas de Solución Presentadas.....	181
10.2.2. Selección del Regulador de Velocidad.....	181
10.2.3. Criterios de Puntuación.....	182
10.3. La Alternativa Seleccionada.....	182
10.3.1. Descripción de la Alternativa.....	183
10.3.2. Ventajas y Desventajas.....	184
10.3.3. Características Principales del Regulador.....	185
10.3.4. Montaje y Funcionamiento.....	186
10.3.4.1. Especificaciones de Montaje.....	186
10.3.4.2. Consideraciones para el Funcionamiento.....	187
10.3.5. Inspección y Pruebas.....	187
10.3.6. Condiciones de Operación.....	188
10.4. Normas Aplicables.....	188
CAPITULO XI.....	189
11.1. Evaluación Económica.....	189
11.1.1. Introducción.....	189
11.1.2. Costos y Beneficios de la Inversión.....	189
11.1.2.1. Costos.....	189
11.1.2.2. Beneficios.....	190
11.1.3. Análisis Costo - Beneficio.....	192
11.1.4. Indicadores de Beneficio Inmediato.....	192
11.2. Propuesta de Inversión a Detalle.....	193
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	195
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....	199
ANEXOS.....	¡Error! Marcador no definido.

LISTA DE SÍMBOLOS

<u>Símbolo</u>	<u>Descripción</u>
a :	Velocidad de ondas.
A :	Ganancia eléctrica.
S_c :	Sección del chorro de agua.
A_s :	Área de sección del conducto.
D :	Coefficiente de amortiguamiento.
D_m :	Diámetro medio del disco.
D_r :	Diámetro del rodete.
E_c :	Energía cinética.
f :	Frecuencia eléctrica.
F :	Factor de inercia.
F_a :	Fuerza del peso del alabe.
F_{ch} :	Fuerza de impacto del chorro.
F_t :	Fuerza total necesaria.
g :	Aceleración de la gravedad.
G :	Posición del distribuidor.
G_d :	Peso del disco (volante).
H :	Altura de la caída de agua.
H_i :	Constante de Inercia.
I :	Corriente eléctrica.
J :	Momento de inercia.
K_p :	Constante de proporcionalidad.
K_U :	Constante de proporcionalidad.
L_a :	Longitud del alabe.
m_a :	Masa del alabe directriz.
M :	Momento angular.
M_d :	Masa del disco.
N_g :	Velocidad de la turbina.
N_t :	Velocidad del generador.
P_e :	Potencia eléctrica.
P_g :	Señal de salida del regulador.
P_L :	Potencia de carga.
P_m :	Potencia mecánica.
P_n :	Potencia nominal.
P_r :	Potencia resultante.
P_v :	Posición de la válvula.
Q :	Caudal de agua.

r	:	Resistencia eléctrica.
R	:	Estatismo.
R_i	:	Radio de inercia.
R_t	:	Relación de transmisión.
s	:	Operador de Laplace.
S_a	:	Sección del alabe
S_{ch}	:	Sección del chorro.
t	:	Tiempo.
T	:	Torque.
T_a	:	Tiempo de partida mecánica.
T_{ch}	:	Constante de la carga.
T_e	:	Torque eléctrico.
T_g	:	Constante del amplificador.
T_m	:	Torque mecánico.
T_r	:	Torque resultante.
T_w	:	Tiempo de arranque del agua.
U	:	Velocidad del agua.
V	:	Voltaje o tensión.
V_a	:	Volumen del alabe directriz.
W	:	Trabajo.
X	:	Reactancia.
Y	:	Carrera del servomotor.
Z	:	Impedancia.
α	:	Aceleración angular.
β	:	Angulo de impacto del chorro.
γ	:	Peso específico del agua.
δ	:	Densidad del acero.
η	:	Rendimiento.
θ	:	Posición angular.
λ	:	Coefficiente de relación.
ρ	:	Densidad del agua.
φ	:	Flujo magnético.
ω	:	Velocidad angular.
ω_m	:	Velocidad angular nominal.
CA	:	Corriente alterna.
CD	:	Corriente continua.
kW	:	Kilovatios.
VA	:	Volt-amperio.
KVA	:	Kilovoltamperio.

LISTA DE FOTOS

Foto 1.1: Carretera Interoceánica Km 115, desvió hacia Coline.....	06
Foto 2.1: Turbina hidráulica Michell-Banki, con timón de regulación.....	22
Foto 4.1: Río Chectacucho discurriendo por el valle de Puyca.....	73
Foto 4.2: Vista satelital de la mini central de Coline.	77
Foto 4.3: Río, bocatoma, azud, rejilla y compuerta.	84
Foto 4.4: Desarenador, compuerta y canal de limpia.	84
Foto 4.5: Canal de conducción trapezoidal y abierto.	85
Foto 4.6: Cámara de carga con ventana de alivio y rejilla.	85
Foto 4.7: Tubería de presión sobre apoyos y casa de máquinas.....	86
Foto 4.8: Lateral de la casa de máquinas y trocha carrozable.....	86
Foto 4.9: Canal de descarga junto a la casa de máquinas.....	87
Foto 4.10: Lateral de la turbina hidráulica de flujo cruzado.	89
Foto 4.11: Bridas entre la válvula mariposa y junta de montaje.	91
Foto 4.12: Regulador de velocidad oleomecanico y bomba hidráulica.....	92
Foto 4.13: Multiplicador de velocidad y acoples elásticos.	93
Foto 4.14: Disco volante de inercia entre los rodamientos.	94
Foto 4.15: Acoplamiento elástico montado en el eje de rotación.....	95
Foto 4.16: Generador, junto a la caja de borneras y conexiones.....	96
Foto 4.17: Exterior del tablero (izquierda), interior del tablero (derecha).	97
Foto 4.18: Transformador de la sub estación sostenido en postes.	100
Foto 5.1: Casa de máquinas con los equipos hidroeléctricos.....	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Partes de la turbina hidráulica de flujo transversal.	21
Figura 2.2: Rodete de eje horizontal de la turbina Michell-Banki.	23
Figura 2.3: Corte transversal de la turbina Michell-Banki.	24
Figura 2.4: Comparativo de rendimiento de la Michell-Banki y Francis.	25
Figura 2.5: Rendimiento de la Michell-Banki para aperturas del inyector.	25
Figura 2.6: Circuito trifásico equivalente del rotor y estator del alternador.	26
Figura 2.7: Variables de control y de salida en el generador síncrono.	27
Figura 2.8: Regulador centrífugo de J. Watt del siglo XVIII.	31
Figura 2.9: Esquema del regulador centrífugo de esferas girantes.	32
Figura 2.10: Diagrama general de las partes de un sistema de regulación.	40
Figura 2.11: Diagrama y función de transferencia del sistema de regulación.	40
Figura 2.12: Componentes del sistema con regulación por caudal.	42
Figura 2.13: Diagrama de bloques de la regulación por caudal.	44
Figura 2.14: Resistencia eléctrica blindada del regulador por carga.	45
Figura 2.15: Tanque con resistencias de inmersión en agua del regulador.	46
Figura 2.16: Diagrama de bloques de la regulación por carga balastro.	47
Figura 2.17: Diagrama del sistema mixto de regulación.	48
Figura 3.1: Esquema del regulador de velocidad mecánico hidráulico.	53
Figura 3.2: Diagrama de bloques del regulador mecánico hidráulico.	54
Figura 3.3: Esquema del regulador de velocidad electro hidráulico con dashpot.	56
Figura 3.4: Diagrama de bloques del regulador electro hidráulico.	56
Figura 3.5: Esquema del regulador de velocidad electrónico analógico.	58
Figura 3.6: Diagrama de bloques del regulador electrónico analógico.	59
Figura 3.7: Esquema del regulador de velocidad electrónico digital.	61
Figura 3.8: Diagrama del regulador de velocidad PID electrónico digital.	62
Figura 3.9: Funciones de transferencia del controlador electrónico digital.	62
Figura 3.10: Esquema del regulador por carga constante.	64
Figura 3.11: Diagrama de flujo de la regulación de velocidad por caudal.	65
Figura 4.1: Partes principales de una mini central hidroeléctrica.	78
Figura 4.2: Elementos intervinientes en la conducción del recurso hídrico.	84
Figura 4.3: Componentes de la central de generación hidroeléctrica.	89
Figura 6.1: Potencias instaladas promedio en viviendas encuestadas.	114
Figura 6.2: Curva de variación de la demanda diaria.	117
Figura 6.3: Cuadrícula para hallar el área bajo la curva de demanda.	118

Figura 7.1: Conversión de energía mecánica en energía eléctrica.	120
Figura 7.2: Generación hidroeléctrica alimentando una carga aislada.....	124
Figura 7.3: Diagrama en función de los torques actuantes.....	126
Figura 7.4: Diagrama en función de las potencias actuales.	126
Figura 7.5: Diagrama del generador con amortiguación de la carga.....	127
Figura 7.6: Diagrama de bloques reducido del generador.....	127
Figura 7.7: Diagrama de bloques de la turbina hidráulica... ..	128
Figura 7.8: Turbina y generador con amortiguación de la carga.....	128
Figura 7.9: Volante de inercia, disco solido metálico sostenido en el eje.....	128
Figura 7.10: Curva de estabilidad en una variación de carga demandada.....	130
Figura 7.11: Diagrama de la central con control de velocidad.....	131
Figura 7.12: Diagrama y funciones del controlador, turbina y generador.....	132
Figura 7.13: Evolución de los polos del sistema en el plano complejo.....	133
Figura 7.14: Evolución de la frecuencia hasta estabilizarse en 14 s.	134
Figura 7.15: Variación de la frecuencia por aumento de la carga del grupo.....	134
Figura 7.16: Variación de velocidad en oscilaciones con regulación estático.	136
Figura 7.17: Respuesta de la frecuencia ante una perturbación en el sistema.....	137
Figura 7.18: Se amortigua la oscilación, estabilidad, o se amplía, inestabilidad.	138
Figura 7.19: La frecuencia a la velocidad síncrona del generador.	139
Figura 7.20: La frecuencia luego de obtenida la regulación.	139
Figura 8.1: Representación de la central de generación hidroeléctrica.	141
Figura 8.2: Curva de variación de la potencia mecánica de la turbina.....	151
Figura 8.3: Respuesta a un escalón (-0.1 p.u.) en la apertura del distribuidor.	152
Figura 8.4: Respuesta a una rampa en la apertura del distribuidor.	152
Figura 8.5: Respuesta a una señal mixta (-0.1 p.u.) en la apertura del distribuidor.	152
Figura 8.6: Diagrama de bloques de la inercia del sistema.	154
Figura 8.7: Variación de la velocidad luego de abrir el interruptor.	155
Figura 8.8: Diagrama y funciones de transferencia del sistema de generación.....	156
Figura 8.9: Diagrama del regulador de velocidad constante con ganancia... ..	157
Figura 8.10: Diagrama del regulador de velocidad isócrono o sincrónico.....	157
Figura 8.11: Comportamiento transitorio de la frecuencia al variar la ganancia.	158
Figura 8.12: Respuesta a variación de carga del regulador de velocidad isócrono.....	158
Figura 8.13: Diagrama y funciones del actuador, válvulas y servomotor.	159
Figura 8.14: Diagrama de bloques de la central con regulación.	160
Figura 8.15: Señal de variación de la apertura del distribuidor.....	161
Figura 8.16: Señal de variación de la potencia de la turbina.....	161
Figura 8.17: Señal de variación de la velocidad de la turbina.....	162

Figura 8.18: Diagrama y funciones del modelo lineal con regulación.....	162
Figura 8.19: Respuesta de la frecuencia (p.u.) ante un aumento de carga.	162
Figura 8.20: Respuesta del caudal (p.u.) ante una disminución de carga.....	163
Figura 8.21: Variación de apertura del distribuidor ante un aumento de carga.	163
Figura 9.1: Mecanismo regulador de caudal de la turbina Michell-Banki.....	164
Figura 9.2: Biela - manivela para cambiar movimiento rectilíneo en circular.....	165
Figura 9.3: Circuito hidráulico amplificador de potencia mecánica.	165
Figura 9.4: Diagrama de bloques del sistema de posición de la válvula.....	166
Figura 9.5: Función de transferencia del controlador de la válvula.	166
Figura 9.6: Componentes principales de la turbina Michell-Banki.....	167

LISTA DE CUADROS

Cuadro N° 1.1: Distancias desde Cusco hasta el sector de Coline.	05
Cuadro N° 2.1: Clasificación de las centrales según su potencia.	20
Cuadro N° 2.2: Clasificación de las centrales según su altura del salto.	20
Cuadro N° 2.3: Comparativo de regulación de velocidad por caudal y carga.	50
Cuadro N° 4.1: Usos del agua en la cuenca alta del río Araza.	75
Cuadro N° 4.2: Medición de caudales realizados en el río Yanacancha.	76
Cuadro N° 4.3: Registro del caudal máximo y mínimo por meses.	76
Cuadro N° 4.4: Parámetros de diseño de la central de Coline.	83
Cuadro N° 6.1: Periodos y actividades realizadas durante el día.	115
Cuadro N° 8.1: Valores de coeficientes “a” por el nivel de carga.	149
Cuadro N° 8.2: Parámetros utilizados en la simulación.	161
Cuadro N° 9.1: Rango para el diámetro del rodete de la turbina.	170
Cuadro N° 9.2: Valores para la constante “K” adimensional.	171
Cuadro N° 10.1: Comparación de controles electrónicos y mecánicos.	178
Cuadro N° 10.2: Condición de puntaje mediante escala.	182
Cuadro N° 10.3: Características evaluables para los reguladores de velocidad.	182
Cuadro N° 11.1: Inversión total y a detalle para implementar el regulador.	193
Cuadro N° A-1: Potencia nominal de equipos eléctricos.	209
Cuadro N° A-2: Potencia promedio instalada por vivienda.	210
Cuadro N° A-3: Tiempo promedio de uso de cargas por día.	210

RESUMEN

El presente trabajo de tesis, se desarrolla con el objetivo de conocer, evaluar, comparar y seleccionar de las opciones disponibles, la más conveniente para automatizar la regulación de velocidad del conjunto turbina y generador, de la central hidroeléctrica de Coline en la comunidad de Puyca. El trabajo desarrolla analíticamente la regulación de velocidad de turbinas y por consiguiente de la frecuencia del generador, las implicancias de las variaciones de esta, su control y estabilidad. También se realiza una descripción técnica de cada tipo de regulador de velocidad disponible en el mercado; luego se tiene el diagnóstico del sistema de generación y de los equipos hidroeléctricos de la Central, analizando los niveles de desviación de frecuencia y variación de potencia, que limitan la entrega de un servicio eléctrico de calidad, confiable y seguro a los usuarios.

Se sabe que la carga del sistema está cambiando en cada instante, de manera aleatoria, debido a los requerimientos de los consumidores, que conectan y desconectan artefactos continuamente. También el sistema eléctrico por su naturaleza se encuentra expuesto a eventos que podrían ocasionar un déficit o superávit de generación, todo esto provoca alteraciones en la cantidad de potencia demandada, que genera un desbalance entre la producción y el consumo y que incide en la frecuencia del generador. El moldeamiento matemático y la simulación del sistema de control de velocidad, son también parte del análisis de la función de regulación de velocidad y potencia para este sistema eléctrico aislado de Coline, que debe mantener estables sus parámetros ante variaciones de carga.

El principal problema en una pequeña central hidroeléctrica, es la regulación de velocidad o frecuencia, su importancia radica en la estrecha relación que existe entre el control de potencia activa y la regulación de frecuencia. Conservar el sincronismo del sistema de generación ante los distintos eventos que puedan presentarse en su operación como la variación de carga, puede ser resuelto con la instalación de un equipo de regulación de velocidad para la turbina, siendo entonces este sistema de control importante en el sistema de generación de la central.

ABSTRACT

This thesis work is developed with the objective of knowing, evaluating, comparing and selecting from the available options, the most convenient to automate the speed regulation of the turbine and generator set, of the Coline hydroelectric plant in the Puyca community. The work develops analytically the regulation of turbine speed and consequently the frequency of the generator, the implications of the variations of this, its control and stability. A technical description is also made of each type of speed regulator available in the market; then there is a diagnosis of the generation system and the hydroelectric equipment of the power station, analyzing the levels of frequency deviation and power variation, which limit the delivery of a quality, reliable and safe electric service to users.

It is known that the load of the system is changing at every moment, in a random way, due to the requirements of the consumers, who connect and disconnect devices continuously. Also the electric system by its nature is exposed to events that could cause a deficit or generation surplus, all this causes alterations in the amount of power demanded, which generates an imbalance between production and consumption and which affects the frequency of the generator. The mathematical modeling and the simulation of the speed control system are also part of the analysis of the speed and power regulation function for this Coline isolated electrical system, which must keep its parameters stable under load variations.

The main problem in a small hydroelectric power station is the speed or frequency regulation, its importance lies in the close relationship that exists between the active power control and the frequency regulation. Maintain the synchronism of the generation system before the different events that may occur in its operation such as load variation, can be solved with the installation of a speed regulation equipment for the turbine, being this important control system in the system of power plant generation.

CAPÍTULO I

1.1. Aspectos Generales.

1.1.1. Sumario.

El presente estudio de ingeniería desarrolla uno de los sistemas de control más importantes involucrados en la generación eléctrica, la regulación de velocidad de la turbina, de tal forma que se pueda conservar la estabilidad de la unidad de generación, para luego poder seleccionar adecuadamente un sistema de regulación de velocidad automático para la mini central hidroeléctrica de Coline, ubicada en Marcapata. Esto con el fin de dar una solución definitiva para mejorar la calidad y eficiencia en la producción de energía eléctrica y la seguridad de todo el conjunto generador, al cambiar el actual sistema de regulación manual de la turbina por uno automático.

Para lograr esto, se deberá seleccionar de las diferentes opciones tecnológicas disponibles, la mejor alternativa como sistema y equipo de regulación de velocidad, tomando en cuenta sus parámetros técnicos y aspectos funcionales, acordes al tipo de turbina y potencia de generación, sin dejar de lado el aspecto económico al tratarse de una mini central. Entonces, no se tiene que convivir con el problema, sino encontrarle una solución óptima y viable, que sirva para ser posteriormente implementada.

1.1.2. Introducción.

La falta o deficiente electrificación que se manifiesta en el sector rural del país y en particular en zonas apartadas y de difícil acceso como las que tiene la provincia de Quispicanchis en la región Cusco, cuyo coeficiente de electrificación es todavía bajo en comparación a otras poblaciones del Perú, sumado a la lejanía de las líneas de transmisión del sistema interconectado y lo agreste de la geografía de lugar, hacían que centros poblados menores como Coline y otros pertenecientes a la comunidad de Puyca, no tengan acceso a la energía eléctrica.

Para atender estas necesidades energéticas de Puyca, en el año 2005, se hizo la evaluación para la construcción de una mini central hidroeléctrica, encontrándose en el sector de Coline, condiciones topográficas e hidráulicas favorables para hacer viable un

pequeño sistema aislado de generación eléctrica. El proyecto, considero una capacidad de generación de 140 kW., cantidad suficiente para dotar de energía a toda la comunidad referida, que carente de este vital servicio, retrasaba su desarrollo socioeconómico.

A inicios del año 2006 se empezó la construcción de la central, entrando en funcionamiento a finales de ese año. Inicialmente se tuvo electricidad, en dos sectores, Coline y Fause, que fueron los primeros beneficiarios con la energía ahí producida, siendo sus habitantes propietarios y responsables del funcionamiento de la central, que aprovecha el recurso hídrico existente en la zona. Posteriormente se hizo la ampliación de la red de distribución para otros sectores, como Chequepampa y Umaparco, faltando dos más, con lo que se completaría la electrificación a toda la población de Puyca.

Sin embargo, el servicio eléctrico en esta comunidad campesina es deficiente, debido a las continuas variaciones de tensión y frecuencia, causadas principalmente por no contar con un sistema que regule la velocidad del generador de la central, manteniéndolo en su valor nominal, condición que restringe la calidad de energía y no permite brindar un eficiente servicio y el consecuente deterioro, envejecimiento prematuro o mal funcionamiento de los equipos eléctricos de los usuarios.

1.2. Zona del Proyecto.

1.2.1. Ubicación Política.

- Comunidad : Puyca.
- Sectores : Coline y otros.
- Distrito : Marcapata.
- Provincia : Quispicanchis.
- Región : Cusco.

1.2.2. Ubicación Geográfica.

- Latitud : 13°29'55.08" S
- Longitud : 70°55'24.08" O
- Altitud : 3,708 m.s.n.m.
- Cuenca : Quebrada Puyca-Coline.
- Ubicación : al Nor Oeste de Marcapata.

1.3. Descripción del Proyecto.

1.3.1. Localización y Accesibilidad.

El área donde se ubica el presente estudio de automatización, es el sector de Coline, y su acceso está articulado a través de una vía asfaltada, que parte de la ciudad de Cusco hasta llegar al distrito de Urcos en la provincia de Quispicanchis, y luego se continua por la carretera hacia el departamento de Puno, hasta llegar a la localidad de Muñapata, donde se toma el desvío hacia Puerto Maldonado por la carretera Interoceánica Sur, hasta llegar al km. 115 que es el sector de Huayllayoc, luego de haber pasado por las localidades de Ccatca, Ocongate, Mahuayani y el abra de Pirhuayani a 4,725 msnm., donde se accede al desvío a la izquierda, hacia una trocha carrozable afirmada en buen estado.

Desde el desvío mencionado, que esta antes de la población de Marcapata, y luego de una distancia de 8 km. por esta carretera, se encuentra el centro poblado menor de Coline, y al pie de la carretera se puede distinguir la casa de máquinas de la pequeña central que lleva su nombre. La trocha carrozable continúa su recorrido hacia otros sectores de la misma comunidad, como Compipampa. Umaparco y Chequepampa, y también da acceso a otra comunidad campesina colindante, para más adelante volverse a unir con la carretera Interoceánica.

La accesibilidad a la zona es únicamente por esta vía, que une la capital de la región Cusco, con este valle interandino y sus comunidades en el distrito de Marcapata. Las distancias de los tramos mencionados, se detallan con el cuadro N° 1.1, siguiente.

Cuadro N° 1.1: *Distancias desde Cusco hasta el sector de Coline.*

Desde	Hacia	Vía	Distancia
Cusco	Urcos	Asfaltada	46.0 km.
Urcos	Muñapata	Asfaltada	5.0 km.
Muñapata	Ccatca	Asfaltada	27.0 km.
Ccatca	Ocongate	Asfaltada	32.0 km.
Ocongate	Huayllayoc	Asfaltada	52.0 km.
Huayllayoc	Coline	Afirmada	8.5 km.

Fuente: MTC- IIRSA Sur y Expediente técnico de replanteo de obra, Coline.



Foto N° 1.1: Carretera interoceánica sur Km 115, desvió hacia Coline.
Fuente propia.

1.3.2. Aspectos Físicos y Ambientales.

La zona de estudio es un valle interandino, cuyo piso ecológico está comprendido entre los 3,600 hasta más de 4,700 m.s.n.m., su topografía es accidentada, limitada por cerros muy elevados y escarpados con poca vegetación en las partes altas, algunos con nieve permanente. Por esta zona cruza la cordillera central de Chimboya, y en una de las quebradas del flanco oriental de esta encontramos a la comunidad de Puyca, con una extensión de más de 40,000 hectáreas y dividida en seis sectores o anexos.

El clima es frío, lluvioso y húmedo en casi todas las estaciones del año, propio del lugar; las precipitaciones pluviales fuertes se presentan entre los meses de diciembre a marzo, de junio a setiembre estas son escasas con lluvias de menor intensidad y neblina en casi todo el año, dando lugar a un microclima propio.

1.3.2.1. Condiciones Ambientales de la Zona.

- Altitud promedio : 3850 m.s.n.m.
- Temperatura máxima : 18 °C.
- Temperatura mínima : - 5 °C.
- Temperatura promedio (anual) : 11 °C.
- Humedad relativa media (anual) : 75 %.
- Promedio anual de lluvias : 900 mm.

Fuente: Expediente técnico de replanteo de obra de la C. de Coline.

1.3.3. Aspectos Generales del Lugar.

1.3.3.1. Población.

La comunidad campesina de Puyca, cuenta con una población aproximada de 90 familias distribuidas en seis sectores o pequeños centros poblados rurales, la población se encuentra asentada en todos los sectores, pero de forma dispersa, y por lo general al pie de la carretera afirmada o cercana a ella; los pobladores están dedicados principalmente a la agricultura y ganadería.

1.3.3.2. Servicios Básicos.

Dentro de los servicios básicos con que cuenta la población de la comunidad de Puyca están:

- Centro educativo primario.
- Agua entubada comunitaria.
- Energía eléctrica.
- Trocha carrozable.

1.3.3.3. Social y Económicamente.

La comunidad de Puyca, está considerada como una zona de extrema pobreza, con ausencia de servicios sociales básicos, y en los últimos años ha tenido una migración de sus habitantes, debido principalmente a que quedaron aislados, luego que se modificara el trazo de la antigua carretera hacia Puerto Maldonado, que pasaba por sus poblados, y con la actual carretera Interoceánica Sur, no lo hace; lo que dificulta el transporte, la comunicación y el comercio de sus productos hacia otros mercados.

En Puyca, los sectores o pequeños centros poblados que la conforman, están relativamente cercanos, sus principales actividades económicas son, la agricultura en pequeña escala principalmente con papa, haba y olluco, la ganadería, cada familia mantiene una cantidad de animales en las praderas naturales que son de uso comunal para el pastoreo, generalmente con camélidos como alpacas, llamas y en menor cantidad ovinos y vacunos. La producción es principalmente para el consumo local, aunque hay cierto comercio de productos agrícolas y cárnicos a zonas como Marcapata y Ocongate, pero también comercializan con pequeños asentamientos mineros de localidades como Huaypetue y Mazuco en la región de Madre de Dios.

1.4. El Problema de Estudio.

1.4.1. Área Problemática.

La situación descrita anteriormente amerita la necesidad de un estudio de ingeniería, para **la automatización del sistema de regulación de velocidad**; y como resultado esperado, **permitirá mejorar los niveles de tensión y frecuencia**, en la Mini Central Hidroeléctrica de Coline.

1.5. Justificación del Estudio.

La justificación del presente estudio, es tener un análisis de estabilidad y control de velocidad en la central hidroeléctrica, modelada y simulada con todos sus componentes, para luego hacer la evaluación y selección apropiada del equipo de regulación de velocidad para la planta de Coline, ya que se trata de un componente esencial, que garantiza un rendimiento de producción óptimo. Además, el sistema de control a implementarse, logrará que la tensión y frecuencia estén dentro de límites establecidos y consecuentemente el producto eléctrico generado sea de mejor calidad, para beneficio de estas pequeñas poblaciones rurales que dependen de este sistema eléctrico local.

1.5.1. Desde el Punto de Vista Técnico.

Se justifica el estudio por cuanto, al tener una regulación de la velocidad automática en la central, se evita el embalamiento o disminución de la velocidad nominal del grupo, la parada repentina de los equipos como la turbina y generador; además se aumenta la eficiencia de generación de la planta, y la seguridad y duración de sus componentes; y en lo referente a los usuarios, se previene un mal funcionamiento o disminución de la vida útil de los artefactos eléctricos conectados a la red.

1.5.2. Desde el Punto de Vista Económico.

El trabajo permitirá reducir significativamente los costos de operación, mantenimiento y reparación de la mini Central, también se optimizará el aprovechamiento energético del recurso hídrico, todo eso al pasar del actual sistema de regulación manual con operario permanente, por el sistema automático de control de velocidad; considerando además que la condición económica de los usuarios es limitada, por ser zonas de extrema pobreza y no tener ayuda externa alguna.

1.5.3. En el Aspecto Social.

La importancia radica en que al mejorar las condiciones de operación, se hace más eficiente la calidad del producto eléctrico y el servicio generado, disminuyendo las quejas frecuentes de los usuarios, por tanto se beneficiara con una mejor calidad de vida, un desarrollo social, e integrarlos a la modernidad, a estos centros poblados rurales como Coline y otros, pertenecientes a la comunidad campesina de Puyca, con escasa presencia del estado en la atención de los servicios básicos.

1.5.4. En el Ámbito Académico.

El estudio servirá para mejorar el conocimiento teórico y técnico, sobre la utilidad, comportamiento y operatividad de los diferentes sistemas disponibles de regulación de velocidad para turbinas hidráulicas; y en particular para el tipo Cross Flow o de flujo cruzado; cuando estas operan en sistemas aislados. Considerando que el tema no es lo suficientemente desarrollado en las carreras de Ing. eléctrica y mecánica, a pesar de disponerse de los elementos necesarios que hacen factible y de gran utilidad su estudio.

1.5.5. En el Ámbito Profesional.

El presente estudio desarrolla convenientemente la regulación de velocidad y potencia en turbinas hidráulicas, y las diferentes tecnologías disponibles para los equipos de regulación de velocidad por caudal y por carga; esto servirá a, proyectistas de ingeniería eléctrica, mecánica, electrónica y técnicos con carreras afines, como también estudiantes interesados en el tema, con el propósito de facilitarles las herramientas necesarias para el desarrollo de actividades de investigación, en cuanto a diseño, moldeamiento, características, clasificación, selección y funcionamiento del sistema de control de la velocidad en pequeñas y medianas centrales hidráulicas.

1.6. Objetivos:

1.6.1. Objetivo General.

Automatizar, el sistema de regulación de velocidad de la mini central hidroeléctrica de Coline en el distrito de Marcapata, para mejorar la calidad del producto eléctrico en este centro poblado y otros.

1.6.2. Objetivos Específicos:

- Realizar el diagnóstico operativo y físico de la central, considerando la regulación manual de velocidad de la turbina.
- Mejorar u optimizar a niveles aceptables de calidad, la tensión y frecuencia en la central de Colina.
- Analizar la estabilidad del regulador y generador, frente a los cambios en la velocidad instantánea.
- Proponer el sistema más adecuado, para automatizar el control de la velocidad del grupo turbina-generador.
- Seleccionar comparativamente de las alternativas propuestas, el regulador de velocidad para la central.
- Modelar y simular el sistema general de regulación de velocidad por control de caudal, para la turbina.

1.7. Alcances y Limitaciones:

1.7.1. Alcances.

Dentro de los alcances del presente estudio de ingeniería, se tiene que:

Se mejorará la regulación de velocidad, a fin de obtener niveles adecuados de tensión y frecuencia y por consiguiente ofrecer una mejor calidad del producto eléctrico, para alcanzar esta finalidad el estudio abarca:

Conceptos, descripciones, diagnósticos, cálculos, modelamiento y la selección del equipo de las diferentes tecnologías para la regulación de velocidad que se tiene, con el fin de tomar un adecuado conocimiento para automatizar la central.

El presente estudio podrá ser utilizado como base, para la posterior elaboración del expediente técnico del proyecto de regulación de velocidad, con el fin de gestionar su financiamiento y posterior implementación.

Esta tesis, puede ser un documento de referencia, para automatizar la regulación de velocidad en otras centrales hidroeléctricas similares, o como texto de consulta en el tema, el cual es tratado ampliamente.

1.7.2. Limitaciones.

Dentro de las limitaciones del presente estudio de Ingeniería tenemos que:

El estudio de estabilidad del ángulo rotórico del generador síncrono, sale del alcance del presente trabajo.

No se considera la modificación en su diseño original de los equipos principales tales como, la turbina el generador.

No se considera el diseño o modificación alguna de la conducción hidráulica y las obras civiles existentes.

No se incluye a otros sistemas, como el de protección, tampoco se analiza las sub estaciones y la red de distribución.

No se contó con toda la información técnica necesaria de los equipos de generación, siendo algunos de ellos de fabricación local.

No se cuenta en la planta con el registro histórico de parámetros de operación del sistema, ni de la demanda de energía.

1.8. Marco Normativo.

El presente acápite da a conocer el marco legal y técnico que norma y debe tenerse en cuenta en las actividades, estudios y proyectos relacionados con la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica en el Perú.

1.8.1. Base Legal y Normatividad:

- Ley de concesiones eléctricas (Decreto Ley N° 25844), y su reglamento.
- Norma técnica de calidad de los servicios eléctricos (D.S.N° 020-97 EM.).
- Ley marco de organismos reguladores de la inversión privada en servicios públicos (Ley N°27332).
- Procedimiento para supervisar la generación en sistemas eléctricos aislados, del Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN).
- Procedimiento para la supervisión de la operación de los sistemas eléctricos, Res. OSINERGMIN N° 074-20045-OS/CD.
- Ley que modifica la función normativa de OSINERGMIN (Ley N° 27631).
- Ley para el desarrollo eficiente de generación eléctrica (ley N° 28832).

- Ley de promoción de la inversión en energías renovables (Ley N° 1002).
- Ley de promoción del uso eficiente de la energía (Ley N° 27345).
- R.D. N°057-88-EM/DGE, Directiva N°001-88, para la presentación de estudios de pequeñas centrales hidroeléctricas.
- Código Nacional de Electricidad - Suministro.

1.9. Marco Metodológico.

1.9.1. Metodología.

Para realizar el estudio y alcanzar los objetivos propuestos, se recurrió a las siguientes fuentes:

- Recolección de información básica en el sitio y entrevistas a los agentes involucrados.
- La información de carácter teórica y datos históricos, se obtuvo de bibliografía especializada, en monografías, tesis, artículos, ensayos y libros.
- Para la información estadística, indicadores, tolerancias y parámetros eléctricos; se recurrió a las mediciones propias de campo.
- Complementaron los datos técnicos, estudios previos realizados, información geográfica y climatológica, manuales y catálogos de los fabricantes.
- La red de Internet, instrumento digital que complementa el estudio bibliográfico a través de páginas Web, Repositorios virtuales y otros.

1.9.2. Técnica de Recolección de Datos.

Para la elaboración del enfoque general, área del problema, descripción y diagnóstico, se efectuaron las siguientes acciones:

- Listado de los problemas principales.
- Ubicación de las fuentes de datos.
- Diseño de instrumentos operativos y de verificación.
- Perfil de diagnóstico y estudios de afianzamiento.
- Trabajo de campo e inspecciones en el lugar.
- Consulta a especialistas en el tema.
- Procesamiento de la información obtenida.

Para la elaboración de la propuesta de solución, se utilizaron los siguientes instrumentos metodológicos.

- Observación directa del funcionamiento de equipos.
- Encuestas y guía de entrevistas a los usuarios.
- Revisión de documentos, expedientes y cartografía.
- Manuales, estadísticas y sugerencias de especialistas.
- Documentación normativa de entidades estatales.
- Simulación del comportamiento del sistema de generación.

1.9.3. Procesamiento de Datos.

El procesamiento de los datos para obtener la información, se efectuó mediante las herramientas como, cálculo matemático y estadística descriptiva; también textos de consulta en electrificación rural, maquinas eléctricas, centrales eléctricas y teoría de control. Además, fue de utilidad conceptos de hidráulica, mecánica y electrónica.

También se requirió de programas informáticos tales como, Word y Excel, para el cálculo y simulación MatLab; en la elaboración de planos, AutoCad, y ArGis en las imágenes geo-referenciadas.

1.10. Inversión y Financiamiento.

1.10.1. Inversión del Proyecto.

En el Capítulo XI, sobre Evaluación Económica, se adjunta el cuadro de inversión total y a detalle, para la implementación de equipo regulador de velocidad, el que podrá ser utilizado como referencia por las autoridades de la comunidad de Puyca, quienes se encargaran de gestionar su financiamiento ante las entidades públicas o privadas que correspondan.

La inversión considerada en el cuadro referido el párrafo anterior, consiste en la adquisición del equipo de regulación de velocidad, instalación, pruebas, puesta en funcionamiento y transporte hasta su emplazamiento, así como la capacitación de los operarios de la central de Colina.

1.10.2. Financiamiento del Proyecto.

Para obtener las fuentes de financiamiento del proyecto de automatización del control de velocidad de la central hidroeléctrica de Coline, se tendrá en consideración lo siguiente:

Que, “el estado asume un rol subsidiario en el proceso de ampliación de la frontera eléctrica en las zonas rurales, localidades aisladas y de frontera del país, a través de la ejecución de los Sistemas Eléctricos Rurales (SER), y promoverá la participación privada, incluso desde las etapas de planeamiento y diseño de los proyectos”.

Referencia: Dirección General de Energía, del M.E.M. - Proyectos de Electrificación.

Se puede buscar el financiamiento económico a través de entidades estatales como, el Ministerio de Energía y Minas, Gobierno Regional de Cusco, Municipio Provincial de Quispicanchis, Municipio Distrital de Marcapata, Entidades de Cooperación Internacional u Organismos no Gubernamentales (ONGs), entre otras que fomentan la generación eléctrica con energías renovables como la hidráulica, para así materializar el presente trabajo.

Al finalizar el presente estudio, se hará entrega de una copia del mismo a los representantes de la comunidad de Puyca, para que sirva como documento base para las gestiones encaminadas al financiamiento e implementación del mismo, en beneficio de la población del ámbito de su aplicación.

CAPÍTULO II

2.1. Marco Teórico.

2.1.1. Revisión Bibliográfica.

En el desarrollo del presente estudio, se han revisado numerosos trabajos de investigación, textos y artículos académicos referentes a regulación de velocidad, estabilidad de frecuencia y gobernadores para turbinas, estos son algunos de ellos.

2.1.1.1. Antecedentes.

- Sarasúa Moreno José I., en su tesis de doctorado “*Control de Mini Centrales Hidroeléctricas Fluyentes, Modelado y Estabilidad*” - 2009, de la Universidad Politécnica de Madrid - España, plantea lo siguiente:

El objetivo principal del trabajo, es la elaboración de un modelo matemático que simule la operación de una mini central hidroeléctrica fluyente con control de nivel de agua en la cámara de carga. Dicho modelo se aplica a tres tipologías de mini centrales: a pie de presa, en derivación con canal en lámina libre y cámara de carga, y en derivación con galería y chimenea de equilibrio.

Luego, se elaboran los modelos y se procede al estudio de la estabilidad en pequeña perturbación de la central en condiciones normales de operación. Para ello, siguiendo la teoría de control clásico, se linealizan las ecuaciones que reflejan la dinámica de cada componente de la central, dando lugar a su formulación canónica y a la matriz dinámica del sistema. A partir de dicha matriz y aplicando el criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz, se llega a las siguientes conclusiones:

En centrales en derivación con galería y chimenea:

- El control de nivel resulta más estable que el control de frecuencia-potencia.
- La estabilidad empeora cuando se reduce el caudal turbinado
- La superficie del azud y de la chimenea, sí intervienen en la estabilidad de la central.
- El vertido del caudal ecológico entre el azud y la descarga mejora la estabilidad de la central.

En centrales en derivación con canal y centrales a pie de presa:

- Las dimensiones de la cámara de carga y del azud de derivación no influyen en la estabilidad de la central.
- Se mejora la estabilidad de la central conforme se turbinan menor caudal.

- Manzano León Luis M. y otros, en su tesis, *“Desarrollo de un Prototipo Virtual para el Sistema de Control Carga-Velocidad de una Unidad Hidroeléctrica”* - 2012, del Instituto Politécnico Nacional de México, plantea lo siguiente:

El objetivo principal del trabajo, es que a partir de la investigación del lazo de control carga velocidad para unidades hidráulicas, se realice un análisis del comportamiento de la turbina tipo Francis de 9 MW., con las variables de velocidad de la turbina, potencia del generador y apertura de los alabes, para luego hacer el desarrollo de la programación para un PLC, con el propósito de cumplir con las condiciones del sistema de control. Para comprobar el algoritmo de control realizado, se obtendrá el comportamiento de la planta por medio de Visual Basic, y así poder comprobar la programación del PLC.

Luego se concluye que, la programación del control carga velocidad con PLC en el software Rslogix responde ante las pruebas realizadas, que de no contar con el Visual Basic, resultaría complicada la simbolización de la lógica. En lo que compete a la programación propuesta en Rslogix, hay que tener en cuenta la complejidad que representa el bloque PID del controlador, y aún más cuando hay una arquitectura tipo cascada como es el presente caso, donde previamente hay que recurrir a la teoría de control, y visto desde la programación conocer los registros de memoria que por defecto el PID asigna así como la representación de cada uno, también asignar valores convenientes a los comandos de escalamiento, esto para evitar fallas de desborde de memoria en la programación, luego se puntualiza que.

- El lazo de control se analizó en Matlab y en base a esto, se realizó la programación en Rslogix y Visual Basic.
- La sintonización calculada y comprobada en Matlab difiere a la sintonización con la que se demostró el lazo de control posterior.
- En Rslogix, la sintonización se realiza a prueba y error, por tanto es recomendable solo Matlab como herramienta para este sistema.

- Cuando no se cuenta con la planta física para el estudio, se sugiere utilizar un control continuo o PID y el autómatas programable PLC.

- Vaglio Calvo David, en su tesis, **“Determinación del lazo de Regulación de Velocidad de la Planta Hidroeléctrica La Joya”** - 2010, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

El objetivo del trabajo es realizar ajustes en el regulador de velocidad de la planta hidroeléctrica La Joya, para mejorar su funcionamiento, esto a partir del estudio y el comportamiento actual del sistema de generación, luego determinar la respuesta del gobernador ante variaciones y su interacción con el resto de componentes del lazo de regulación de velocidad.

Para corregir errores que presenta actualmente el sistema y mejorar su eficiencia, se necesita hacer un estudio del funcionamiento del lazo de control de velocidad, y un modelo matemático que permita su análisis a profundidad. El estudio también busca determinar el funcionamiento actual de la planta y conocer si es posible realizar ajustes que permitan mejorarla, para esto el modelo matemático debe incluir los principales componentes del lazo de velocidad, como la tubería de alta presión, turbina, servomotor, generador y red; junto a estos subsistemas se encuentra el gobernador utilizado en la planta, el NEYRPIC 1000, que es el principal módulo del lazo, que tuvo que ser analizado, ya que mediante este es posible realizar ajustes para mejorar la eficiencia del sistema, luego se concluyó en lo siguiente:

- El error en la regulación por apertura, se debe a un error en el ajuste en la conversión de corriente en la consigna ya que cuando inicia la regulación ya existe un valor mínimo de apertura para que el sistema opere.
- Para operar en el modo Isla es necesario acondicionar señales, que en su forma de operación actual impiden este modo de operación.
- La carga inicial con la que se puede arrancar en isla debe ser pequeña, ya que de lo contrario el sistema no podrá funcionar correctamente.
- El estatismo permanente responde rápidamente ante variaciones de carga, cuando su valor es pequeño y más lentamente conforme este vaya aumentando.

- Rosales Garrido José I., en su tesis, **“Determinación de Parámetros de Regulador de Tensión, Regulador de Velocidad y PSS de Unidades Generadoras de la C. H. Carena”**- 2016, presentado en la Universidad de Santiago de Chile.

En la tesis se analiza la estructura básica, características y el efecto de la sintonización de cada uno de los parámetros de tres elementos de control en una unidad generadora: el controlador de velocidad, el controlador de tensión y el estabilizador de sistema de potencia. Para asegurar la estabilidad dentro de un sistema eléctrico de potencia, es necesario que los reguladores mencionados estén correctamente ajustados, por lo cual se busca proponer una metodología para cumplir este objetivo.

El estudio abarca el control enfocado a centrales hidráulicas, verificando métodos de ajuste para compensadores PI y *lead-lag*. Se aplican las metodologías al caso particular de la Central Hidroeléctrica Carena: Se utiliza el compensador del tipo PI dentro del control de velocidad, ajustado mediante las técnicas de Bode y Ziegler-Nichols. Por otro lado, tanto para el control de tensión como para el estabilizador de potencia se utilizaron controladores del tipo *lead-lag*, los cuales son ajustados mediante técnicas de Bode.

- Delgado Montenegro Ibeth, en su tesis, ***“Estudio de los Sistemas de Regulación de Velocidad y Turbinas y su Influencia en la Estabilidad Transitoria del SEP”*** - 1997, presentada a la Escuela Politécnica Nacional de México.

El objetivo de la tesis, es realizar el estudio de los sistemas hidroeléctricos de generación, compuestos de regulador de velocidad y turbina, e incorporarlos a un programa de estabilidad transitoria para evaluar su influencia en el comportamiento dinámico del sistema eléctrico de potencia.

El trabajo desarrolla un modelo matemático de sistemas de regulación de velocidad e hidroturbinas, y una subrutina escrita en lenguaje Fortran, capaz de ser acoplada a un programa computacional para el análisis de estabilidad transitoria, donde la máquina sincrónica se modela con parámetros dinámicos, sistemas de excitación de corriente continua y alterna, que se representan mediante ecuaciones diferenciales por el método de Runge Kutta, además Fortran permite simular perturbaciones de corta duración.

También, se hace una descripción funcional de los sistemas reguladores de velocidad mecánico hidráulicos, y se analizan ejemplos teóricos para determinar la influencia de los sistemas reguladores de velocidad en el sistema eléctrico de potencia para diferentes condiciones de operación, luego se concluye en:

Los modelos pueden representar funciones de transferencia equivalentes sin considerar los límites de velocidad de compuerta, las variaciones de flujo de agua en la tubería de presión y algunas constantes de tiempo como la de válvula piloto. Esta reducción facilita el manejo y análisis, sin afectar significativamente la exactitud del comportamiento.

El comportamiento de la tubería es lineal entre ciertos límites, mientras que la respuesta de la turbina es exponencial en la zona lineal de la compuerta, la posición del servomotor y la posición efectiva de las válvulas son iguales, luego, la función de transferencia es aplicable siempre que no se alcancen los límites de velocidad de compuerta.

- Pérez Arenas Jeider A., en su tesis, *“Medición del Desempeño de los Reguladores de Velocidad de las Plantas Hidráulicas”* - 2012, presentada a la Universidad Industrial de Santander - Colombia.

En condiciones normales de operación no es posible evaluar la respuesta de los sistemas de control de velocidad de generadores, por lo que el estudio, busca seleccionar criterios que permitan determinar el desempeño de los reguladores de velocidad, partiendo de distintos modelos, los cuales representan diferentes estrategias de control. Cada uno de los criterios establecidos se puede evaluar mediante parámetros llamados índices de desempeño, a su vez se diseñó un procedimiento para la obtención de los índices, y se validaron en dos sistemas de prueba.

Se presenta también la referencia de los índices y criterios establecidos para la evaluación del comportamiento dinámico del regulador. Los resultados obtenidos en la validación de los índices y criterios, más el análisis del marco referencial, sirvieron de base para proponer los “índices de desempeño” que evalúan la respuesta óptima de regulador, luego se concluye que:

- Con los tres controladores (caída temporal, PID y doble derivativo), el sistema es estable ante variaciones de carga y caídas de frecuencia, sin embargo ante oscilaciones de la frecuencia no hay estabilidad para todos los modos.

- En las pruebas de velocidad de respuesta, estabilidad ante variaciones de carga y estabilidad relativa, el regulador doble derivativo presento el mejor desempeño en red aislada.

2.1.2. Bases Teóricas.

2.1.2.1. Central Hidroeléctrica.

Planta destinada a la producción de energía eléctrica en base a la energía potencial del agua almacenada. En una central la energía hidráulica es convertida en mecánica y luego pasa a un generador que la restituye en sus bornes en forma de energía eléctrica.

2.1.2.2. Clasificación de las Centrales.

Según la potencia las centrales eléctricas pueden clasificarse de acuerdo a:

Cuadro N° 2.1: *Clasificación de las centrales según su potencia.*

Región	Institución	Micro	Mini	Pequeña
Mundial	ONUDI	< 100 kW	101 - 2000 kW	2000 -10000 kW
Latinoamérica	OLADE	< 50 kW	51 - 500 kW	500 - 5000 kW

Fuente: Carrasco, A. - Manual de mini y micro centrales hidráulicas.

Según el salto o caída, las centrales pueden clasificarse como:

Cuadro N° 2.2: *Clasificación de las centrales según su altura del salto.*

Central	Baja	Media	Alta
Micro	H < 15 m	15 m < H < 50 m	H > 50 m
Mini	H < 20 m	20 m < H < 100 m	H > 100 m
Pequeña	H < 25 m	25 m < H < 130 m	H > 130 m

Fuente: Ortiz, R. - Centrales hidroeléctricas.

2.1.2.3. Turbina Hidráulica.

Es una turbo máquina motora, que absorbe energía de un fluido, y la restituye en energía mecánica. La turbina hidráulica según el grado de reacción “Gr.” se clasifica en, de Acción y Reacción. Cuando el grado de reacción es cero, la turbina se llama de acción., si el grado de reacción es distinto de cero, la turbina se llama de reacción, el grado de reacción de una turbina se define, con la ecuación N° 2.1:

$$G_r = \frac{\text{Altura de presión absorbida por el rodete}}{\text{Altura total absorbida por el rodete}} \dots (2.1)$$

2.2. Turbina de Flujo Transversal.

La turbina hidráulica de flujo transversal o cruzado, es un motor hidráulico clasificado generalmente como una turbina de acción, que dependiendo del modelo, presenta ciertas características de una turbina de reacción (modelos donde el inyector se encuentra muy próximo al rodete), por ello se clasifica como turbina límite, y está recomendada para aprovechamientos de pequeños saltos hidráulicos y caudales moderados ($P < 1000$ kW), por su bajo costo de manufactura, sencillez constructiva y su buen desempeño a cargas parciales en comparación con otras alternativas.

Recientes ensayos han indicado que existe una pequeña reacción en el primer paso del agua a causa de una presión ligeramente superior a la atmosférica, debido a la cercanía del inyector al rodete. Se le conoce también como turbina Michell - Banki, la que se muestra en la gráfica N° 2.1.

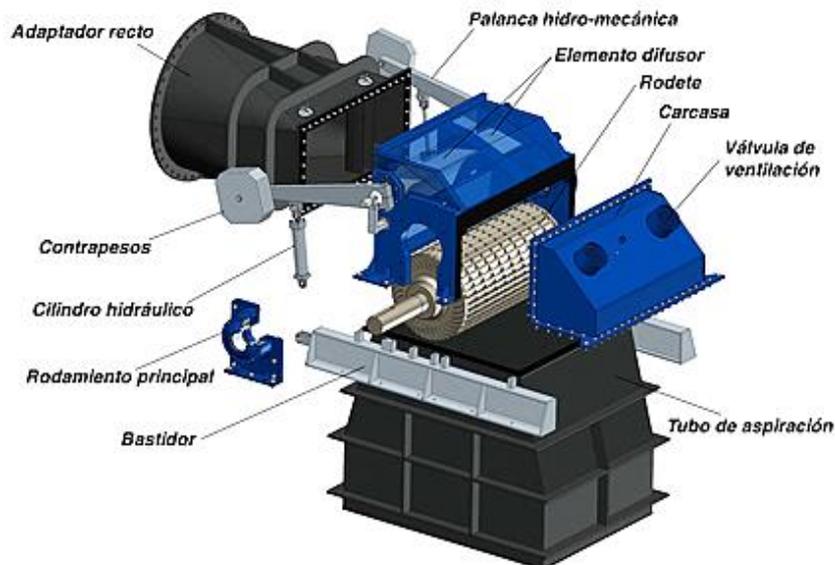


Figura N° 2.1: Partes de la turbina hidráulica de flujo transversal.
Fuente: Catalogo de la casa Ossberger.

Las principales características son:

- Turbina de acción.
- Flujo radial centrípeto-centrífugo.

- Flujo cruzado (transversal).
- El flujo de agua choca con los álabes dos veces (entrada y salida).
- Admisión parcial (el flujo de agua no moja todos los álabes).

Además, se tiene que:

- La velocidad de giro puede ser seleccionada en un amplio rango.
- El diámetro de la turbina no depende necesariamente del caudal.
- Se alcanza un aceptable nivel de rendimiento con pequeñas turbinas.
- Se puede regular el caudal y la potencia por medio de un álabe ajustable.

2.2.1. La Turbina Michell - Banki.

Esta turbina fue inventada por A. G. Michell de Australia, y patentada en 1903, posteriormente entre 1917 y 1919, fue estudiada por Donar Banki de Hungría, en la universidad de Budapest. Se trata de una turbina de acción de flujo radial centrípeto centrífugo (transversal), de doble paso y admisión parcial, conocida como Cross Flow o Flujo Cruzado, en la figura N° 2.2, se ve una turbina Michell - Banki de eje horizontal y regulación manual mediante timón.



Foto N° 2.1: Turbina Michell Banki, con timón de regulación.
Fuente: Mora, D. - Guía para estudios de pre factibilidad de P.C.H.

Desde su uso y difusión por el año 1961, la turbina no ha sufrido modificaciones importantes con respecto a su diseño original; tampoco se han revisado, reformulado y replanteado, principios, supuestos y relaciones en los que se basa. En general la mayoría de los trabajos desarrollados se orientan al mejoramiento del diseño y operación de esta turbina y en menor grado a la formulación de modelos teóricos para un nuevo diseño y la optimización de su comportamiento.

2.2.1.1. Descripción.

La turbina consta de tres elementos principales, el inyector, un rodete y el conjunto de elementos que conforman la carcasa; el agua que ingresa a la turbina por el inyector, luego es restituida al cauce natural mediante el tubo de descarga a presión atmosférica.

El distribuidor consiste en una tobera de sección rectangular que abarca al rodete en un cierto ángulo de admisión parcial. Está dotado de una paleta directriz longitudinal para la regulación y orientación del caudal, llamada también alabe directriz. Se puede operar el distribuidor manual o automáticamente.

El rodete tiene forma de tambor o cilindro y está compuesto por un par de discos paralelos, entre los cuales se fijan una cierta cantidad de alabes de perfil circular y de simple curvatura a la periferia de este, que por lo general se hacen mediante soldadura, el rodete está sujetado por un eje solido longitudinal y concéntrico.

La forma cilíndrica que tiene el rodete, permite que la turbina pueda trabajar dentro de grandes rangos de variación de caudal con sólo darle la longitud conveniente a este.



Figura N° 2.2: Rodete de eje horizontal de la turbina Michell - Banki.
Fuente propia.

2.2.1.2. Fabricación.

Esta turbina es de construcción simple, lo que le da la característica particular de ser fabricada sin mucha tecnología y localmente. Las partes principales como el rodete y la carcasa, se hacen con lámina de acero, moldeada y soldada el eje está hecho de acero macizo y es sostenido por dos rodamientos.

Lo que se necesita para confeccionar la turbina Michell - Banki, es un equipo de soldar, una amoladora y una fresadora, esto se puede realizar en cualquier taller de metal mecánica, o en los que se utilizan para reparar maquinaria industrial.

2.2.1.3. Funcionamiento.

Consiste en que un amplio chorro de agua de sección rectangular incide dos veces en las paletas de la rueda, cruzando el interior, sobre los alabes del rodete, de allí se le conoce también como *Cross Flow*, (fluir a través), la transferencia de energía es 72% en la primera acción y 28% en la segunda. La diferencia con a otras turbinas, es que no hay deflexión axial del chorro, ya que el flujo discurre sobre planos perpendiculares al eje.

Su adaptabilidad, simplicidad y bajo costo, hacen que sea la más apropiada para pequeños sistemas de generación. Puede aplicarse a caídas de 1 a 200 metros y caudales de 0,02 a 8 m³/s., su eficiencia es buena, aunque no muy alta si se compara con una turbina Pelton o Francis.

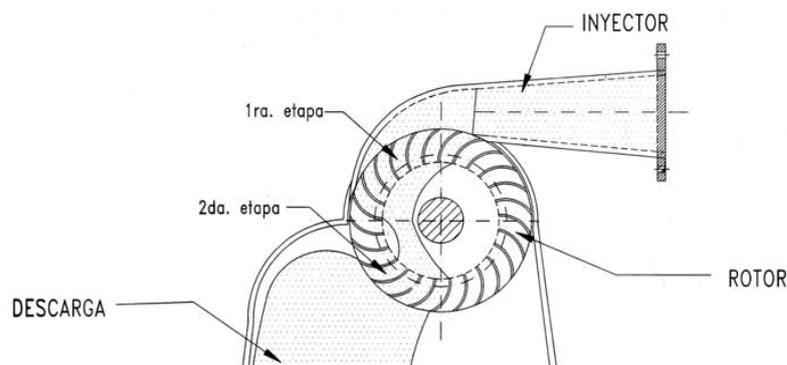


Figura N° 2.3: Corte transversal de la turbina Michell - Banki.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.1.4. Rendimiento.

Esta turbina es eficiente dentro de un amplio rango de caudales. “Los ensayos realizados por distintos investigadores sitúan el rendimiento hidráulico o eficiencia de

esta máquina entre un 65 a 70%, otros autores mencionan un 61% en la primera etapa, y en la segunda etapa entrega un 17%, y en general muchos autores indican un 70% y hasta un 84%". El rendimiento de la turbina varía en función del caudal utilizado. El gráfico N° 2.4, muestra el rendimiento, de una turbina Francis y una Michell - Banki, para caudales a partir del 20% del nominal de diseño". Referencia: *Soluciones Prácticas, ITDG*.

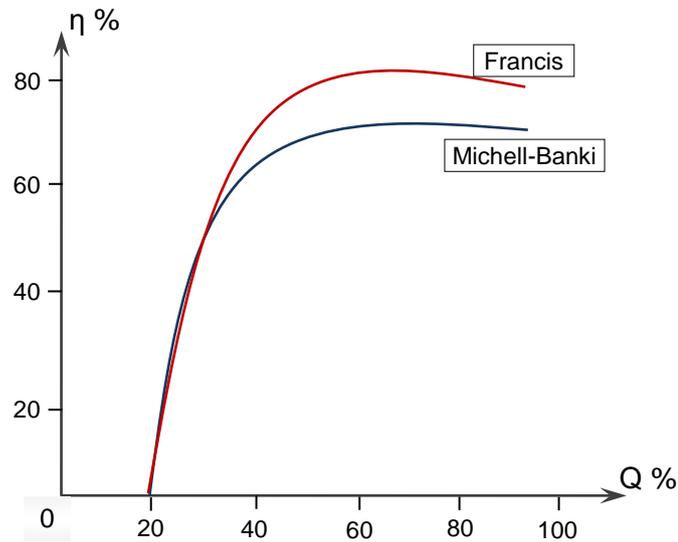


Figura N° 2.4: Comparativo del rendimiento de la Michell-Banki y Francis.
Fuente: Catalogo del fabricante de turbinas Ossberger.

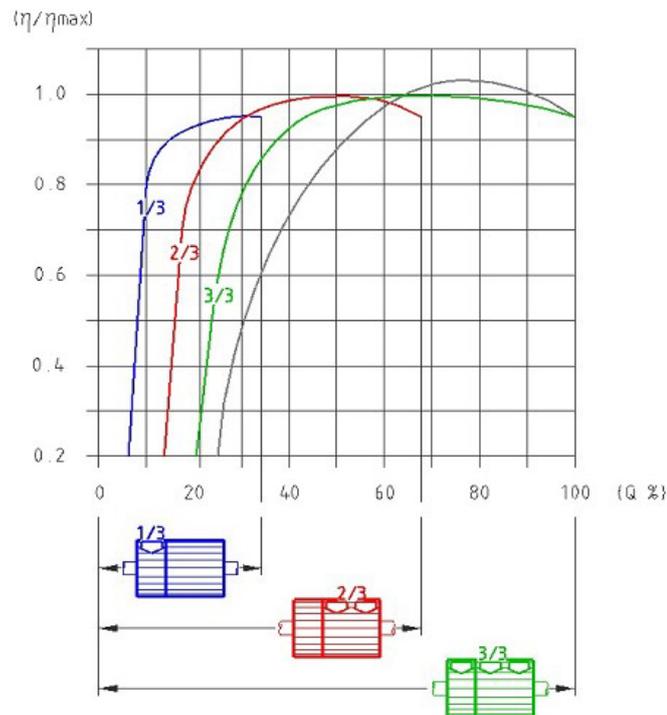


Figura N° 2.5: Rendimiento de la Michell-Banki para aperturas del inyector.
Fuente: Catalogo del fabricante de turbinas Ossberger.

En el gráfico N° 2.5, se observa las curvas de rendimiento (n/n_{\max}), de la turbina de flujo cruzado de la casa Ossberger, para aperturas longitudinales del distribuidor de, 1/3, 2/3 y 3/3 o total, con caudales de ingreso al rodete expresados en porcentaje (Q%).

2.3. El Generador Síncrono.

El generador síncrono es aquel cuyo rotor gira a la misma velocidad mecánica que el campo magnético principal o fundamental del estator. El sincronismo entre los campos le da el nombre a este tipo de máquina rotativa.

El rotor inductor se encuentra alimentado por una fuente eléctrica de corriente directa, la cual produce un campo magnético constante que al cortar las bobinas del estator induce en él una fuerza electro-magnética (fem), " E_0 ", dicha tensión E_0 tendrá un desfase con respecto a la tensión "V" en bornes de la máquina. Si la fem está en adelanto, entre 0 y 90° con respecto a la tensión en bornes, dicha máquina es un generador, y si la fem está en atraso, será un motor. El circuito del rotor y estator se aprecia con la figura N° 2.6.

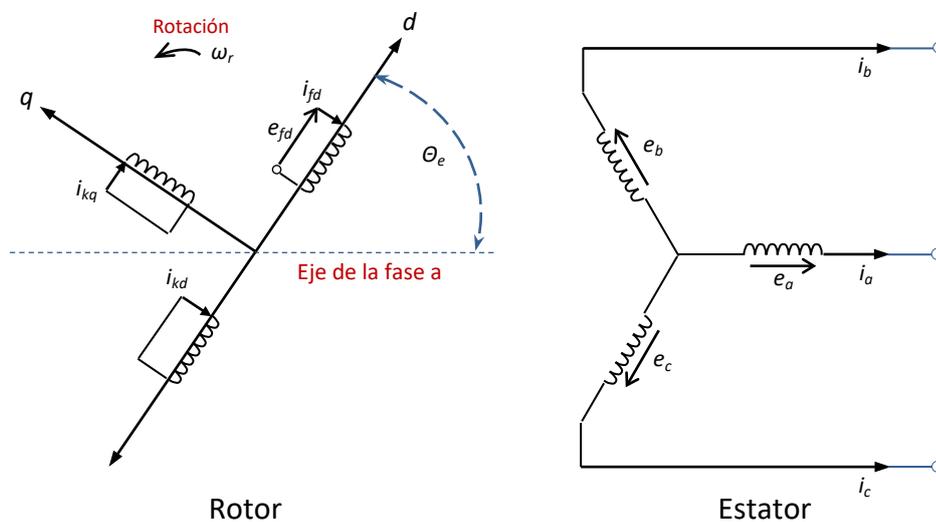


Figura N° 2.6: Circuito trifásico equivalente del rotor y estator del alternador.
Fuente: Rosales, J. - Determinación de parámetros del regulador de tensión, regulador de velocidad y PSS de unidades de la C.H. Carena.

Dónde:

- i_{kd}, i_{kq} : Corriente que pasa por el circuito amortiguador (ejes d y q).
- i_{fd} : Corriente que pasa por el devanado de campo.
- e_{fd} : Tensión inducida en el devanado de campo.

- i_a, i_b, i_c : Corriente que pasa por los enrollados del estator (fases).
- e_a, e_b, e_c : Tensión inducida en los enrollados del estator (fases).
- ω_r : Velocidad angular a la que gira el rotor.
- θ_e : Ángulo del eje d, con el eje magnético de la fase a.

Cuando la maquina actúa como generador, el rotor gira a velocidad ω_r , induciendo un flujo magnético en el núcleo del sistema Rotor - Estator; como consecuencia de esto, se induce en los devanados del estator una diferencia de tensión (según la ley de Faraday, $e = d\lambda/dt$).

En el generador, el desfase entre la fem “ E_0 ” y la tensión “ V ”, se debe al par o torque proporcionado por el primomotor o turbina hidráulica. El campo magnético del rotor en una máquina síncrona, se alimenta de una fuente de corriente directa o de excitación, en las siguientes formas:

- Un generador de corriente directa acoplado al eje del generador principal.
- Un generador de excitación independiente movido por otra máquina.
- Autoexcitado, rectifica parte de la corriente alterna en bornes de la máquina y la inyecta al rotor como corriente directa a través de anillos rozantes.

En todo generador síncrono de corriente alterna, desde el punto de vista de la *Teoría Control*, las variables de entrada (o de control) como la corriente de excitación “ I_{exc} ”, en DC, y el torque motriz “ T_{motriz} ”, afectan a las variables de salida, como la potencia activa P , y la reactiva Q , y están en estrecha relación con las otras variables de salida como la tensión V , y la frecuencia f , y se muestra en el esquema de la figura N° 2.7.



Figura N° 2.7: Variables de control y de salida en el generador síncrono.
Fuente: Elaboración propia.

El balance de la potencia activa P , se logra actuando sobre el torque motriz T_{motriz} , este balance permite que el sistema trabaje a una frecuencia f , constante. El balance de la

potencia reactiva Q , se logra actuando sobre la corriente de excitación $I_{exc.}$, este balance permite que el sistema tenga una tensión constante.

2.3.1. Componentes del Generador.

Los generadores síncronos están compuestos por una parte fija llamada estator y una parte móvil llamada rotor, ambos tienen un cuerpo metálico, un núcleo magnético y los devanados o bobinas. Un devanado móvil, es el que gira solidario a un eje denominado devanado de campo o de rotor, y un devanado fijo ubicado en el estator, denominado devanado de armadura o estator. El enrollado de campo es alimentado con corriente continua, desde la excitatriz.

El rotor de la máquina síncrona constructivamente puede ser de dos tipos: cilíndrico o de polos salientes. El rotor cilíndrico es de reducido número de polos (2 ó 4), y es de elevadas velocidades (1800, 3600 rpm). El rotor de polos salientes se caracteriza por un elevado número de polos, y bajas velocidades (60 a 1200 rpm), y son usados para generación hidráulica, suelen ser de eje vertical en grandes generadores.

Constructivamente el estator de una máquina síncrona se puede diferenciar dependiendo de la utilización y de las medidas del equipo. En una máquina de muchos polos y de gran potencia, el diámetro interno del estator es superior a 900 mm. , y se divide en varios segmentos para facilidad de su transporte y montaje, los que forman un cilindro que es el núcleo del estator.

2.3.2. Excitación del Generador.

La forma más usual de excitar al generador síncrono es electromagnéticamente o autoexcitado, es decir en los polos del rotor se ubica la bobina de excitación. Cuando circula por ella una corriente continua surgen unas líneas de fuerza magnética, las cuales en el circuito magnético inducen un campo también magnético. La potencia utilizada para la excitación del generador, representa entre 0.5% y 1% de la potencia útil del mismo.

También se utiliza un generador especial de corriente continua para la excitación independiente, llamado excitatriz, la bobina de excitación de la cual se recibe la

alimentación de corriente continua del generador (excitación en paralelo), llamado excitatriz piloto.

El rotor de la máquina síncrona está acoplado al eje de la excitación y giran simultáneamente. En este caso la corriente que alimenta la bobina de excitación de la máquina síncrona se suministra a través de unos anillos rozantes y unas escobillas. Para la regulación de la corriente de excitación se tienen reóstatos de regulación, los cuales se conectan en el circuito de la excitatriz y del piloto.

2.3.3. Especificaciones del Generador.

Existen ciertos límites básicos en la velocidad y potencia que puede obtenerse de un generador sincrónico, los cuales suelen expresarse como especificaciones nominales de la máquina (datos de placa), el objetivo de las especificaciones nominales es el de evitar el deterioro prematuro del generador, ocasionado por la utilización incorrecta del mismo.

Todo generador tiene las especificaciones marcadas en una placa de características adherida a él. Las especificaciones nominales típicas de la máquina sincrónica son: voltaje, frecuencia, velocidad, potencia aparente (kVA), factor de potencia, corriente de campo y factor de servicio.

2.4. Regulación de Velocidad en Turbinas.

2.4.1. Conceptos Generales.

La regulación de velocidad en turbinas hidráulicas, es el proceso mediante el cual se mantiene constante una magnitud o condición definida, aunque varíen determinados factores, como la carga o demanda de energía solicitada al grupo o generador de tensión de línea.

El mecanismo de la regulación de velocidad de motores hidráulicos o turbinas, es el encargado de equilibrar el par motor en la turbina, y el par resistente en el generador, a fin de que, en régimen permanente la máquina gire a velocidad constante.

La magnitud que se regula es la velocidad o número de revoluciones por minuto a que ha de girar el rodete de la turbina, con el fin de que, por medio del eje, se transmita el giro uniforme que debe tener y mantenerse entre dicho rodete y el rotor del alternador. La falta de regulación de velocidad o un sistema inestable ocasiona daños al sistema de generación, con consecuencias negativas al grupo turbina - generador debido a la posibilidad de:

- **Embalamiento**, ocasiona mayor vibración mecánica y la posibilidad de ruptura del eje.
- **Parada repentina**, produce esfuerzos de torsión en el eje y la posible ruptura del mismo.

De producirse una variación en la demanda o carga solicitada al grupo, aumenta o disminuye el par resistente que actúa sobre la turbina, y esta tenderá a reducir o aumentar el número de revoluciones que tenga normalmente antes de la variación de carga, en tales condiciones la turbina es totalmente inestable, llegando inclusive a pararse al aumentar la carga o a embalsarse cuando ésta disminuye.

La velocidad con la que gira la turbina es conocida como velocidad de sincronismo, y esta depende fundamentalmente de la frecuencia con la que ha de ser suministrada la corriente eléctrica, en el Perú su valor es 60 Hz., y del número de pares de polos del rotor del generador, además intervienen otros factores como la altura o salto de agua, potencia y tensión generada.

Dada la importancia de la regulación de velocidad automática, entonces las centrales podrían clasificarse según este criterio, en:

- **Sin regulación** { *de forma manual.*
- **Con regulación** { *por control de carga.*
 { *por control de caudal.*

2.4.2. El Regulador de Velocidad Centrífugo.

El control automático en un proceso industrial, se inició con el regulador de velocidad centrífugo de James Watt, para el control de velocidad de una máquina a

vapor en el siglo XVIII, dicho regulador evoluciono con el tiempo, siendo la base para los posteriores reguladores mecánicos, hasta la aparición de la electrónica.

El regulador de Watt inventado en 1778, fue el primero y más sencillo; conocido también como de “Bolas Flotantes”, donde la separación de estas esferas está en función de la velocidad de rotación o fuerza centrífuga, que eleva o desplaza el soporte y luego la válvula. Cuanto mayor es el número de revoluciones de las dos esferas suspendidas, más elevada es la posición del soporte, y este movimiento vertical, arrastra el mecanismo que actúa sobre la apertura o cierre de la válvula, para equilibrar el trabajo motor y resistente; a este mecanismo de control, se le conoce también como *regulador centrífugo*, y se ilustra en la figura N° 2.8.

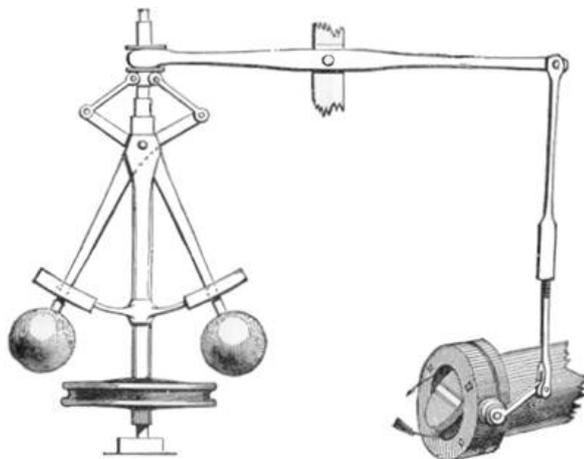


Figura N° 2.8: Regulador centrífugo de J. Watt, del siglo XVIII.
Recuperado de: <http://www.math.psu.edu/treluga/reu2015/python3.html>.

El actual regulador mecánico - hidráulico para turbinas, se basa en este tipo de dispositivo sensible, donde también dos pesos o esferas separadas 180 grados, se mueven radialmente alejándose del eje cuando su velocidad de rotación aumenta (un péndulo centrífugo), y así logran mover un manguito sobre un vástago central; el movimiento de este manguito se transmite, mediante un mecanismo de palanca a un pistón de una válvula piloto y mediante el cual se hace funcionar un servomotor.

El mecanismo de apertura o cierre de caudal a la turbina, demanda la actuación de fuerzas mayores a las obtenidas con solamente el “regulador centrífugo”, por ello se actúa sobre el dispositivo de distribución del servomotor, cuyo funcionamiento es por aceite a presión, suministrado por una bomba para aumentar la fuerza.

El vástago del émbolo del servomotor se acopla al mecanismo controlador de la turbina, de este modo se da la regulación, al abrir o cerrar la entrada de agua; si el regulador es únicamente mecánico, no requeriría de una fuente de electricidad. Un esquema del regulador de velocidad centrífugo, se muestra con la figura N° 2.9.

Referencia: Zoppetti G. - Centrales Hidroeléctricas.

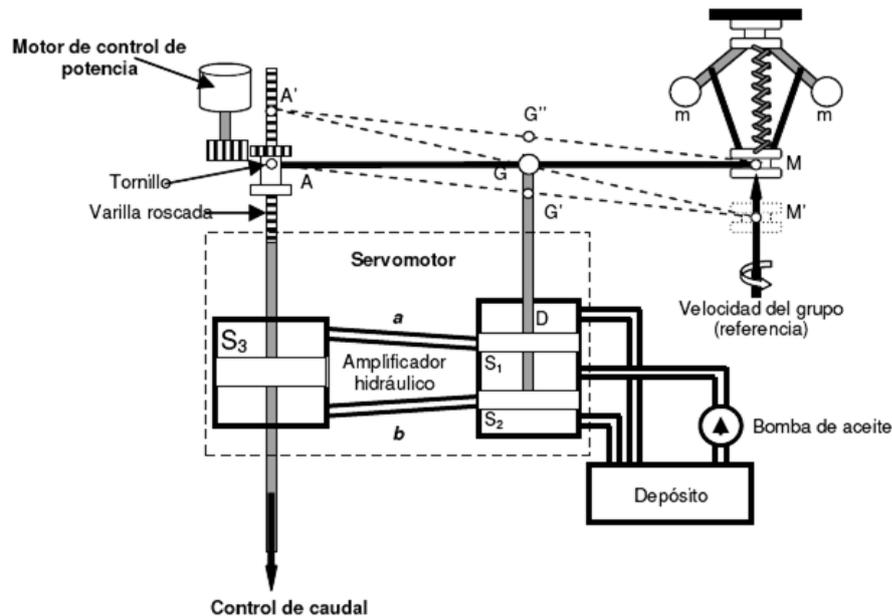


Figura N° 2.9: Esquema del regulador centrífugo de esferas gigantes.
Recuperado de: www.ib.cnea.gov.ar/nmayer/monografias/reguladordevelocidad.pdf.

2.5. Calidad de la Energía Generada.

“La calidad de la energía está relacionada con las perturbaciones que pueden afectar a las condiciones eléctricas de suministro y ocasionar el mal funcionamiento o daño de los equipos eléctricos de los usuarios...”

Referencia: Sobrevila, M. - Centrales eléctricas y estaciones transformadoras.

La calidad técnica de la energía, es el término utilizado para referirse al estándar de calidad que debe tener el suministro de corriente alterna en las instalaciones eléctricas, en términos de:

- Tensión o voltaje constante.
- Frecuencia constante.
- Forma de onda sinusoidal.

Las desviaciones respecto a los estándares ocasionan problemas en los equipos eléctricos.

Podemos decir que existe un problema de calidad de la energía eléctrica, cuando ocurre cualquier desviación de la tensión, la frecuencia o perturbaciones, que provoquen la mala operación de los equipos de uso final y deteriore la economía o el bienestar de los usuarios; y cuando ocurre alguna interrupción del flujo de energía eléctrica, nos referimos a la calidad del suministro eléctrico.

$$- \text{Calidad de la Energía} \left\{ \begin{array}{l} \text{Calidad del Producto} \left\{ \begin{array}{l} \text{Tensión} \\ \text{Frecuencia} \\ \text{Perturbaciones} \end{array} \right. \\ \text{Calidad del Suministro} \{ \text{Interrupciones} \end{array} \right.$$

Referencia: Campos, J. y Lora, E. - Calidad de la energía eléctrica.

La tensión y la frecuencia con la que se suministra la energía para uso doméstico, comercial y productivo de la electricidad en corriente alterna, son los parámetros de la calidad del producto. El excesivo apartamiento de los valores nominales para los que están diseñados los equipos eléctricos, tiene consecuencias como:

- Alteraciones en la función que prestan los artefactos o equipos, daños permanentes y alteración o reducción de la vida útil de los mismos.
- Tensiones elevadas que pueden dañar el aislamiento de los bobinados de los motores eléctricos y sacarlos de servicio.
- Tensiones muy bajas provocan sobrecalentamiento de los motores, con la consiguiente reducción de su vida útil.
- El mismo efecto de sobrecalentamiento de los motores se produce cuando hay un descenso marcado de la frecuencia, no ya por incrementos en la corriente activa, sino por aumento de la reactiva.
- La lámpara fluorescente no enciende cuando las tensiones caen por debajo del 15% de su valor nominal.
- En las lámparas incandescentes la sobretensión reduce la vida útil y la subtensión, reduce el nivel de iluminación.

En general el equipamiento eléctrico, es diseñado para funcionar adecuadamente dentro de rangos de variación de tensión y frecuencia asociados con los efectos descriptos de tales variaciones. Los estándares de calidad aceptados para pequeños sistemas eléctricos son:

- Tensión: +/- 8 a 10 % (del valor nominal).
- Frecuencia: 59 a 63 Hz. (para 60 hercios).

(Se aceptan incrementos hasta del 5%, pero se evitan frecuencias debajo de la nominal).

Referencia: Muguerza, D. - Micro centrales hidroeléctricas.

2.5.1. Cargas que Afectan la Calidad de la Energía.

Los equipos electrónicos modernos como computadoras, variadores de frecuencia, almacenadores de energía (UPS), balastos electrónicos, PLC's y otros, que utilizan dispositivos de electrónica de potencia como diodos, transistores y tiristores, que convierten la corriente alterna en corriente continua y trabajan en un modo de interrupción (a manera de pulsaciones o conmutación electrónica), y no tienen forma de onda de voltaje sinusoidal. Al resultar corrientes no sinusoidales se produce la distorsión armónica y consumos no lineales; así como en el arranque de motores se produce una variación transitoria de la frecuencia.

Los problemas que genera la mala calidad de la energía, son:

- Corrientes y tensiones armónicas.
- Fugas de corriente a la red de tierra.
- Variaciones de voltaje y frecuencia.

Los efectos asociados a problemas de calidad de la energía son:

- Incremento en las pérdidas de energía.
- Daños a la producción, economía y competitividad.
- Incremento del costo, deterioro de la confiabilidad y disponibilidad.

2.6. Regulación de Tensión y Frecuencia.

La tensión y la frecuencia están relacionadas con la velocidad de giro del generador síncrono. Se controla la frecuencia eléctrica variando la velocidad de rotación del eje

del grupo y la tensión inducida con la corriente de campo o excitación, a pesar de que no existe un desacople con el giro del rotor.

La mayoría de los dispositivos de consumo necesitan un voltaje y frecuencia constante, no pueden soportar grandes desviaciones de frecuencia y voltaje. La causa de las variaciones de tensión y frecuencia del sistema, es la variación de carga o demanda solicitada que debe alimentar el generador eléctrico.

En los grandes sistemas de potencia, las variaciones incrementales de carga son pequeñas y la corrección de los parámetros de tensión y frecuencia se realiza con un gran número de unidades de generación y con un conjunto adicional de recursos operativos.

En los pequeños sistemas de potencia, las variaciones incrementales de carga pueden ser muy grandes. Un artefacto o equipo de 1,000 W. que se conecta a la red que opera en ese momento con una carga de 10 kW, provocara un incremento de carga del 10 %. Es decir, conexiones de cargas significativas tenderán a *frenar* el sistema, reduciendo tensión y frecuencia; y desconexiones de carga significativas tenderán a *embalar* el sistema aumentando tensión y frecuencia.

La expresión N° 2.7, relaciona la frecuencia, el flujo magnético y el número de espiras de los devanados, con la tensión cuadrática media del generador.

Referencia: Biella, D. - *Maquinas Eléctricas II*.

$$E = \sqrt{2} \pi \cdot f \cdot N' \cdot \phi \quad \dots (2.7)$$

Considerando factores de paso y distribución en la igualdad, se tiene la relación N° 2.8.

$$E = 4.44 f \cdot N' \cdot \phi \cdot K_p \cdot K_d \dots (2.8)$$

Dónde:

E = tensión generada por fase, (voltios).

f = frecuencia de generación, (hercios).

N' = número de espiras conectadas en serie por fase.

Φ = líneas de flujo magnético por polo, (webers).

K_p = factor de paso, es adimensional.

K_d = factor de distribución, es adimensional.

2.6.1. Como Mantener los Parámetros Eléctricos.

Existen dos formas básicas para mantener los parámetros eléctricos de tensión y frecuencia del sistema de generación dentro de un rango admisible de calidad.

- **Primer Sistema.**- Consiste en mantener la carga constante, un sensor electrónico detecta el aumento de frecuencia y un dispositivo conocido como controlador de carga, procede a disipar el exceso de potencia eléctrica en un banco de resistencias, durante todo el tiempo o en escalones de carga durante períodos. De este modo, si el generador tiene una carga constante no se producirá variación de tensión y frecuencia. Este sistema se denomina de **Regulación por Carga**.
- **Segundo Sistema.**- Como la carga que recibe el generador es variable, entonces la turbina debe suministrar una potencia mecánica variable al generador para compensar su velocidad de sincronismo. Esto se obtiene cambiando el ángulo de apertura del alabe directriz, y regular el caudal de agua que ingresa al rodete de la turbina, de este modo, si se la velocidad es constante no se producirá variación de frecuencia y tensión. Este sistema se denomina de **Regulación por Caudal**.

Los sistemas que trabajan con regulación por caudal se construyen para toda la gama de potencias. Inicialmente fueron concebidos para grandes turbinas, pero luego rediseñados para turbinas medianas y pequeñas. Los que trabajan con sistemas de regulación por carga, raramente sobrepasan el valor de 100 kW. La adopción de uno de ellos o ambos métodos de regulación, depende de la abundancia o escasez del recurso hídrico y la curva de carga del sistema.

Si el recurso hídrico es escaso es conveniente regular por caudal, para hacer óptimo el aprovechamiento del mismo. Si el recurso hídrico es abundante pero la curva de carga tiene comportamiento volátil y factor de carga muy bajo, también resultará conveniente adoptar la regulación por caudal.

Si, en cambio, el recurso hídrico es abundante, puede incrementarse el factor de carga mediante usos alternativos de la electricidad, o bien ordenar los usos eléctricos en

escalones de la curva de carga, entonces la regulación por carga resultará más conveniente. *Referencia: Muguerza, D. - Micro centrales hidroeléctricas.*

2.7. Principio de Funcionamiento del Regulador de Velocidad.

En el control de velocidad se mantienen ciertos parámetros como, velocidad, caudal, posición, voltaje y frecuencia, dentro de un rango de funcionamiento preestablecido y de acuerdo a las conveniencias operativas del sistema. La frecuencia del sistema de potencia depende del balance de la potencia activa, y los cambios en la frecuencia ocurren porque varía aleatoriamente la carga o demanda local a lo largo del día.

Un sistema de control asociado a la unidad generadora es la regulación de velocidad, que permite mantener constante la velocidad en la máquina. En un conjunto turbina-generador, el regulador recibe información de frecuencia o velocidad, los cuales provienen del sistema de potencia, donde se compara con valores de referencia. Si estas comparaciones son cero, es indicativo que el regulador no debe realizar cambios en las condiciones de operación, dado que la máquina está en la velocidad deseada.

De ser diferentes estas señales y detectar cualquier variación con respecto al valor de referencia, se genera un error, el mismo que es captado por un sensor mecánico o electrónico, un dispositivo amplifica la señal transmitida por el sensor a el controlador para que a través del servomotor accione el mecanismo que regula el paso del agua, modificando el ángulo de alabe del distribuidor o paletas de la turbina, corrigiendo así cualquier desviación de la velocidad, al incrementarse o decrementarse la potencia mecánica de la unidad.

Al aumentar la carga o demanda, se abre la compuerta del distribuidor y pasa mas agua, y por ende mayor potencia hidráulica para que no disminuya su velocidad la turbina. Al disminuir la carga o demanda se cierra la compuerta del distribuidor, pasa menos agua y por ende menor potencia hidráulica, y no acelera su velocidad de la turbina.

El regulador indirectamente permite mantener la frecuencia constante y satisfacer la carga demandada al generador. La expresión matemática que relaciona la velocidad sincrónica con la frecuencia (ciclos por segundo), viene dada por la expresión N° 2.9.

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{P} \dots (2.9)$$

Dónde:

N_s : velocidad síncrona (r.p.m.).

f : frecuencia eléctrica (hercios).

P : número de polos del generador.

Al analizar esta expresión, se observa que al ser el número de polos un parámetro fijo, una vez que la máquina está construida, una velocidad constante implica una frecuencia constante, es decir controlando la velocidad se garantiza el control de la frecuencia o viceversa. De igual forma sucede con el control de carga, de ocurrir en el sistema eléctrico un incremento de la potencia eléctrica de carga, se tendrá momentáneamente una potencia eléctrica mayor a la potencia mecánica ($P_e > P_m$), provocando una potencia “desacelerante” que reducirá la velocidad en la máquina.

Esta variación en la velocidad será censada por el regulador, quien ordena un incremento en la apertura de la paleta o alabe directriz, para incrementar la potencia mecánica y de esta forma retornar la velocidad al valor de referencia; en el regulador mecánico, el péndulo centrífugo, es el dispositivo tacométrico que censa la velocidad ante un cambio de régimen. El equilibrio se alcanza, cuando la potencia mecánica y la eléctrica son iguales ($P_e = P_m$), teniendo el ajuste del par motor de la turbina, en función del par resistente del alternador, con lo cual se satisface la carga.

- El regulador de la turbina controla la velocidad en el eje, e intenta corregir cualquier desviación de la velocidad angular (ω_s), ajustando la posición de una válvula.
- Sin considerar la eficiencia hidráulica, la potencia de una turbina está en función del caudal (Q), y el salto neto (H_o), tal como se ve en la relación N° 2.10.

$$P = f(Q, H_o) \dots (2.10)$$

- La potencia mecánica necesaria para impulsar el alternador está en función al par (M) y al número de revoluciones (n), tal como se ve en la relación N° 2.10.

$$P = f(n, M) \dots (2.11)$$

- Si igualamos las dos expresiones anteriores, se tiene que el par (M), está en función de la siguiente relación matemática:

$$M = f\left(\frac{Q \cdot H_0}{n}\right) \dots (2.12)$$

- Para variar el par de impulsión (M), sin variar la velocidad de rotación (n) y la altura neta (H₀), se deberá modificar el caudal (Q) que ingresa a la turbina, lo que se consigue accionando manual o automáticamente la válvula de sección variable.

Los reguladores de velocidad deben cumplir con dos propósitos principales:

- [1] Mantener la velocidad de rotación estable y constante de la unidad turbina y generador, para cualquier cambio de carga en la red eléctrica, manteniendo fija las condiciones de conducción del agua.
- [2] Para rechazos de carga o paradas de emergencia, la turbina debe cerrar la válvula de admisión, según los límites de velocidad rotacional de la unidad y aumento de presión en la conducción del agua.

Las alteraciones de carga en la red eléctrica, causan desviaciones entre la potencia de salida de la turbina y la carga. Para una disminución de carga, el exceso de potencia acelera las masas rotativas de la unidad, según los límites de velocidad máxima giratoria. Para conservar el aumento de velocidad por debajo de los límites de rechazos de carga, la tasa del *Admisión - Cierre*, debe ser igual o mayor que un cierto valor. Para el aumento de presión en la conducción del agua la condición es inversa, porque la tasa *Admisión - Cierre* debe ser igual o menor que cierto valor, para conservar el aumento de presión tan bajo como sea posible, es decir, que se mantenga en límites aceptables.

Para centrales eléctricas donde estas dos demandas no se cumplen por un sólo control, los reguladores de velocidad son provistos de funciones con *doble control*, uno para controlar el aumento de velocidad giratoria y el otro para controlar el aumento de la presión del agua en la tubería.

Por ejemplo, esto es normal para reguladores de turbinas Pelton y Francis, cuando tienen una alta caída de agua.

El regulador de velocidad, conocido también como gobernador, al igual que los diferentes sistemas de control ha tenido cambios tecnológicos que han optimizado su comportamiento, llegando a ser extremadamente sensibles y detectar cambios de velocidad de hasta 0.02% en el generador. Los primeros reguladores eran enteramente mecánicos, evolucionando luego a los eléctricos y electrónicos, hasta alcanzar los numéricos o digitales.

2.8. Estructura del Sistema de Regulación

La estructura de todo sistema regulador de velocidad, consta de un mecanismo que tiene como función detectar las variaciones tanto de frecuencia como de potencia en la unidad, de forma tal de originar una señal de corrección, la cual es enviada a un accionador para corregir la desviación, el conjunto regulador-accionador es llamado unidad controladora o controlador, ya que allí se efectúa el proceso de control y pueden ser de tipo mecánico-hidráulico o eléctrico-hidráulico.

El accionador está constituido por equipos hidráulicos que se encargan de mover otro elemento importante llamado servomotor, el cual amplifica los cambios de admisión determinados por el controlador, para así graduar la posición de la paleta o alabe en el distribuidor de la turbina, además, se cuenta con un sistema de suministro de aceite a presión, para hacer funcionar el servomotor. Las diferencias entre los sistemas, se encuentran a nivel del controlador de velocidad, su diagrama está en la figura N° 2.10.

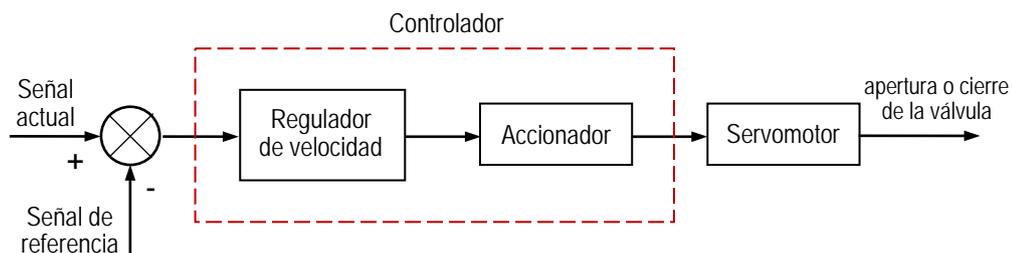


Figura N° 2.10: Diagrama general de las partes de un sistema de regulación.

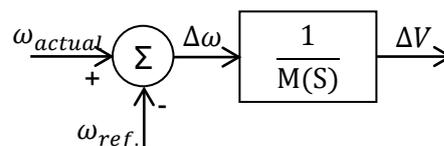


Figura N° 2.11: Diagrama y función de transferencia del sistema de regulación.

teniendo el par $M = 2H$, y siendo H la inercia del sistema.

Dónde:

s = constante de Laplace.

ΔV = posición de la válvula o compuerta.

ω_{ref} = referencia de apertura de la válvula.

$\Delta\omega$ = velocidad angular resultante.

Dado que el sistema de regulación es de un aspecto central en el presente estudio, el mismo es analizado más detalladamente en el Capítulo III.

2.9. Formas de Regular la Velocidad

Se conocen tres formas generales de regular la velocidad de rotación en cualquier turbina hidráulica, y como consecuencia la frecuencia del generador, estas son:

2.9.1. Regulación por Caudal.

El objetivo esencial del sistema de regulación de velocidad por caudal, es poder actuar sobre la posición de los órganos que controlan y dirigen la admisión del agua a la turbina (por el distribuidor o inyector). Para esto, el sistema debe contar con una medición de la velocidad de rotación, retroalimentación de la caída de velocidad y funciones de ajuste y control; el esquema básico del regulador por caudal se puede ver en la figura N° 2.12.

En los reguladores dinámicos, por control de caudal de ingreso a la turbina, desde el enfoque constructivo sus sistemas pueden ser de tipo:

- [1] Mecánico - hidráulicos.
- [2] Electro - hidráulicos.
- [3] Electrónico - analógicos.
- [4] Electrónico - digitales.

Esta clasificación toma como referencia la de Suescún, I.

La grafica N° 2.12, nos muestra la composición del sistema de regulación de velocidad.

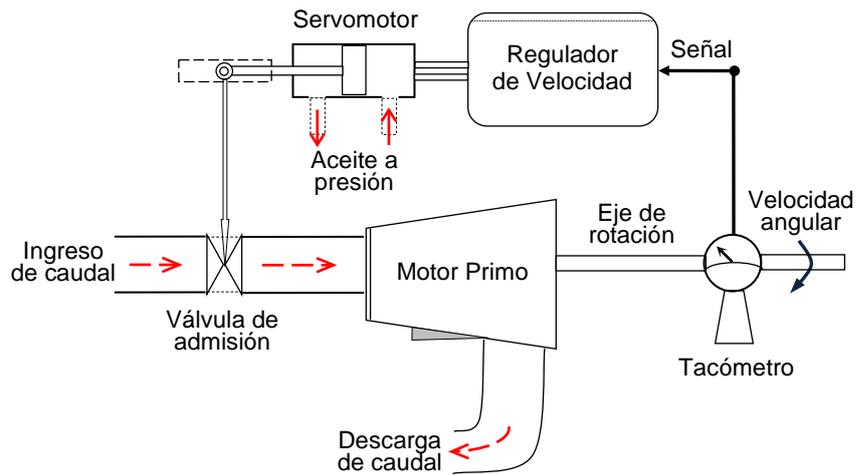


Figura N° 2.12: Componentes del sistema con regulación por caudal.
Fuente: elaboración propia.

Este ordenamiento responde a un desarrollo tecnológico el cual se han ido perfeccionando progresivamente a través del tiempo, como resultado de las experiencias y estudios llevados a cabo ante las exigencias técnicas actuales. Separando entre uno y otro sistema de regulación varias décadas de avance tecnológico, y lográndose con esto una mayor precisión, sofisticación y seguridad en el control de la velocidad de la turbina.

Las características a las que deben adecuarse un regulador de tensión y frecuencia, actuando en un pequeño sistema aislado de generación, como una mini central, son las siguientes:

- [1] Momento de inercia de la turbina y generador apreciable, respecto de la apertura del dispositivo de regulación y pequeño respecto de la variación de carga.
- [2] Generadores síncronos de baja potencia.
- [3] Ríos o arroyos con bajos caudales.
- [4] Aprovechamientos hidráulicos en zonas alejadas de las líneas de transmisión.
- [5] Operación por personal no calificado.

El Iro, determina que la velocidad del conjunto pueda variar muy rápidamente, ante alteraciones de la carga, lo que implica disponer de un regulador de frecuencia de elevada capacidad de respuesta, pero esto se contrapone con una respuesta lenta de la velocidad a la apertura o cierre del dispositivo de regulación de caudal, lo que provoca inestabilidad del sistema.

El 2do, determina que la inclusión de una carga pequeña en el sistema, significa un gran porcentaje de variación de la carga total, ya que los generadores poseen una potencia nominal pequeña, lo que produce grandes porcentajes de variación de frecuencia. Además, los generadores de menor potencia (< de 100 KVA), tienen el inconveniente de la carga que representa el sistema regulador, que es una parte considerable de su potencia.

El 3ro, obliga a disponer de un sistema de registro periódico del nivel de agua, que habilite o no a la central a generar.

El 4to, caracteriza al sistema por tener que regularse sin contar con la tensión y la frecuencia del sistema eléctrico nacional como referencia.

El 5to, obliga a disponer de controles lo más sencillos posibles, dado que el operador en general es un poblador rural no capacitado. El funcionamiento general, partiendo del sistema en reposo, es el siguiente:

- Si hay suficiente agua en el embalse, el detector de fin de carrera de cierre se encuentra accionado. Cuando el usuario de la orden de marcha, la unidad de control ordena a un pequeño motor de D.C. la apertura del dispositivo de regulación de caudal, a través del regulador de frecuencia.
- El álabe se abre hasta que la tensión generada entra en el rango propio de regulación, momento en el que el motor de corriente continua, pasa a ser regulador de frecuencia en forma lineal.
- El sistema permanece en ese estado, auto regulándose hasta que alguna de las señales de entrada a la unidad cambie de estado. Este cambio puede ocurrir por lo siguiente:
 - [5] Orden del usuario de parada.
 - [6] Falta de agua en la cámara.
 - [7] Falta de tensión generada.
 - [8] Sobre velocidad del grupo.
 - [9] Indicación de fin de carrera.

Referencia: Muguerra, D. - Microcentrales hidroeléctricas.

Se describe seguidamente la operación del regulador de velocidad por variación de caudal, mediante el diagrama de bloques y símbolos mostrados en la figura N° 2.13.

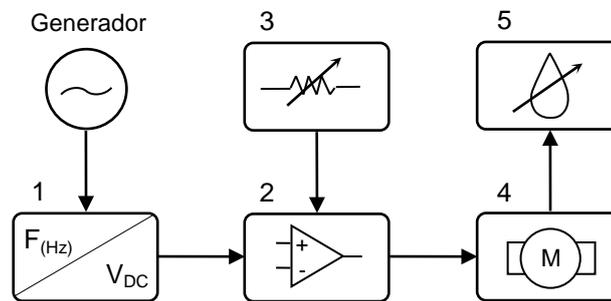


Figura N° 2.13: Diagrama de bloques de la regulación por caudal.
Fuente: Revista Hidrored, febrero 2009.

Del diagrama anterior, cada bloque cumple la siguiente función:

- [1] Conversor frecuencia - tensión.
- [2] Circuito comparador.
- [3] Valor de referencia.
- [4] Servomotor de regulación.
- [5] Órgano regulador de caudal.

Referencia: Revista Hidrored, febrero 2009.

El sistema el control de la frecuencia es a través de un servomecanismo que actúa sobre el órgano regulador de caudal, modificando la cantidad de agua turbinada. En el control es inevitable que queden pequeños errores de frecuencia en operación en régimen permanente.

2.9.2. Regulación por Carga.

En la regulación de velocidad por carga, el generador eléctrico logrará tener siempre una carga constante o bien escalones de carga que permita un ajuste manual de la turbina, utilizando para esto un Regulador Electrónico de Carga (REC). El cual ajusta continuamente la carga demandada al alternador mediante un sensor de frecuencia, para así mantener una frecuencia eléctrica constante. La regulación por carga es una opción más sencilla, pues carece de elementos actuadores sobre el sistema de generación.

El balance de carga se logra dividiendo la carga en dos denominaciones, carga principal y carga secundaria.

- Carga principal: es la energía consumida por la demanda domiciliaria, comercial, industrial y alumbrado público.
- Carga secundaria: es la energía no consumida, que es desviada a resistencias eléctricas disipadas en aire o agua.

2.9.2.1. *La Carga Constante.*

Se logra mediante un sistema regulador por disipación de carga, o simplemente regulador estático y consiste en instalar un conjunto de cargas de compensación (hasta el 40% de la potencia del generador), que constan de un banco de resistencias de inmersión conectadas en paralelo acondicionarse dentro de un tanque. El elemento resistivo puede ser alambre micrón y estar aislado eléctricamente por las paredes de un tubo de bronce que contenga cemento o polvo de magnesio y con soportes de cerámica (blindado), para poder sumergirlo en el tanque de concreto con agua fluyente, permitiendo así disipar el calor generado, lo que se puede obtener sacando una derivación de la tubería de presión.

El depósito de agua generalmente esta hecho de plancha de acero con estructura metálica o de concreto armado, pero puede utilizarse cualquier otro material que resulte conveniente para este propósito. La resistencia de inmersión se ve en la figura N° 2.14.

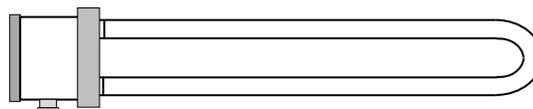


Figura N° 2.14: Resistencia eléctrica blindada del regulador por carga.
Fuente. Elaboración propia.

2.9.2.2. *Funcionamiento.*

El banco de resistencias del regulador de carga está conectado a la línea de salida del generador y se enciende escalonadamente ante un cambio brusco en la demanda del sistema mediante relés de estado sólido o electroválvulas, controladas por la “unidad de control”, para accionar la carga secundaria compuesta por resistencias. Compensando este cambio en forma aproximada para mantener constante la potencia consumida, y luego lentamente vuelven al estado inicial, permitiendo al Regulador de Frecuencia ir acomodándose sin que haya desplazamientos grandes en la velocidad del generador.

Este consumo de carga del alternador se hace fase por fase, para asegurar el balance de las mismas y tener una compensación automática en caso de desbalances, la gráfica N° 2.15, nos muestra el tanque de inmersión; las ventajas de este tipo de reguladores son:

- Simplificación del diseño de la turbina al no necesitar regular el caudal.
- Operación y procesos de mantenimiento más sencillos.
- Se elimina la presencia de sobrepresiones en la tubería de presión.
- Mayor rapidez en la respuesta ante cambios de carga.

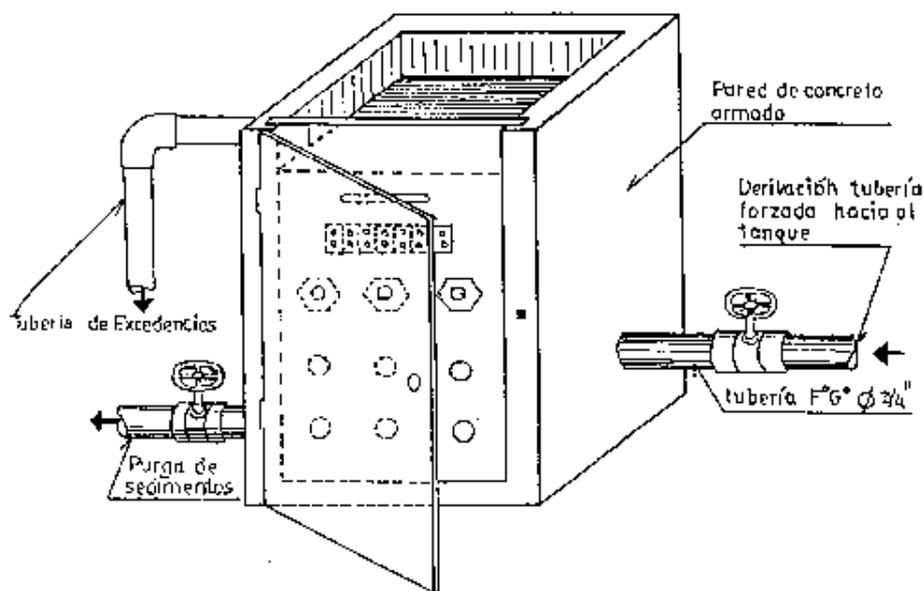


Figura N° 2.15: Tanque con resistencias de inmersión en agua del regulador.
Fuente: Álvarez, G. - Estudio de reguladores de carga en P.C.H.

Esta compensación puede ser reemplazada por otro sistema que incorpora cargas en función del desplazamiento de frecuencia que sufre el generador. Para mantener la carga demandada constante se incorporan al sistema usos alternativos de la electricidad o bien se dispensa los excedentes de potencia no utilizados en cargas balastro resistivas.

Los usos alternativos pueden tenerse tanto en la red de distribución como en la misma casa de máquinas, estos permiten un aprovechamiento más eficiente de la energía que disipar calor para mantener la carga constante. Sistemas más sofisticados se usan con circuitos alternativos en las viviendas, uno destinado al calentamiento de agua o cocinas eléctricas de acumulación que funcionan durante el día, y otro circuito cuya potencia sea

de la misma magnitud y que corresponda a la carga de iluminación que se usa durante la noche, de manera que la demanda de los usuarios siempre será una carga constante.

Cuando se regula la carga o demanda en la casa de máquinas, pueden utilizarse distintas opciones útiles como:

- Se puede instalar un banco de baterías adecuadamente dimensionado para que absorba los excedentes de energía; cargándose durante las horas de baja demanda y mediante un inversor inyectar energía a la red durante las horas de mayor demanda.
- Se dispone del recurso de disipar el calor con las resistencias refrigeradas en agua, cuyo diseño debe contemplar un conjunto escalonado de valores crecientes de capacidad, de manera de obtener por combinación el ajuste de carga deseado.

La energía no consumida se disipa en forma de calor, en las resistencias denominadas comúnmente resistencias balastro (carga lastre), instaladas apropiadamente como se indicó en la casa de máquinas, y su esquema básico se muestra con el gráfico N° 2.16.

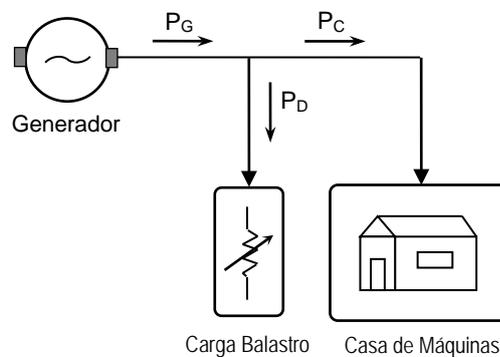


Figura N° 2.16: Diagrama de bloques de regulación por carga balastro.
Fuente: Revista Hidrored, febrero 2009.

y se obtiene la expresión siguiente

$$P_G = P_D + P_C \dots (2.13)$$

Dónde:

P_G : Potencia generada.

P_D : Potencia disipada, en carga balastro.

P_C : Potencia consumida, por usuarios.

El sistema de control por carga balastro o ficticia, al mantener constante la potencia generada, conlleva a que la central estaría operando todo el tiempo a su máximo rendimiento (plena carga), lo cual no es conveniente para la durabilidad y seguridad de los equipos hidroeléctricos.

2.9.3. Regulación Mixta.

Es poco frecuente encontrar un sistema de regulación de velocidad mixta, caudal y carga en centrales o plantas hidráulicas, debido a su mayor complejidad y costo, además el generador debe trabajar a plena carga en todo momento, disminuyendo su vida útil; Este sistema combina la acción del control de caudal con el control de carga constante. La primera regulación o regulación gruesa se hace a través del caudal de agua que ingresa a la turbina, para mantener su velocidad cercana a su valor nominal, y luego la regulación fina o segunda se hace por resistencias que disipan calor y así mantienen constante parte de la carga demandada, de manera que el servomecanismo del órgano regulador de caudal pueda trabajar a una velocidad baja; logrando entre ambas regulaciones el valor de la frecuencia requerido.

El grafico N° 2.17, presenta el diagrama de bloques y símbolos, que describen la secuencia de operación del sistema mixto de regulación de velocidad, Caudal - Carga.

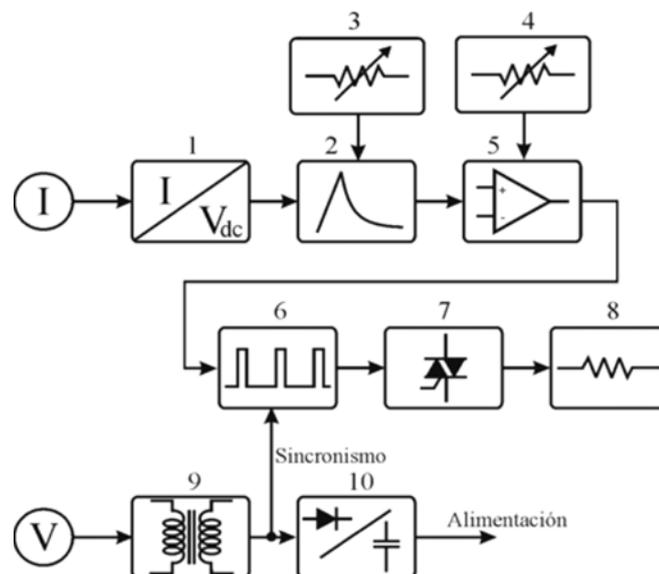


Figura N° 2.17: Diagrama de bloques del sistema mixto de regulación.
Fuente: Kurtz, V. - Sistema mixto para el control de la generación en M.C.H.

Del diagrama mostrado anteriormente, cada bloque cumple la siguiente función:

- [1] Conversor de corriente alterna en tensión continua.
- [2] Red diferenciadora (tiempo de extinción).
- [3] Ajuste del tiempo de extinción.
- [4] Ajuste del valor de consigna, circuito procesador de señal.
- [5] Generador de disparo sincronizado del tiristor de comando.
- [6] Tiristor de comando de la carga balasto.
- [7] Resistor disipador de energía.
- [8] Resistencia Shunt (carga).
- [9] Fuente de alimentación.
- [10] Transformador de alimentación y sincronismo.

2.9.3.1. Funcionamiento.

El sistema de regulación mixto caudal y carga, es de tipo electrónico, y esta comandado por medio de un microprocesador que controla las variaciones de potencia, haciendo uso de cinco relés, los cuales interactúan entre sí para ordenar el accionamiento de transferencia de carga hacia un banco de resistencias, o para ordenar el control de caudal mediante el accionamiento oleo-mecánico del alabe directriz, inyector o compuerta de la turbina hidráulica, tratando de mantener siempre la estabilidad del sistema y el nivel constante de la frecuencia, las órdenes se controlan a través de circuitos electrónicos separados.

Al combinarse la acción del sistema de control de caudal con el control de carga, el servomecanismo de accionamiento mecánico del alabe regulador de caudal trabaja a una velocidad más baja. El hecho que la velocidad pueda ser más baja, simplifica el circuito del control y el del propio servomecanismo.

Referencia: Kurtz, V. - Sistema mixto para el control de la generación en centrales.

2.9.3.2. Descripción y Características.

El proceso de control en este regulador mixto se realiza de la forma siguiente:

- Mediante la transferencia automática de las variaciones de carga, hacia una carga secundaria compuesta por paquetes de resistencias de inmersión en agua o ventiladas con aire, de distintas configuraciones y que no pasen los 60 kW.

- Mediante la regulación de la posición del alabe directriz de la turbina, de tal manera que permita el paso de caudal de acuerdo a la potencia requerida por los usuarios en cualquier instante.
- El grado de sensibilidad del equipo es ajustable dentro de un rango de ± 0.5 , ± 2 ó ± 4 Hz.
- Respuesta a la aplicación o retiro del 100% de la carga (desviación transitoria de la frecuencia menos de 0.25 segundos).
- Estatismo, de 0% a 3% (regulación digital).
- Temperatura máxima de operación, 55 °C.
- El alternador a utilizar, debe trabajar con voltajes entre 200 y 400 V y frecuencias entre 55 y 65 Hz.
- Tipo de demanda, indistinta (capacitiva, inductiva o resistiva).
- Factor de potencia de la demanda, mayor de 0.7.

Seguidamente, el cuadro N° 2.3, nos muestra un comparativo de la regulación de velocidad, por control de caudal y por carga constante; para el sistema manual y el sistema automático de control.

Cuadro N° 2.3: *Comparativo de regulación de velocidad por caudal y carga.*

	REG. POR CAUDAL		REG. POR CARGA	
	Manual	Automático	Manual	Automático
Costo inicial	muy bajo	alto	Bajo	medio
Precisión en la regulación de frecuencia	depende del operador	alto	depende del operador	muy alto
Dificultad de instalación	no hay	medio	baja	baja
Dificultad de operación y mantenimiento	muy baja	baja	muy baja	baja
Requiere vigilancia del operador	si	no	si	no

Fuente: ITDG - Manual de mini y micro centrales hidroeléctricas.

En el Anexo A, se da la definición de los términos principales utilizados en la tesis.

CAPITULO III

3.1. Reguladores de Velocidad de Turbinas.

3.1.1. Introducción.

En este capítulo se presenta una descripción detallada de los reguladores de velocidad para turbinas hidráulicas, que contiene características, cualidades, esquemas, diagramas de bloque, y funciones de transferencia de los diferentes tipos o tecnologías de regulación de velocidad por caudal y carga que están disponibles actualmente en el mercado, pudiéndose elegir cualquiera de ellos como alternativa para automatizar la central de Coline.

3.2. Clasificación de los Reguladores.

En los sistemas que emplean la regulación de caudal o carga para controlar la velocidad y potencia de la turbina, se puede encontrar componentes de tipo eléctricos, electrónicos, mecánicos, hidráulicos o neumáticos y sus combinaciones, de ahí deriva su nombre; dependiendo de la exactitud, rapidez y estabilidad del control deseado será la complejidad del sistema de regulación, *por ejemplo*, en el caso de un regulador Mecánico-Hidráulico, el sistema lo componen una combinación de transmisiones hidráulicas y mecánicas que en conjunto cumplen con el trabajo de regulación. Respecto a los distintos sistemas de regulación, solo se puede determinar un modelo básico, a partir del cual cada fabricante realiza variaciones.

Referencia: Suescún, I. - Centrales hidráulicas y reguladores de velocidad.

La clasificación más usual de los reguladores de velocidad está en función a las características de sus componentes constructivos principales, en virtud a esto se establece cuatro tipos de reguladores, desde los enteramente mecánicos, los que tienen componentes eléctricos, los electrónicos analógicos desarrollados en la década del sesenta, hasta los electrónicos digitales que aparecen a finales de los años ochenta. Se puede establecer también otras clasificaciones, como, por la manera de operar el dispositivo tacométrico, en reguladores centrífugos y eléctricos, o por la forma de actuar de la señal de control, en reguladores de acción directa e indirecta.

Seguidamente se describe el equipo físico regulador de velocidad, clasificado en función de los sistemas que lo componen.

3.2.1. Regulador Mecánico - Hidráulico.

Llamado también Oleomecánico, en este mecanismo la función de regulación de velocidad, es realizada con una señal de control de posición, que es proporcional al error de velocidad. Las señales para la estabilización y compensaciones auxiliares son desarrolladas mecánicamente para luego ser amplificadas hidráulicamente.

La regulación de velocidad se hace a través de componentes mecánicos, el proceso comienza con un dispositivo sensible a la velocidad o detector de velocidad, el cual es un péndulo centrífugo compuesto de dos esferas girando a velocidad proporcional al eje de la turbina, así cuando la máquina experimente una aceleración o desaceleración, las esferas se alejarán o acercarán por efecto de la fuerza centrífuga, atenuando su movimiento por la acción de un resorte que las une.

Este movimiento giratorio desplaza un collarín en el eje del péndulo, que a su vez mueve unas varillas que regulan la acción de comando, actuando sobre una válvula piloto que controla a otra válvula mayor, con un movimiento de arriba a abajo, que permite el paso en uno u otro sentido de aceite a presión desde el tanque acumulador hacia los servomotores; esta válvula a su vez es operada por un sensor de velocidad, que por efecto de la diferencia de presiones moverá un elemento de potencia que es un mecanismo en forma de pistón, que transmitirá un movimiento lineal para accionar el gato hidráulico que cambia la posición del alabe regulador, cerrándolo o abriéndolo en el distribuidor de la turbina, finalmente hay un dispositivo compensador que impide las oscilaciones producidas por efecto de la propia inercia de las masas giratorias.

El tiempo requerido para un desplazamiento completo de las válvulas es dependiente del flujo de aceite a los servomotores, generalmente los reguladores tienen dispositivos para manejar este tiempo. Se le conoce también a este regulador como astático (velocidad constante independiente de la carga), o isócrono (igual recorrido a intervalos de similar duración), por la característica del servo de doble acción.

Si el movimiento lineal es realimentado hacia la entrada entonces el regulador es de efecto estático o con estatismo, este mecanismo permite transmitir la acción de corrección producida por el servomotor hacia el elemento detector de velocidad alterando el desplazamiento de éste, con lo cual se crea una diferencia de desviación de velocidad real y la desviación de velocidad medida. El resultado de esta alteración es que la máquina corregirá en función de la desviación de velocidad medida, que al ser diferente de la desviación real impedirá que la máquina retorne a su velocidad de referencia ante la ocurrencia de un desbalance generación - carga, es decir, de producirse un rechazo de generación que produzca una reducción de frecuencia, el regulador recuperará la misma a un valor ligeramente por debajo de 60 Hz, de igual forma de producirse un rechazo de carga que produzca un ascenso de frecuencia, el regulador recuperará la misma a un valor ligeramente por encima de 60 Hz, siendo un regulador que mantiene estable la frecuencia o número de revoluciones por unidad de tiempo del grupo, sea cualquiera el valor de la carga solicitada.

El tiempo muerto de este regulador, es decir el tiempo que transcurre desde que se produce un cambio de velocidad, hasta que se produce el primer movimiento de la compuerta, normalmente es menor que 2 segundos. El regulador mecánico - hidráulico se encuentra por lo general en centrales con más de 20 años de antigüedad, pero es a partir de su funcionamiento, estructura y los cambios introducidos para mejorar su estabilidad, que nacen las demás tecnologías o tipos de reguladores. A continuación, el esquema de las partes de un regulador oleomecánico clásico se da con la figura N° 3.1

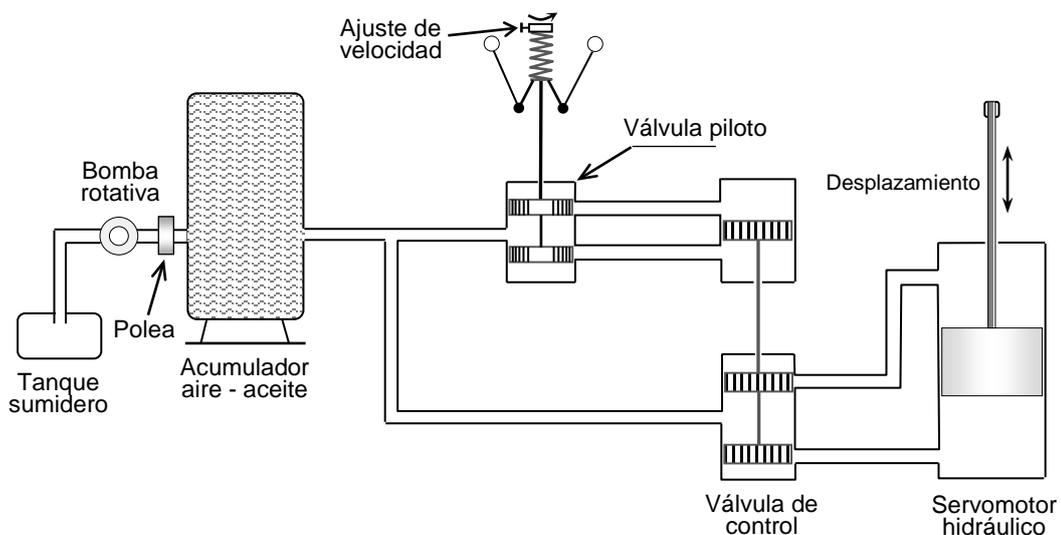


Figura N° 3.1: Esquema del regulador de velocidad Mecánico Hidráulico.

Fuente: Suescún, I.- Centrales hidráulicas y reguladores de velocidad.

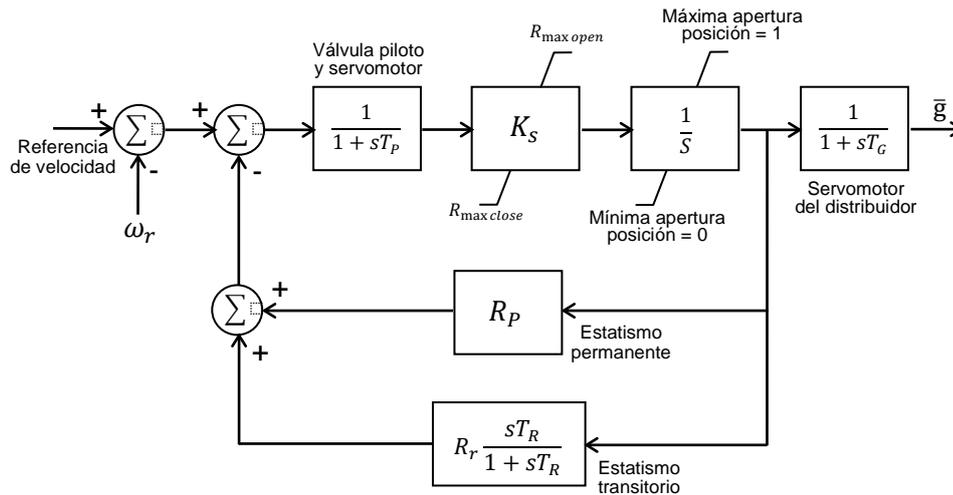


Figura N° 3.2: Diagrama de bloques del regulador Mecánico Hidráulico.
Fuente: Kundur, P. - Estabilidad de sistemas eléctricos de potencia.

Parámetros:

T_p : constante de tiempo de la válvula piloto.

T_g : constante de tiempo del servomotor.

K_s : ganancia del servo.

R_p : estatismo permanente.

R_r : estatismo transitorio.

T_R : tiempo de reajuste.

3.2.2. Regulador Electro - Hidráulico.

El regulador electro hidráulico sustituyó al mecánico hidráulico, pero su operación es similar, basada en la elevación por efecto de la fuerza centrífuga de masas giratorias; el sistema tiene la señal de control proporcional al error o desviación de velocidad, las señales de estabilización y auxiliares también son desarrolladas eléctricamente y censadas por circuitos apropiados, luego son hidráulicamente amplificadas con el actuador y

El regulador tiene tiempos de respuesta menores que los que tienen elementos de control únicamente mecánicos, esto se logra al haberse incorporado componentes eléctricos, como motores en DC, alimentados desde un alternador auxiliar, los que tienen la finalidad de acelerar las bolas flotantes del dispositivo sensible a la velocidad y sincronizar el control de referencia de la velocidad.

También controlan los motores, la posición límite de apertura de la compuerta, el accionar o sincronizar las válvulas, la potencia del servomotor y el funcionamiento de la bomba hidráulica, de esta manera se mejora la respuesta y estabilidad del regulador electro hidráulico.

En el regulador electro hidráulico, la velocidad angular o revoluciones por minuto de la turbina, se mide permanentemente a través del mecanismo centrífugo de esferas girantes apoyadas por un acelerador motorizado, o también es tomada de un tacómetro en el eje motriz de la turbina con transductor de señal, la que se transmite para compararla con la velocidad nominal, si difiere, se emite un error positivo o negativo según el caso a un accionador y luego es amplificada por el servomotor hidráulico que mueve la compuerta, alabe directriz o inyector de la turbina, para que actúe en el sentido deseado regulando el caudal.

El sistema hidráulico amplificador lo conforman el servomotor principal que está alimentado por una bomba que suministra aceite a presión a la cámara superior del cilindro del servo desde un acumulador o tanque, mediante cañerías y válvulas de control; el servomotor es un cilindro, en cuyo interior se desplaza un embolo o pistón movido por aceite, y que permite controlar la posición del eje del pistón, luego este fluido finaliza en un depósito colector o sumidero. El servomotor tiene una pequeña válvula de desfogue con mando por bobina, que se acciona manual o automáticamente, y tiene por finalidad cerrar el distribuidor de la turbina para detener la marcha lenta de esta.

Todo el mecanismo actúa por acción y reacción, corrigiendo en uno u otro sentido la posición del distribuidor, lo que provoca una pequeña inestabilidad al grupo, que se corrige intercalando un dispositivo compensador que conecta el pistón del servomotor a la válvula de control mediante un amortiguador hidráulico o dashpot, que retarda la apertura de la válvula piloto para que a su vez el movimiento de las compuertas no se lleven a cabo sino hasta cuando el pistón del servomotor principal se haya desplazado lo suficiente por un cambio de carga de la central. Las partes de este tipo de regulador de velocidad, se aprecian en el esquema de la figura N° 3.3.

“Los reguladores electro-hidráulicos permiten el funcionamiento en paralelo de varias máquinas con estatismo reducido, el cual puede modificarse en servicio de 0 a 6%; y funcionan correctamente con la regulación frecuencia” Referencia: Zoppetti, G.

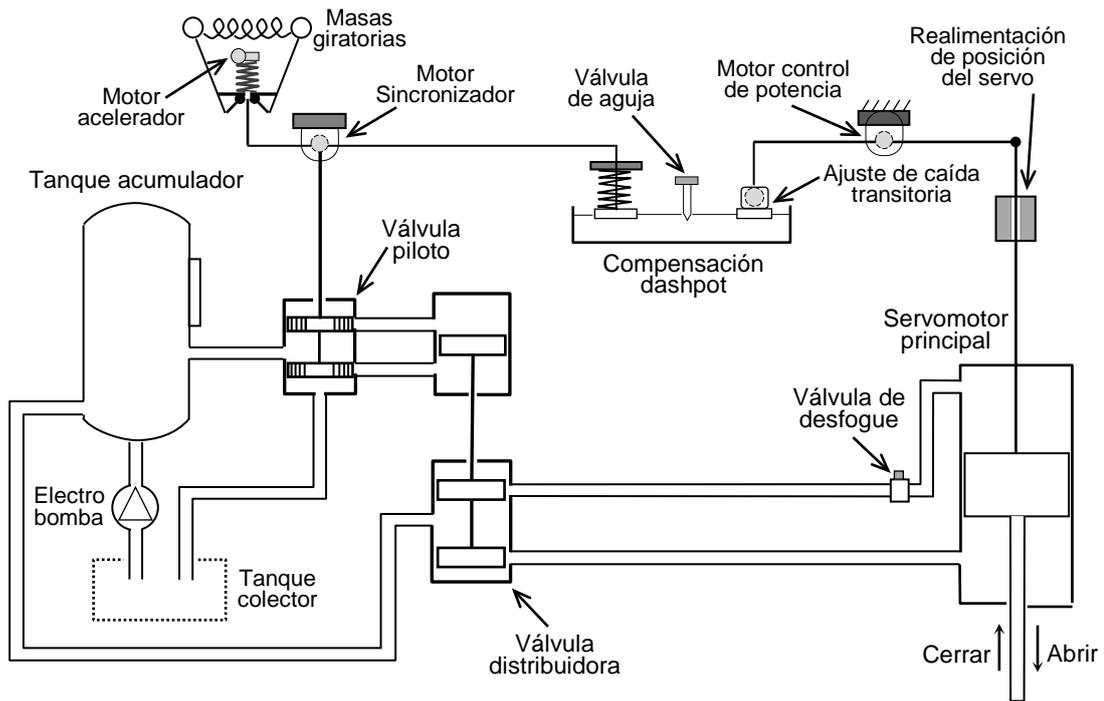


Figura N° 3.3: Esquema del regulador de velocidad Electro Hidráulico con dashpot.
 Referencia: Suescún, I. - Centrales hidráulicas y reguladores de velocidad.

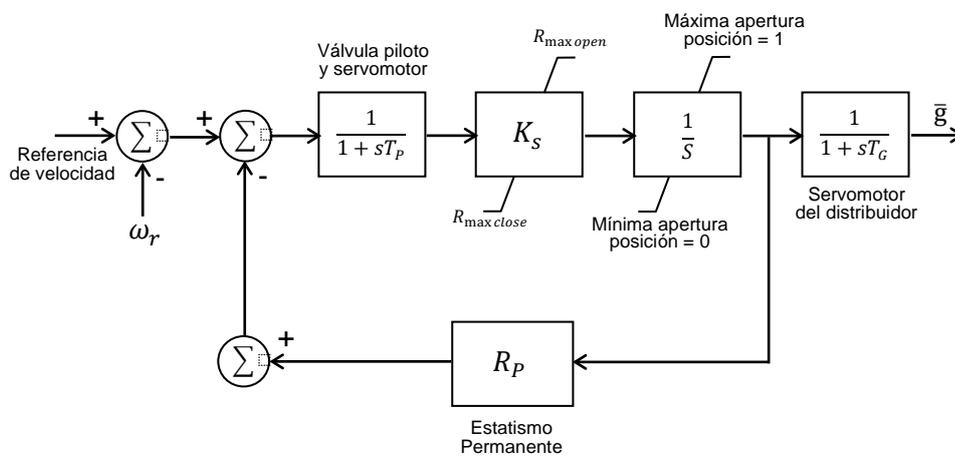


Figura N° 3.4: Diagrama de bloques del regulador Electro Hidráulico.
 Fuente: Modificado del regulador mecánico-hidráulico de Kundur, P.

La ventaja de tener componentes eléctricos es que proveen mayor flexibilidad, sensibilidad y aportan un mejor desempeño, ya que la banda muerta y el tiempo de retardo se reducen, se suelen utilizar los mismos parámetros de un regulador mecánico-hidráulico para caracterizar un regulador del tipo electro hidráulico. Se requiere de una alimentación eléctrica desde el generador o la línea, ya que no se tiene una transmisión mecánica de la turbina, las otras características dinámicas del regulador electro hidráulico generalmente son ajustadas para ser esencialmente similares al mecánico hidráulico.

3.2.3. Regulador Electrónico - Analógico.

La acción de control del regulador electrónico analógico, proporciona un ajuste permanente e instantáneo, tiene componentes electrónicos que manejan señales continuas analógicas, con circuitos o tarjetas electrónicas y sensores o captadores de señales eléctricas, que son convertidas o derivadas analógicamente para su correcta interpretación, cambios que le dan una mejor velocidad de respuesta y una mayor sensibilidad a variaciones de la velocidad o frecuencia.

El sistema de control, tiene tiempos de respuesta pequeños, ya que desde el punto de vista de la de regulación, los elementos electrónicos permiten tiempos del orden de milisegundos; sin embargo, los elementos restrictivos están a nivel del servomotor y en la válvula o compuerta, estos componentes mecánicos requieren grandes niveles de energía para variar su condición de operación, en tal sentido a pesar de que el regulador pueda responder en milisegundos, es necesario colocarles constantes de tiempo que permitan una repuesta en segundos, para que la señal de corrección pueda ser seguida por la velocidad de respuesta de los elementos mecánicos del sistema.

El principio de funcionamiento es el siguiente, la medición de la frecuencia se hace mediante un generador de imán permanente (auxiliar), que produce una tensión con frecuencia igual a la de la máquina, (para un ajuste a 60 Hz.). Se fija un circuito “b” resonante con dos transistores que actúan como válvulas de control de paso “a”, impiden que circule corriente por el capacitor “c”. Si se produjera una variación de frecuencia, por ejemplo, mayor a 60 Hz. el circuito sale de su punto de resonancia permitiendo que circule corriente por “c”, surgiendo a los terminales del capacitor una tensión en fase con la tensión generada.

Esta tensión fija del capacitor, entra en fase con una tensión aplicada a uno de los transistores y en oposición a la tensión aplicada al otro, de esta forma, la corriente “ I_1 ” aumenta y la otra corriente I_2 disminuye. Estas corrientes circulan por las bobinas de una servo-válvula electro hidráulica, también llamada actuador. La figura N° 3.5, nos muestra el esquema general del regulador de velocidad electrónico analógico modificado, del trabajo de tesis de *Delgado, I.*

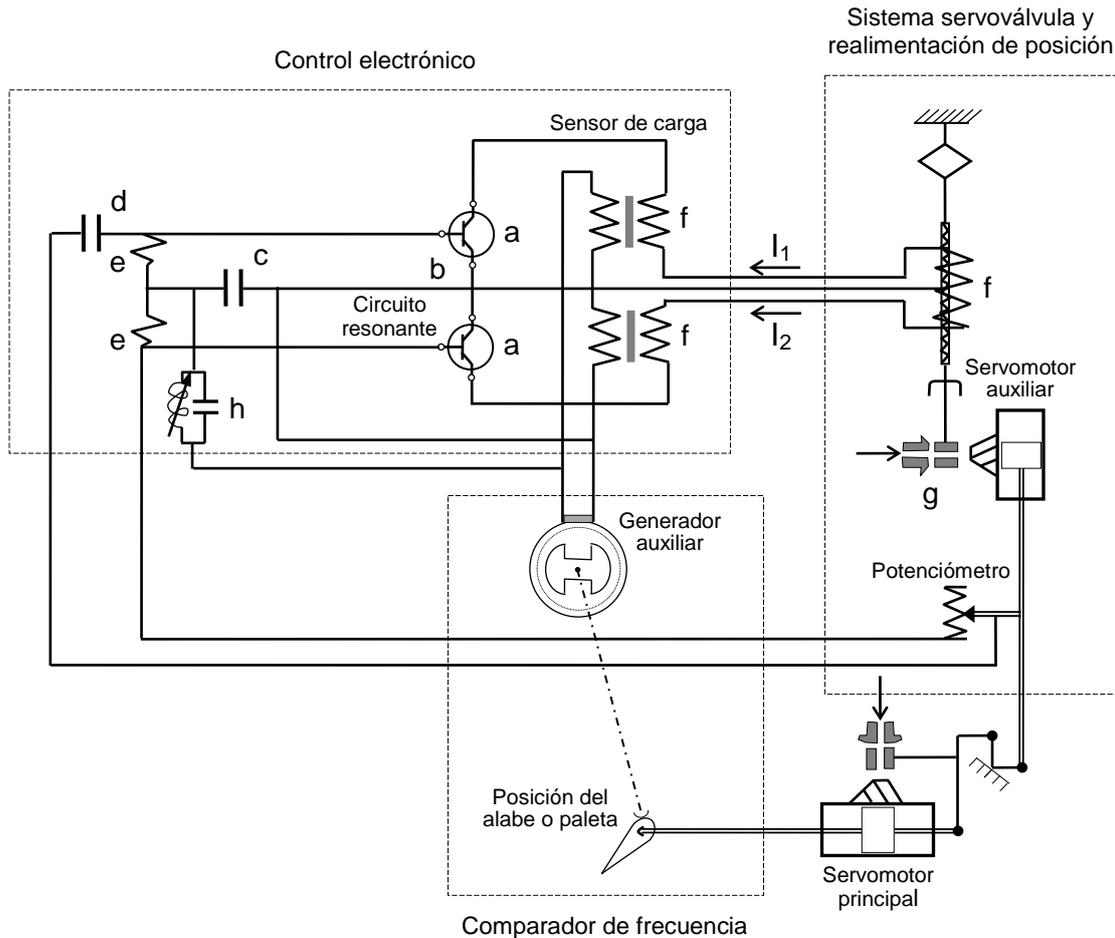


Figura N° 3.5: Esquema del regulador de velocidad Electrónico Analógico.
Fuente: Delgado, I. - Estudio de los sistemas de regulación de velocidad.

Esta válvula es uno de los principales componentes del equipo, pues transforma adecuadamente una señal eléctrica en mecánica. Como consecuencia de la circulación desequilibrada de corriente, la válvula sale de la posición central permitiendo que un servomotor auxiliar “g” se mueva provocando, a su vez, un movimiento proporcional al servomotor principal que actúa en sentido de cerrar la paleta o alabe directriz para disminuir la velocidad. En caso de una disminución de frecuencia, el proceso ocurre de manera inversa a la descrita. Para evitar sobre picos en la acción del regulador con oscilaciones prolongadas, se tiene una realimentación compuesta por un capacitor “d”, y las resistencias “e y f”.

Esta realimentación de señal es un estatismo transitorio. Se observa que una resistencia h es un potenciómetro guiado por el movimiento del servomotor h. Un voltaje aplicado en d y e, es determinado por el valor de la resistencia del potenciómetro i. De esta manera, cuando el servomotor h comienza a moverse, una carga o descarga del capacitor d, implica

una caída de tensión transitoria a través de los resistores e, que irán a alimentar a las válvulas como un voltaje de control. La polarización de esos voltajes debe ser tal, que se opongan al movimiento; en general, las señales de control del regulador eléctrico están ligadas a través de diodos selectores. *Referencia: Delgado, I.*

Para el regulador electrónico analógico de acción proporcional e integral (PI), se tiene el diagrama de bloques y las funciones de transferencia con la figura N° 3.6, siguiente, luego se definen sus parámetros.

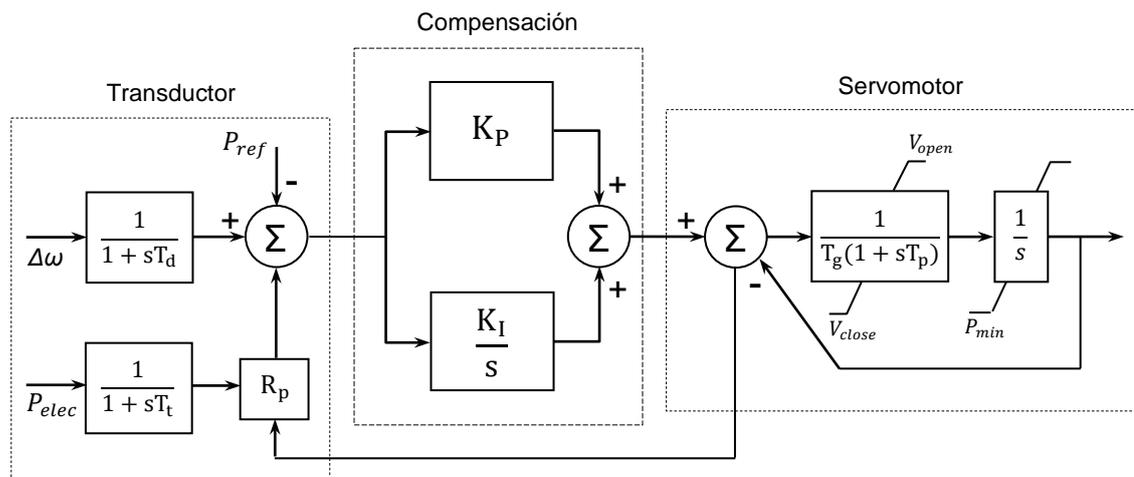


Figura N° 3.6: Diagrama de bloques del regulador Electrónico Analógico.
Fuente: Rosales, J. - Determinación de parámetros de regulador de tensión, frecuencia y PSS - C.H. de Carena.

Dónde:

$\Delta\omega$: variación de velocidad angular.

P_{elec} : potencia eléctrica.

P_{ref} : potencia de referencia.

K : constantes de compensación.

T_g : tiempo del servo del distribuidor.

T_d : tiempo del deflector (distribuidor).

T_t : tiempo del transductor.

T_p : tiempo de la válvula piloto.

- Las ganancias del controlador o compensador se definen con la siguiente expresión:

$$K_p = \frac{1}{\delta} \quad \text{y} \quad K_i = \frac{1}{\delta T_r} \quad \dots (3.1)$$

- El parámetro δ determina la intensidad de la acción compensadora del regulador y se denomina estatismo transitorio.
- La constante de tiempo T_r determina la rapidez con que dicha acción se amortigua y se denomina tiempo de reposición.

El transductor recibe como señal principal la variación de velocidad en comparación con la referencia, alternativamente se recibe como señal la potencia eléctrica de algún punto del sistema o bien el valor obtenido a la salida del bloque de compensación, el cual se amplifica por una ganancia o *droop* permanente, el transductor de entrada es modelado con un bloque integrador No-Ideal. En la parte de compensación se tiene dos bloques en paralelo que son finalmente sumados, el proporcional y el integrador. Para el servomotor su accionamiento se modela a través de un transductor y un integrador limitador; este toma como señal de entrada el error del nivel de la válvula, por lo cual existe una realimentación previa a este bloque.

3.2.4. Regulador Electrónico - Digital.

Conocido también como regulador numérico es de tipo modular y compacto, con controles y panel de operación digital programable, el controlador consta de procesador, memoria y módulos de entrada y salida, representa la tecnología reciente; si el regulador analógico se componía de tarjetas electrónicas que manejan señales analógicas, el de tipo digital se basa en la digitalización de la señal analógica para convertirla en un número (señales por pulsos), cuyo valor es procesado por el modulo digital, que no es más que un micro procesador, donde las funciones de transferencias constituidas por componentes electrónicos, básicamente se usa un amplificador operacional como circuito integrado, y dispositivos para la captación de valores medidos.

Un algoritmo (controlador PID en comandos), realiza el cálculo, con ecuaciones y modelos matemáticos, para que una vez obtenida la respuesta convertir este dígito en una señal analógica, que es enviada hacia la unidad hidráulica, para actuar como amplificador mecánico de los comandos generados. El sistema de control de precisión y estabilidad de este regulador, garantiza alta resolución en la medición de la velocidad ($\leq 0.001\%$), y el tiempo procesamiento de las señales dentro del controlador alcanza los 200 nanosegundos, con se puede ver en con el esquema de la figura N° 3.7, además, se tiene que:

- Incorpora funciones de regulación para variar sus ajustes, dependiendo de las condiciones externas del sistema de generación.
- Las funciones de transferencia son ecuaciones establecidas en el software, por lo que cambiar su respuesta es solo cambiar el programa sin alterar el hardware.
- El control del regulador puede ser cambiado desde el panel, o seguido a distancia, mediante una vía de comunicación inalámbrica.
- Es fácil acceder las señales internas para su monitoreo en caso de una investigación de falla.
- Es completamente autónomo, se puede auto diagnosticar, señalando preventivamente cualquier anomalía.
- Requiere una capacitación o entrenamiento previo el operador a cargo de este regulador digital.

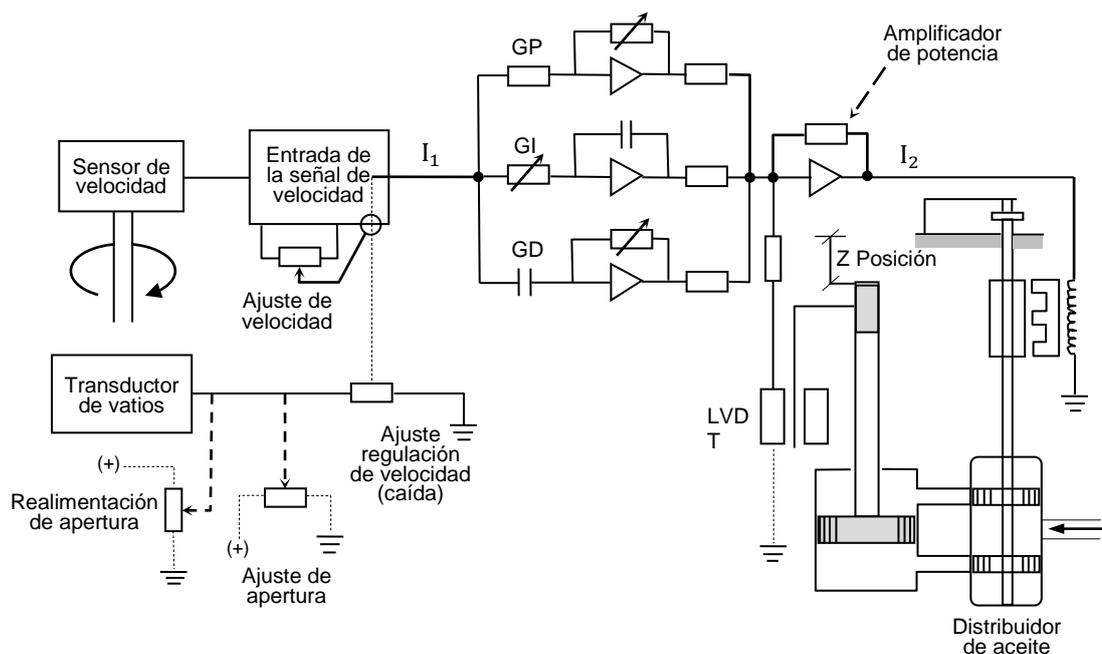


Figura N° 3.7: Esquema del regulador de velocidad Electrónico Digital.
Fuente: Suescún, I. - Centrales hidráulicas y reguladores de velocidad.

La frecuencia es medida mediante dos sensores que detectan un segmento de disco que está anclado en el eje del generador, estas señales eléctricas son transformadas a un código digital por el circuito de medición de frecuencia; el dispositivo amplificador de potencia recibe la orden de la unidad (circuito) de control y en función de ella, activa un elemento de control final como es la válvula, alabe directriz, y está compuesto básicamente por la bomba de aceite, válvula distribuidora, válvula piloto y servomotores, y es en esencia

similar en los diferentes tipos de reguladores, pero las técnicas y elementos constructivos han sido optimizados para este tipo de regulador electrónico digital, con el fin de tener un mejor comportamiento y versatilidad con respecto al regulador electrónico analógico, así mismo, los elementos auxiliares y de control a nivel del actuador y servomotor están adaptados a esta tecnología, y se puede apreciar en el diagrama de la figura N° 3.8.

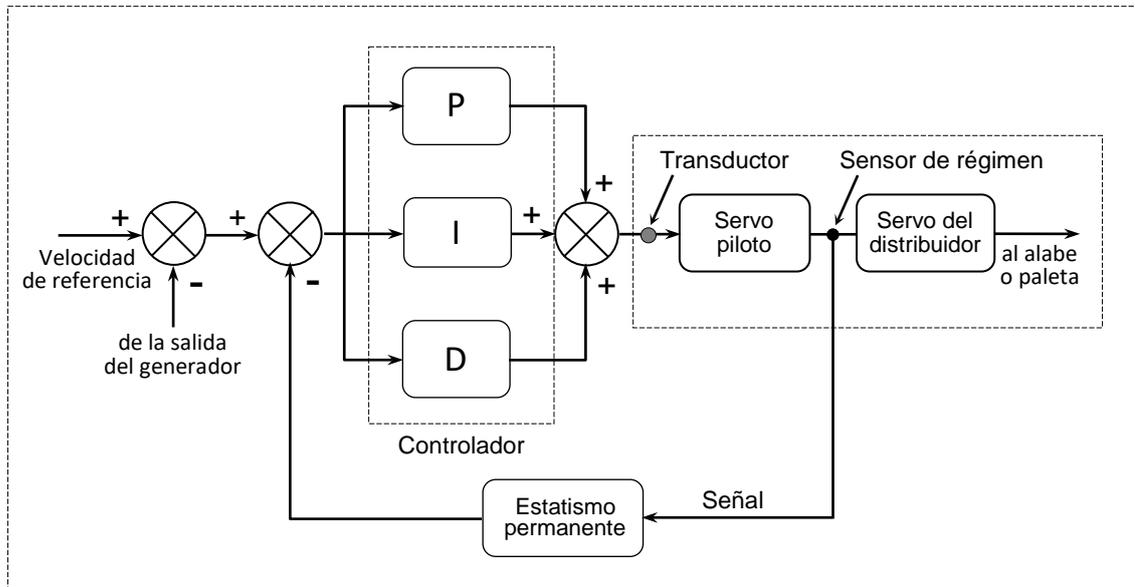


Figura N° 3.8: Diagrama del regulador de velocidad PID Electrónico Digital.
Fuente: Kundur, P. - Estabilidad de sistemas eléctricos de potencia.

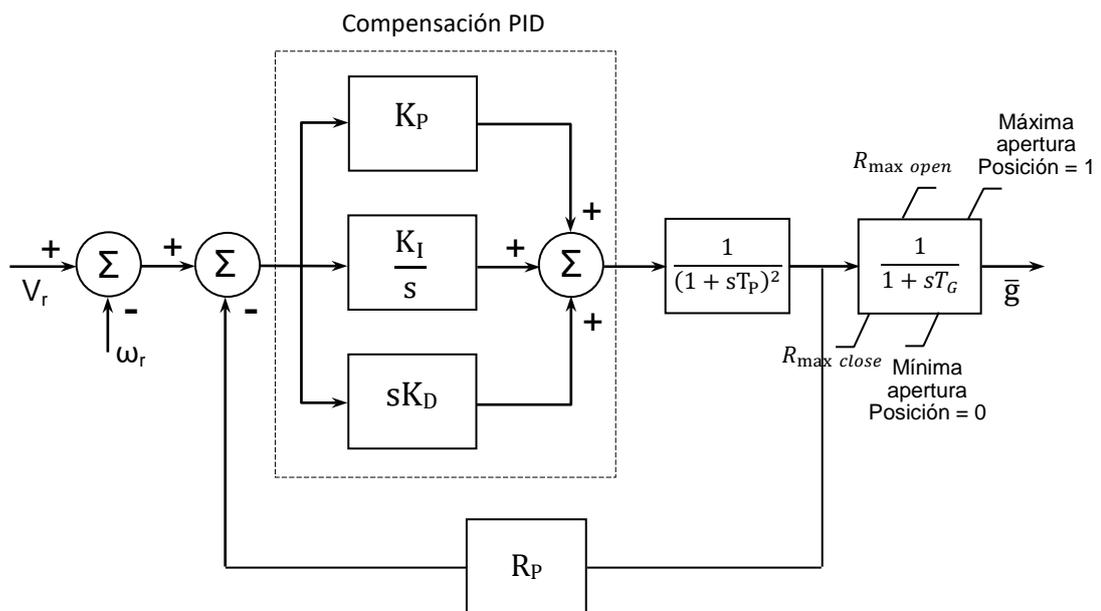


Figura N° 3.9: Funciones de transferencia del controlador Electrónico Digital.
Fuente: Kundur, P. - Estabilidad de sistemas eléctricos de potencia.

3.2.4.1. Análisis del Controlador PID.

- Compensación, tiene tres bloques en paralelo que son sumados, el proporcional, el integrador y el derivativo.
- Función para el servomotor piloto: $\frac{1}{(1-sT_p)^2} \dots (3.2)$
- Función para el servomotor del distribuidor: $\frac{1}{1+sT_g} \dots (3.3)$
- Para la ganancia R_p , los límites de posición: máx. apertura = 1, mín. apertura = 0
- Límites de velocidad: $R =$ máximo abierto, $R =$ máximo cerrado.
- La acción derivativa es importante en operación aislada, con T_w elevado; $T_w \geq 3s$.
- Los valores elevados de K_D , pueden producir oscilaciones en operación interconectada. Valores típicos son, $K_p = 3$, $K_I = 0,7$ y $K_D = 0.5$
- La ganancia del estatismo permanente R_p , está en torno al 4% y el 5 %, entonces los valores típicos $R_p = 0.04$, $R_p = 0.05$
- La función de transferencia del controlador PID clásico es la siguiente:

$$G(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s \dots (3.4)$$

3.2.4.2. Ajustes del Controlador PID.

Es posible encontrar varios métodos para el ajuste de controladores o reguladores PID, cada uno de los métodos está basado en el tipo de respuesta que se desea obtener ante una entrada específica. El controlador Proporcional, Integral y Derivativo (PID), puede ser implementado mecánicamente, neumáticamente, eléctricamente, este dispositivo es controlado con una PC, es fácil de ajustar y configurar, teniendo como ventaja principal el usar un controlador digital en el sistema gobernante para ser más sensitivo a pequeños errores, lo que implica que la acción correctiva sea acelerada. Además, los controladores digitales son exactamente reproducibles y producen una respuesta idéntica para todas las unidades en línea, en contraste a la variabilidad de los

reguladores mecánicos o eléctricos. Los tres parámetros, P, I y D son regulables, así se puede ajustar para encontrar las necesidades particulares de cada central hidroeléctrica.

3.2.5. Regulador Electrónico de Carga.

Conocido como REC, es un regulador de velocidad que tiene componentes electrónicos en su unidad de control, los que se encargan de mantener constante la carga eléctrica del alternador (sin variación de la demanda), lo que permite que el par resistente o torque electromagnético dado por el generador sobre el eje de la turbina también sea constante y por tanto la velocidad de rotación del grupo sea invariable. El regulador por carga, se recomienda generalmente para pequeñas centrales con potencias menores de 100 kW, y su esquema básico se puede apreciar en la figura N° 3.10.

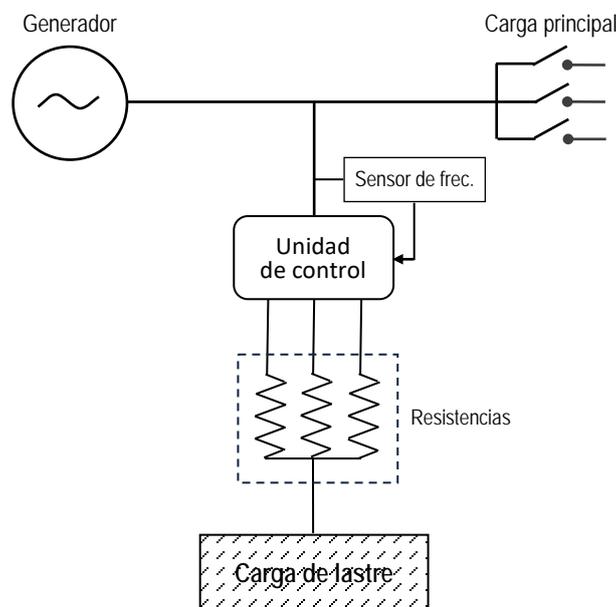


Figura N° 3.10: Esquema del regulador por Carga Constante.
Fuente: Elaboración propia.

El sistema consta básicamente de lo siguiente:

- Tablero de control electrónico.
- Unidad de carga secundaria.
- Elemento disipador de calor.

El equipo ejecuta el control de las siguientes magnitudes:

- Frecuencia y velocidad las que mantiene constantes.
- Mide y señala los voltajes, corrientes y averías del sistema.

- Corrige en presencia de valores límites, como:
 - sub frecuencia (< de 56 Hz. aproximadamente).
 - sobre frecuencia (> de 63 Hz. aproximadamente).

3.3. Componentes de la Regulación de Velocidad.

Seguidamente con la figura N° 3.11, se presenta el esquema general de los elementos intervinientes y comunes a todos los sistemas de regulación de velocidad por control de caudal, en él se advierte la dirección del flujo de señales de los componentes de la central de generación, desde la cámara de carga hasta el generador eléctrico.

El sistema de regulación de velocidad para que sea óptimo, debe tener alta velocidad de respuesta, baja banda muerta, precisión en la velocidad, facilidad en ajustes y control de carga. También debe ser confiable por la seguridad de todos los componentes hidráulicos, principalmente el de la turbina y la tubería de presión.

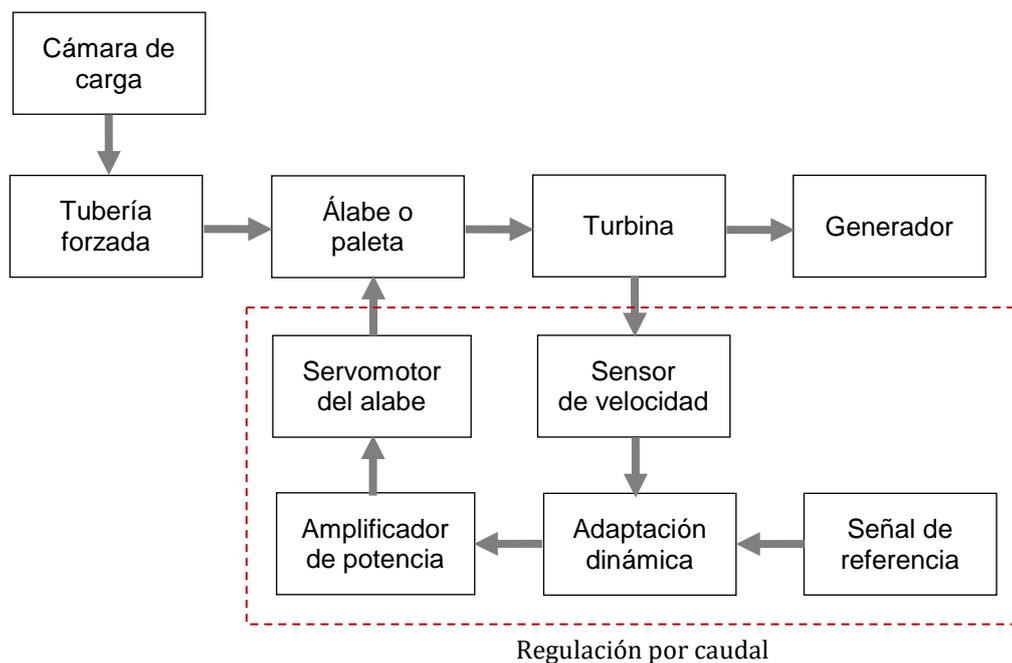


Figura N° 3.11: Diagrama de Flujo de la regulación de velocidad por caudal.
Fuente: Caicedo, G. - Obtención de parámetros de reguladores de velocidad.

3.3.1. Elementos Principales.

El conjunto del regulador de velocidad dinámico por caudal, está compuesto por los siguientes dispositivos:

- Un sistema de medida y control, que detecta las variaciones de velocidad de la turbina (tacómetro).
- Un servo-mecanismo capaz de transformar la señal del sistema de medida en la acción de variar la admisión de la turbina.
- Órganos de regulación como válvulas, alabes o deflectores, encargados de realizar la regulación propiamente dicha.
- Un dispositivo de amortiguación (dashpot) que reduzca las oscilaciones del conjunto.

Los elementos característicos de un regulador de velocidad de turbina hidráulica, son:

- a) **Sensor de Velocidad.** - detecta los cambios que ocurren en la velocidad de la turbina y suministrar una salida proporcional a la misma, que constituirá la señal de entrada al elemento de control, mediante:
 - Mecanismo volante de masas giratorias.
 - Generador de imanes permanentes.
 - Señal de voltaje tomada del transformador de potencia.
 - Ruedas dentadas adosadas al eje de la máquina.
 - Imanes adheridos al eje.
- b) **Elemento de control.** - compara el valor de la velocidad de la turbina con el valor de ajuste de velocidad deseado (referencia) y genera una señal de salida para la acción de control requerida.
- c) **Dispositivo de potencia.** - produce y la amplifica la fuerza mecánica para posicionar el dispositivo de control del flujo de agua, en respuesta a la salida del elemento de control. Para esto se requiere una bomba, cuya capacidad es generalmente tres volúmenes del servomotor por minuto.

3.3.2. Funciones Básicas.

Todo regulador de velocidad de velocidad cuenta con mecanismos para realizar funciones parciales muy definidas, que complementan la fundamental, que es la regulación. Si bien en los recientes reguladores los dispositivos son electrónicos, los que no transmiten esfuerzos directos, a diferencia de los mecánicos que si lo hacen, y sus funciones principales son:

a) Control de Caída de Velocidad.

Este dispositivo, vinculado al equipo estabilizador, se le conoce como dispositivo de estatismo permanente, control del grado de estatismo, control de caída relativa de vacío a plena carga o control de velocidad inherente.

Tiene como misión, prefijar la repartición de la carga entre dos o más grupos acoplados en paralelo, permite ajustar la caída de velocidad desde el valor cero hasta el 6%, aproximadamente, de la velocidad de régimen a plena carga; el valor usualmente ajustado, está comprendido entre el 2% y el 4 %, dependiendo de las fluctuaciones de carga previstas en el sistema.

Cuando se ajusta para caída de velocidad de valor cero, posición de regulación totalmente astática (velocidad constante para cualquier carga), el grupo tenderá a aceptar todas las oscilaciones de carga. En cambio, este se opondrá a dichas oscilaciones en mayor grado cuanto mayor sea el valor ajustado, es decir, menor será la proporción de las fluctuaciones de carga del sistema tomadas por los grupos.

b) Control de Velocidad.

También, en sentido más amplio control de carga-velocidad, distinguiendo como control de carga cuando actúa sobre la máquina acoplada y control de velocidad cuando está desacoplada.

Está gobernado por un motor eléctrico con reductora y embrague, denominado motor de ajuste de velocidad o motor de sincronización, porque se utiliza para ajustar la velocidad de sincronismo del grupo, cuando se realiza la maniobra de acoplamiento de éste en paralelo al sistema. El mecanismo puede ser controlado a distancia desde el cuarto de control, o localmente desde el propio cuerpo o estructura del regulador.

Debido a la acción que ejerce el muelle limitador del tacómetro, le permite al operador mantener los valores requeridos de carga o de velocidad según proceda, haciendo los ajustes oportunos. En condiciones de funcionamiento normal del grupo, las acciones sobre el dispositivo del control de carga, pueden ser ejercidas directamente o mediante regulación automática a distancia, desde un centro de Maniobras.

c) Control de Límite de Apertura.

Su denominación más usual es la de limitador de carga. Consiste en un mecanismo que, accionado por un motor, bloquea el movimiento de la válvula piloto, estableciendo el límite de carga que debe proporcionar el grupo, en relación con el límite de apertura permitido al distribuidor (sección de paso límite), puede ser maniobrado localmente o a distancia.

d) Control de Desconexión por Exceso de Velocidad.

También se le denomina control de desconexión por sobrevelocidad o embalamiento, el exceso de velocidad se detecta por dos procedimientos distintos, uno de ellos es puramente mecánico, y consiste en el uso de interruptores centrífugos situados convenientemente sobre distintas zonas del eje del grupo, los cuales según proceda, intervienen en los circuitos de control eléctricos o de aceite a presión destinados a tal fin. El otro está basado en la alimentación directa de los circuitos de control, por medio del generador de imanes permanentes o el generador de impulsos.

Para cada turbina, se suelen establecer dos valores de sobrevelocidad o escalones de exceso de velocidad, denominados primer escalón y segundo escalón, disponiéndose de los controles respectivos para cada uno de ellos. La sobrevelocidad se da, cuando el regulador no responde eficazmente ante un desacoplamiento con carga.

En ambos casos, a través de los controles mencionados el regulador da órdenes de cierre total al distribuidor, si bien, cuando se trata del primer escalón existe la posibilidad de espera de un comportamiento del grupo de generación que permita la recuperación del número normal de revoluciones por minuto establecidas.

Referencia: Extraído de la web. electromntto.blogspot.com, ed. marzo 2009.

CAPITULO IV

4.1. La Central Hidroeléctrica de Coline.

4.1.1. Introducción.

Las pequeñas centrales hidroeléctricas actualmente tienen como principal función el servir a poblaciones rurales alejadas y aisladas, de modo que estas abastecen totalmente al sistema eléctrico del lugar (las pequeñas centrales no operan en forma interconectada) y por consiguiente “*deben regular solas la frecuencia de la red*”.

Para esta forma de operación es necesario solo el control de velocidad de la central, y con esto se regula, es decir, aunque cambie el requerimiento de energía de la red, haciendo que cambie momentáneamente la velocidad de la turbina, el sistema de control responde para que se mantenga la velocidad angular del rodete dentro de valores cercanos a su valor nominal. Así la planta hidroeléctrica va entregando potencia a la red de acuerdo a lo que esta requiera, manteniendo una frecuencia eléctrica constante cuando el lazo de control ha pasado su estado transitorio.

4.1.2. Antecedentes de la Central.

La comunidad de Puyca, por muchos años se encontraba relegada en su desarrollo, teniendo sus habitantes una baja calidad de vida al no contar con energía eléctrica, esto debido a su aislamiento, lejanía con respecto a otras poblaciones con mayor desarrollo, así como el costo del tendido de líneas de transmisión que puedan llevar la energía hasta esta comunidad alto andina del distrito de Marcapata, que comprende territorialmente a seis sectores o poblados menores, que son, Coline, Fause, Umaparco, Chequepampa, Cachona, y Compipampa.

La pobreza en que viven estas poblaciones, el poco nivel cultural de sus habitantes y el limitado acceso a la comunicación e información, hacían necesaria la ejecución de un proyecto de electrificación en la zona, para así fomentar su desarrollo social, económico, turístico y comercial. Pero siendo el mercado en análisis de bajo poder adquisitivo, con una demanda eléctrica reducida y cargas dispersas; características que determinan una baja

rentabilidad de cualquier proyecto de electrificación, lo cual motiva que no sea atractivo a la inversión privada, y que la solución requiera de la participación directa del estado.

Sin embargo y frente a esta realidad, el Padre Peter Hansen Olsen párroco de la iglesia de San Francisco de Asís de Marcapata, tomo interés en el problema y con la participación de especialistas en el tema, identifican en el sector de Coline condiciones topográficas e hidrográficas favorables para la construcción de una pequeña central hidroeléctrica, que proporcione la energía que necesitaba esta comunidad campesina.

Es así, que el año 2006 se elabora un Proyecto de Factibilidad, por encargo de la Municipalidad de Marcapata, para atender las necesidades energéticas con una mini central en el anexo de Coline, pero esto no logra concretarse. Posteriormente en el año 2007, se firma un acuerdo entre la parroquia de San Francisco de Marcapata y la comunidad de Puyca, para realizar esta obra. La comunidad se compromete a ceder el terreno y aportar con la mano de obra, y la parroquia a financiar las obras civiles y el equipamiento hidroeléctrico, dándose así inicio al proyecto, el que se concluye a finales de ese año; luego de esto, se trasfiere la inversión hecha por la parroquia de San Francisco a la Comunidad de Puyca, para que tenga la propiedad y el usufructo de la central de Coline.

Luego de dos años de funcionamiento de la mini Central, el año 2010 se regulariza la documentación, con la elaboración de un expediente técnico de, *Replanteo de Obra y Estudio a Nivel Definitivo*, con el fin de poder realizar los trámites de la Declaratoria de Fabrica y su inscripción en los Registros Públicos de Cusco a nombre de la comunidad de Puyca, sector de Coline. En el expediente técnico de Replanteo de Obra no se consideró entre otros aspectos, un sistema de regulación de velocidad automático, por lo que esta función importante se lleva a cabo de forma manual.

Cabe indicar que en la etapa constructiva de la mini central, solo se contó con un Perfil de Obra y no un Expediente Técnico como corresponde. Sin embargo, se logró el propósito, gracias a la participación y compromiso de trabajo de toda la comunidad, y la desinteresada contribución del párroco, Padre Peter Hansen. De esta forma se pudo tangibilizar y darle sostenibilidad al proyecto, pues aseguro el contacto de sus pobladores residentes del lugar en todas las etapas y procesos de construcción de la central, teniéndola actualmente en funcionamiento en beneficio de la población comunitaria.

4.2. Otras Centrales en la Zona.

En los distritos de Marcapata y Camanti, situados zona alto andina y ceja de selva, se encuentran operando desde hace varios años, cinco mini centrales hidroeléctricas, y una recientemente concluida y lista para su operación; esto es posible debido a la gran disponibilidad hídrica en la cuenca y sub cuencas del río Araza que abarca estos distritos, y cuyas aguas provienen principalmente de nevados y lagunas adyacentes, lo que posibilita un régimen permanente de caudales casi durante todo el año, y permite su aprovechamiento en la generación eléctrica que beneficia a poblaciones de la zona.

Luego, se indican las centrales hidroeléctricas referidas:

- La M.C.H. de San Francisco de Asís, de 300 kW., ubicada en el distrito de Marcapata de la provincia de Quispicanchis, en la región de Cusco.
- La M.C.H. de Montaña, de 300 kW., ubicada en el distrito de Marcapata de la provincia de Quispicanchis, en la región de Cusco.
- La M.C.H. de Chumpi, de 75 kW., instalada por el PROMIDECH, ubicada en el distrito de Marcapata de la provincia de Quispicanchis, en el Cusco.
- La M.C.H. de Layampampa, de 30 kW., ubicada en la localidad de Chillimoco, del distrito de Marcapata de la provincia de Quispicanchis, en la región de Cusco.
- La M.C.H. de Capire de 25 kW., ubicada en el sector del mismo nombre del distrito de Marcapata de la provincia de Quispicanchis.
- La M.C.H. de Limapuqo, de 35 kW., se encuentra en la parte final de su construcción, y se ubica en el distrito de Marcapata de la provincia de Quispicanchis.

Se encuentra en proyecto para tener la automatización de la regulación de velocidad, las siguientes:

- M.C.H. de Yanamayo, de 120 kW., ubicada en el distrito de Camanti de la provincia de Quispicanchis de la región del Cusco.
- M.C.H. de Pumachaca, de 300 kW., ubicada en la localidad de Pumachaca, distrito de Paucartambo de la provincia de Paucartambo de la región del Cusco.

Información del trabajo de campo y la Municipalidad de Quispicanchis.

Como su aporte técnico y práctico en el tema, se tiene a las siguientes instituciones:

- La Intermediate Technology Development Group (ITDG); y su programa de "Micro Hidroenergía", que tuvo una extensa experiencia de trabajo desde el año 1991, hasta el 2010, especialmente en Cajamarca y Cusco, relacionada con la instalación y equipamiento y capacitación para pequeñas centrales hidroeléctricas.
- El ITINTEC, a través del proyecto de investigación tecnológica "Microcentrales Hidroeléctricas", ejecutado en regiones del interior del país entre los años 1979 y 1982, tuvo como finalidad, desarrollar y adaptar tecnología para el equipamiento y construcción de P.C.H., promoviendo la instalación de reguladores de velocidad.

4.3. Estudio Hidrológico.

La cantidad de agua que discurre en un río varía a lo largo del año. Esta variación del caudal obedece a múltiples factores entre los que destacan: el área de la cuenca, las condiciones climáticas existentes, la topografía del terreno y las características geológicas de la cuenca.

Las mediciones ocasionales o periódicas del caudal son referencias importantes que deben tomarse en cuenta, pero por sí solas no son suficientes para informarnos si el año será muy seco o muy lluvioso, o a qué niveles de caudal puede bajar el río en época de estiaje y hasta que niveles podría subir en tiempo de avenida.

El estudio hidrológico recoge las repercusiones hidráulicas que se puede llegar a tener sobre la cuenca hidrográfica, y podría contestar algunas interrogantes, pero debido a que la hidrología no es una ciencia exacta, por lo general las respuestas se dan en forma probabilística de ocurrencia.

4.3.1. Hidrología del lugar.

La zona de estudio se encuentra aislada y es poco frecuentada, los datos hidrológicos son escasos, este tipo de proyecto necesita datos de una cuenca muy pequeña, donde la información es mínima, entonces el estudio se puede simplificar sin tener un elevado margen de error siguiendo los siguientes parámetros:

- Mediciones de caudales (caudal máximo, mínimo y promedio).
- Medición de la velocidad de la corriente de agua.
- Relación entre niveles y caudales.
- Observación de sedimentos transportados.

En el estudio hidrológico de la central hidroeléctrica, se pueden dar circunstancias como, falta de datos, y de acuerdo a éstos se presentan las siguientes posibilidades:

- Si se tiene información pluviométrica más no hidrológica es posible determinar los caudales máximo, mínimo y medio.
- Si no se tiene información ni hidrológica ni pluviométrica cercana a la bocatoma o si se tiene información de un sitio de la cuenca del afluente alejado de la bocatoma, es posible transponer información de una cuenca vecina o de una cuenca similar.
- Si el proyecto es muy pequeño puede ser suficiente con información de uno o dos años en el lugar de la bocatoma.

Referencia: Ortiz, R. - Pequeñas centrales hidroeléctricas.

4.3.2. Fuente de Captación.

Por una quebrada colindante al sector de Coline, discurre las aguas de un pequeño río de desarrollo corto y fuerte pendiente llamado Yanacancha, que se origina en un manante cerca al nevado Huallahualla, este recurso es aprovechado en la generación eléctrica. El riachuelo Yanacancha, atraviesa los sectores de Coline y Fause, con un caudal promedio de $0.5 \text{ m}^3/\text{seg}$ en época de máximo estiaje y un caudal de 1.5 a $2.0 \text{ m}^3/\text{seg}$ en épocas de máxima avenida, siendo además el principal recurso hídrico de la zona.

Parte del caudal del Yanacancha, es derivado y conducido por el canal de aducción una distancia de 160 m., que va desde la bocatoma hasta la cámara de carga. Estas aguas permiten la generación eléctrica, pero limitan su potencia, debido a la insuficiencia del recurso; luego las aguas turbinadas de Coline, son devueltas al cauce natural del río.

Se tiene proyectado utilizar el agua turbinada del Yanacancha en una piscigranja, y cuyas pozas estarán cerca al canal de descarga de la central, con una capacidad de 10,000 alevinos de trucha, por ser esta agua rica en oxígeno, con aprox. 50 a 60 L/seg.



Foto N°. 4.1: Rio Cheqtacucho discurriendo por el valle de Puyca.
Fuente propia.

4.3.3. Estudio de la Cuenca.

La cuenca se caracteriza por la presencia de lluvias de régimen alto, con más de 900 mm. por año. El escurrimiento de las aguas durante el periodo de avenida que ocurre entre los meses de noviembre y abril, forman aguadas y tienen su origen principalmente en precipitación pluvial estacional. En periodos de estiaje es decir entre Junio y Octubre las descargas de agua provienen de deshielos de nevados que circundan la comunidad de Puyca, algunos de ellos con nieve permanente todo el año como el Japumayo y Huallahualla en la cordillera oriental, lo que forma pequeños recursos hídricos continuos durante el año, como lagunas colindantes a la zona, también hay aportes subterráneos o acuíferos.

Las aguas de la cuenca discurren por el valle de la C. de Puyca, y convergen en el rio Cheqtacucho, que luego desemboca en el rio Palquella y juntamente con el rio Umaparcco forman el Cchachubamba. Este se une con el Putumayo en el sector denominado Phatan, formando la naciente del rio Arazá o cuenca alta del Arazá (la confluencia de estos ríos constituye la cuenca hidrográfica de Marcapata con un área de 4,577.35 Km²), y que al final de su recorrido aguas abajo se unirá en la región Madre de Dios con el gran rio Inambari.

Referencia: Municipalidad de Marcapata, y Mapa hidrográfico y de cuencas del instituto de manejo de agua y medio ambiente.

El cuadro N° 4.1, muestra la demanda de agua en la cuenca alta de río Arazá para diferentes actividades de la población. (en usos consuntivo y no consuntivo).

Nota: la cantidad debe multiplicarse $\times 10^6$ para tener en millones de $m^3/año$.

Cuadro N° 4.1: *Usos del agua en la cuenca alta del río Arazá.*

Demanda	Cantidad ($m^3/año$)
Domestico	0.052
Pecuario	0.730
Riego	0.132
Uso consuntivo	0.914
Pesca	1.800
Mini centrales	33.400
Uso no consuntivo	35.200
Total:	36.114

Fuente: Gobierno Regional, I.M.A. y Centro Bartolomé de las Casas. Documento, Identificación y Evaluación de Potencialidades de Quispicanchis.

4.3.4. La Micro Cuenca.

El río Chetacucho, forma una micro cuenca que atraviesa el valle de la comunidad de Puyca, y tiene en esta zona como principales afluentes a dos pequeños ríos, el Macchullan y el Yanacancha. La micro cuenca es parte de la cuenca de Marcapata, que cruza la cordillera central de Chimboya y fluye hacia la vertiente oriental de la cordillera sur.

El Chetacucho registra un caudal comprendido entre 2.5 a 3.0 $m^3/seg.$ en épocas de mayor estiaje, y con 12 a 13.0 $m^3/seg.$ en épocas de máxima avenida; esta agua tiene un uso con fines agrícolas y no es utilizada en el proyecto energético de la central de Coline.

4.4. Registro de Caudales.

4.4.1. Aforos.

No se cuenta con una estación de aforo cercana al recurso hídrico utilizado en la mini central de Coline, la información disponible de los aforos (mediciones), que determina el comportamiento del caudal del río Yanacancha, se extrajo del Informe técnico que se tiene en la municipalidad de Marcapata, realizado los años 2010 y 2011, todos los meses,

mediante el método volumétrico o del recipiente, con resultados del caudal mensual de los años aforados y se resume en el cuadro N° 4.2, siguiente.

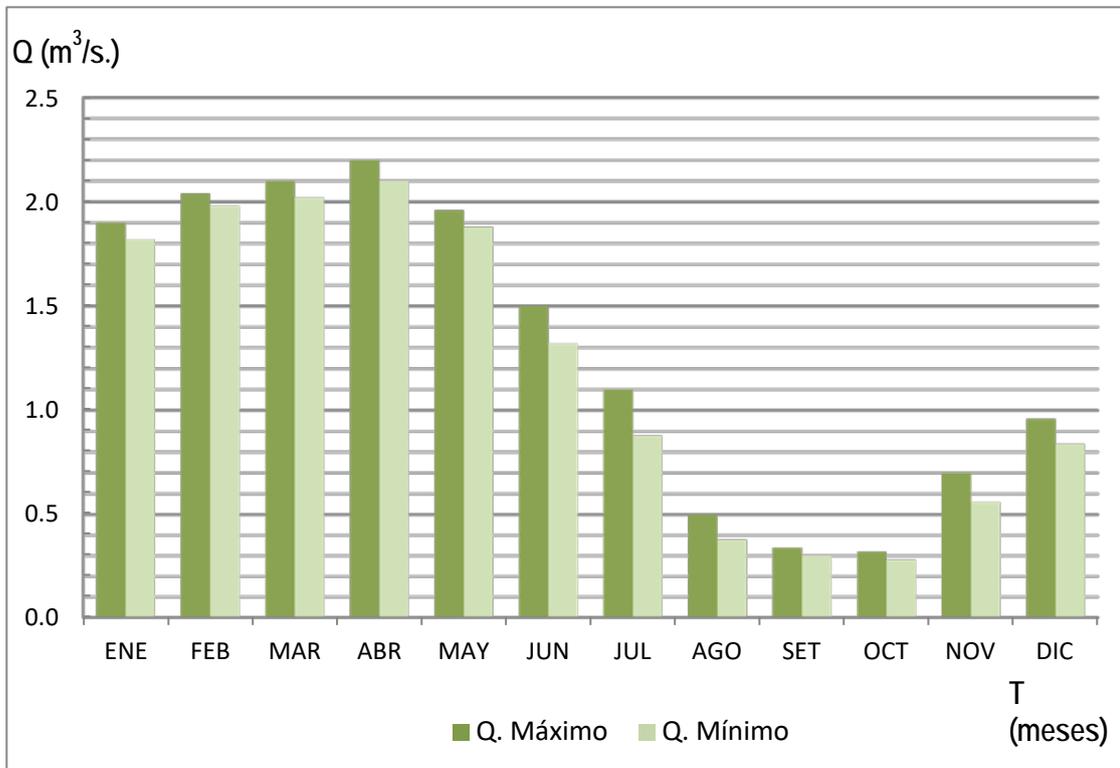
Cuadro N° 4.2: *Medición de caudales realizados en el río Yanacancha.*

DATOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
N° de muestras	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Q. Promedio m ³ /s	1.86	2.01	2.06	2.15	1.92	1.41	0.99	0.44	0.32	0.31	0.63	0.90
Q. Mayor m ³ /s	1.9	2.04	2.10	2.20	1.96	1.50	1.10	0.50	0.35	0.34	0.70	0.96
Q. Menor m ³ /s	1.82	1.98	2.02	2.10	1.88	1.32	0.88	0.38	0.31	0.31	0.56	0.84

Fuente: Informe, de la municipalidad de Marcapata.

El valor de los caudales, mayor y menor mensual, es el resultado de 10 aforos, tomados en cada mes de los correspondientes años de estudio. También se puede ver en el cuadro anterior, un caudal máximo de 2.20 m³/s. registrado en el mes de abril (en avenida), y un caudal mínimo de 0.31 m³/s. el mes de setiembre (en estiaje).

Cuadro N° 4.3: *Registro del caudal máximo y mínimo por meses.*



Fuente: Municipalidad distrital de Marcapata.

Realizada la hidrología del área del proyecto con el registro de caudales disponibles en dos periodos anuales, permitió evaluar la disponibilidad de recurso hídrico y asegurar la producción de potencia eléctrica durante las épocas de estiaje o avenida, en la central de Coline. Complementariamente, los cambios en el caudal del río afectan la profundidad del agua, la composición de los sedimentos y la carga de sedimentos en suspensión.

4.4.2. Velocidad y Caudal.

El caudal o flujo del río, es la cantidad de agua que pasa a través de una sección del canal por unidad de tiempo; se calcula multiplicando la velocidad del agua en m/s, por el área de la sección en m², lo que produce un volumen m³/s. Esto solamente es aplicable a sistemas de aguas corrientes como ríos o arroyos. El río Yanacancha tiene una velocidad del agua promedio, registrada antes del ingreso a la bocatoma, de 1.5 m/s, y un caudal de 0.5 a 1.5 m³/s.; concluyendo con estos valores, que es un río de régimen o flujo variable moderado, de poco caudal y pendiente de media a fuerte en su curso libre.

4.4.3. Sedimento.

El río Yanacancha tiene un curso montañoso, sus aguas acarrear o arrastran en su corriente libre un bajo aporte de sedimentos, cuyas características de acuerdo al análisis mineralógico son, cuarzo, restos de piedra en el fondo, de granos finos y dureza mediana, con diámetros menores a 0.5 mm., y lodo o partículas en suspensión, solo al comienzo de las crecidas del río en época de avenida.

En la evaluación de cantidad se tiene, de 1.5 a 1.7 gr/litro, valor que indica un bajo contenido de sedimento, y en la correlación entre el caudal del río y la concentración de sólidos en suspensión, se puede considerar un río de agua limpia y caudal estable; no ocasiona bloqueo en la toma de ingreso al canal ni desgaste o erosión de la turbina, (parte del sedimento es decantado en el desarenador y la cámara de carga).

4.5. Descripción de la Central.

La Central Hidroeléctrica de Coline, funciona como un pequeño sistema aislado de generación, que abastece la demanda eléctrica local, opera regularmente las 24 horas del día con algo más del 50% de su capacidad instalada y un solo grupo generador. Es una

central de *Agua Fluyente* que aprovecha el cauce natural del río; de acuerdo a su potencia de generación es considerada una Mini Central, y según su salto de Mediana Altura. Tiene una antigüedad aproximada de 13 años, y es de administración privada.



Foto N° 4.2: Vista satelital de la mini central de Coline.
Extraído de la página web de Google Maps.

Las obras civiles de la mini central comprenden, la bocatoma, canal de demasías, desarenador, canal de conducción, cámara de carga, tubería de presión, casa de máquinas, y el canal de descarga, en el esquema N° 4.1, se puede apreciar las partes mencionadas.

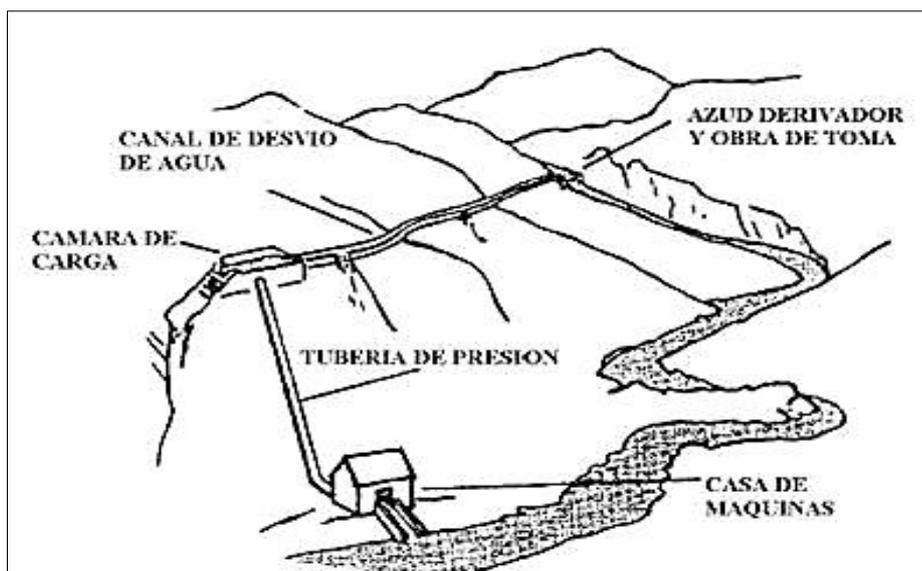


Figura N° 4.1: Partes principales de una mini central hidroeléctrica.
Fuente propia.

4.5.1. Distribución de los Usuarios.

Los usuarios de la energía eléctrica en la comunidad de Puyca, están distribuidos de la siguiente manera:

En los anexos de Fause y Coline se tiene 32 viviendas ubicadas de forma dispersa, (empadronadas como beneficiarias de la energía) por ambos sectores, que son los que habitan de forma permanente, además se tiene en el lugar un centro educativo primario.

Los sectores de Quechapampa, Compipampa y Umaparco tienen un total de 28 viviendas empadronadas y que cuentan también con el servicio eléctrico, la futura ampliación de la red de distribución, llevara la energía a aproximadamente 20 familias más, ubicadas en el sector de Cachona y otras casas alejadas pertenecientes a la misma comunidad, con esto se completara la red de distribución.

4.5.2. Distribución de la Carga.

La distribución de carga eléctrica para el sistema de generación de la C. de Coline, comprende a pequeñas redes de usuarios dispersos en toda la zona. La carga o demanda solicitada corresponde a cinco sectores que cuentan actualmente con el servicio y son parte de la comunidad de Puyca, y es como sigue:

En el sector de Coline se encuentran algunas viviendas y el centro educativo primario, los que están distribuidos en un radio no mayor de 700 m. desde la central. Para este lugar se diseñó convenientemente una red de distribución eléctrica monofásica en baja tensión, evitando la caída de voltaje supere el 7% del valor nominal, por tanto no hay sub estación.

La distribución eléctrica a los sectores de Fause, Quechapampa, Umaparco, y Compipampa, cuenta con sub estaciones en media tensión, de 10.5 kV. a 380/220 para el sistema trifásico, y 440/220 para los sistemas monofásicos, ya que estos se encuentran a distancias mayores a 1.0 km desde la casa de máquinas. Las líneas de derivación y sub estaciones de distribución en red primaria son de topología radial, de la siguiente forma.

Un transformador elevador externo de 160 kVA, contiguo a la casa de máquinas provee la línea principal y luego están las derivaciones radialmente; a la derecha se tiene las líneas hacia los transformadores reductores ubicados en Quechapampa, 3 ϕ , con 37.5 kVA y Fause, 1 ϕ , con 25 kVA de potencia; a la izquierda las líneas se conectan con los transformadores reductores que están en Compipampa y Umaparco, ambos 1 ϕ , con 25 kVA de potencia cada uno.

Todos los cables o líneas de distribución en media y baja tensión son aéreos, con conductores autoportantes de tipo CAI, sostenidos por postes de madera eucalipto, que se ubican desde la central hasta los sectores de consumo. Las acometidas aéreas a las viviendas, van directamente desde el empalme a la caja de conexión e interruptor principal, por cuanto no se tiene medidores de energía.

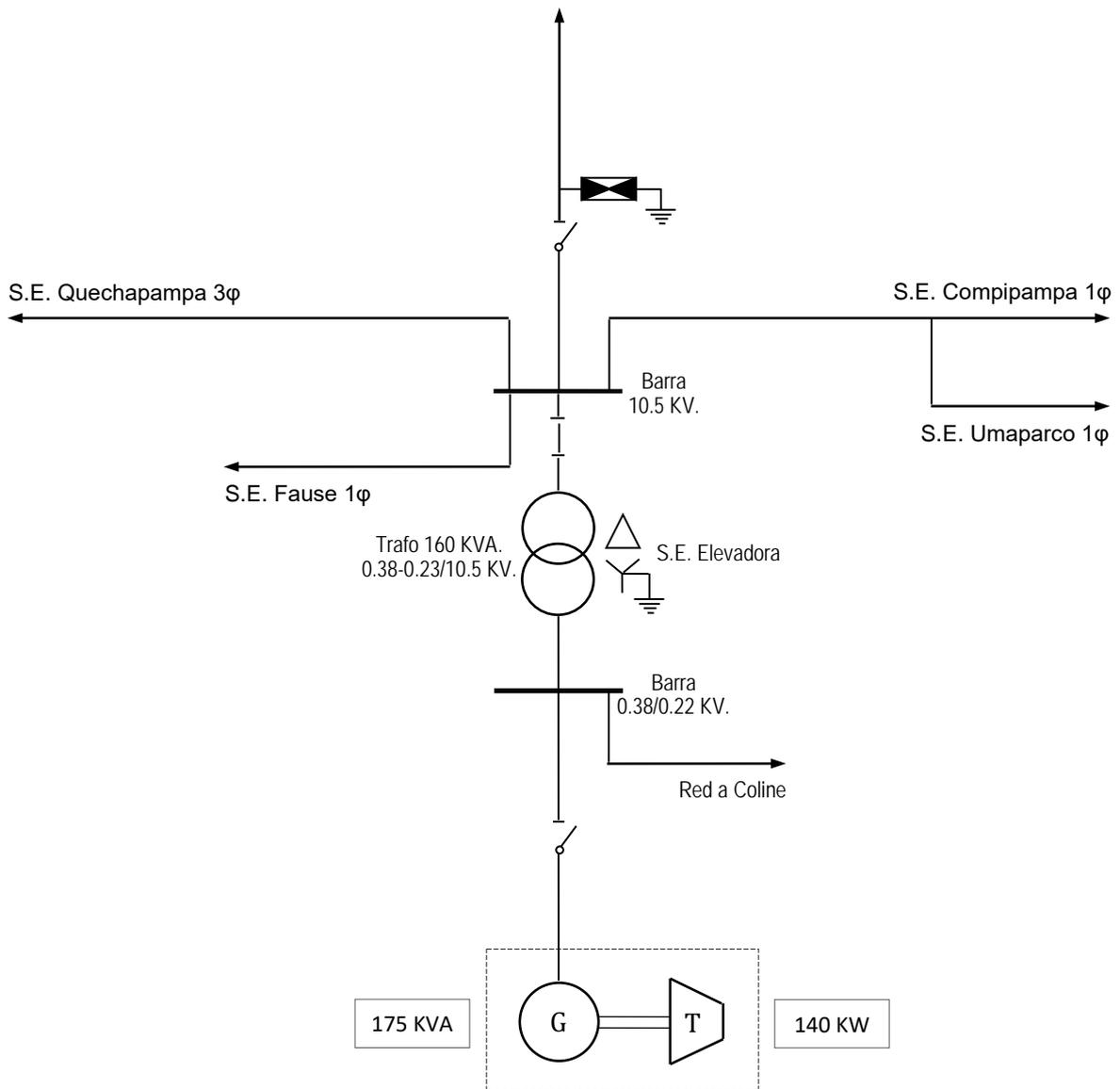
Referencia: Expediente técnico de replanteo de obra de la mini central de Coline. - Condori, T.

A continuación se grafica el sistema eléctrico de potencia, mediante el Diagrama Unifilar General de la mini central de Coline, en la comunidad de Puyca.

Fuente de información: Trabajo de campo.

4.5.3. Diagrama Unifilar del Sistema.

LEYENDA	
	TRASFORMADOR
	TURBINA
	GENERADOR
	INTERRUPTOR
	SECCIONADOR
	PARARAYOS
	BARRA DE CARGA
	LINEA AÉREA



4.6. Función de las Obras Civiles.

Las principales funciones que cumplen las obras civiles en la central hidráulica son: captar, regular, conducir, desarenar o desripiar, almacenar, forzar y evacuar el agua necesaria para su funcionamiento, y alcanzar posteriormente una acción mecánica. Cada componente constructivo debe cumplir eficientemente su propia función con respecto al agua y al medio ambiente.

Con referencia al agua, es lograr que el diseño de todos los componentes funcione de manera eficaz y simultáneamente, de tal manera que el fluido principal (agua), llegue a la turbina con la presión suficiente y necesaria para hacerla funcionar y generar la energía esperada.

Con referencia al medio ambiente, básicamente es de reducir al mínimo el impacto negativo que se pueda originar en el entorno, al alterar el paisaje natural, el curso del río, o la biodiversidad de la zona. El compromiso es, asegurar la permanencia del equipo a implementarse, instalado al interior de la casa de máquinas existente, para el tiempo de servicio diseñado, considerando:

- Preservar la fauna y flora del lugar.
- Evitar la erosión del suelo y el deslizamiento de la ladera.
- Evitar el asentamiento de las diferentes estructuras.
- Uso legal y racional del agua de acuerdo a normas vigentes.
- Evitar diseños inadecuados que puedan ocasionar inundaciones.

4.7. Parámetros de Diseño.

Los parámetros considerados en el diseño inicial de la central de Coline, y la posterior construcción, están acordes a la evaluación del recurso hídrico existente, la altura del salto y las necesidades energéticas del lugar, y son los que determinan el tamaño y diseño de las instalaciones y el dimensionamiento de los equipos, tal como se puede ver detalladamente en la ficha técnica de parámetros, del cuadro N° 4.4 que sigue.

Fuente: Trabajo de campo y Expediente técnico de replanteo de obra de Coline.

Cuadro N° 4.4: *Parámetros de diseño de la central de Colina.*

DATOS HIDRÁULICOS	
Nivel cámara de carga (msnm)	3,905
Nivel de descarga (msnm)	3,828
Salto bruto (m)	77
Caudal de diseño (m ³ /s)	0.30
Potencia de diseño (kW)	140
Sistema de aducción	Canal
Tuberías	1
Longitud - tubería (m)	160
Diámetro - tubería (mm)	355
Pendiente (s)	0.05
Pérdidas de carga (m)	2.55

TURBINA	
Generación	Hidráulica
Tipo de turbina	Cross Flow
Diámetro del rodete (m)	0.30
Velocidad de rotación (r.p.m.)	600
Potencia nominal (kW.)	140
Salto neto (m)	74
Caudal (m ³ /s)	0.30
Eficiencia (η_t)	0.65

GENERADOR	
Numero de polos	4
Revoluciones	1800
Potencia activa nominal (kW.)	140
Potencia aparente (kVA)	175
Tensión de salida (kV.)	0.38
Corriente de salida (A.)	120
Frecuencia (Hz.)	60
Eficiencia (η_g)	0.92

TRANSFORMADOR	
Relación de tensión (kV.)	0.38-0.23/10.5
Potencia nominal (kVA.)	160
Frecuencia (Hz.)	60
Altura de trabajo (msnm)	3,850
Fases	03
Regulación de tensión	$\pm 2.5 \%$, $\pm 5\%$
Eficiencia (η_{tr})	0.97

Fuente: Elaboración propia.

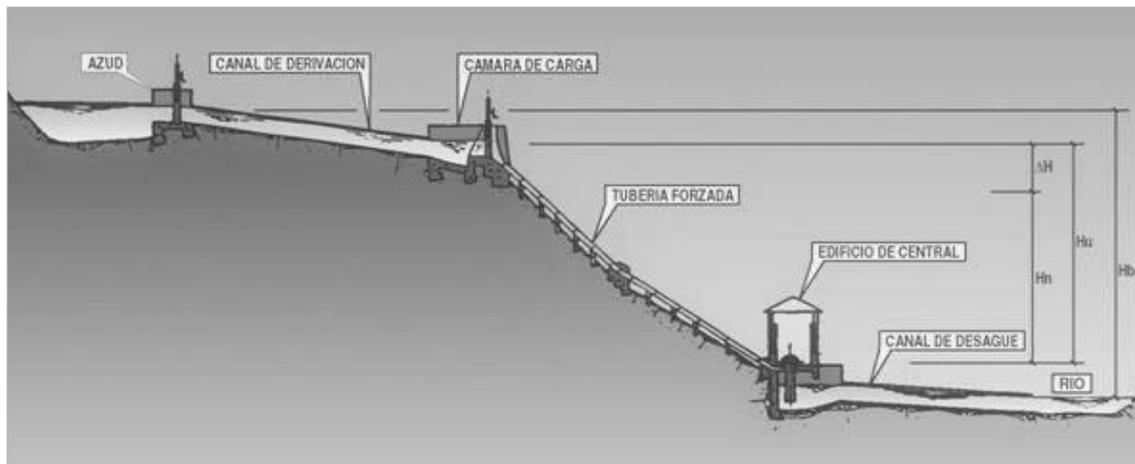


Figura N° 4.2: Elementos intervinientes en la conducción del recurso hídrico.

4.8. Obras Civiles e Hidráulicas.

Las obras civiles e hidráulicas como, Azud, Canal de Derivación, Desarenador, Cámara de Carga, Canal de Demasías, Canal de Descarga, se han hecho con un dimensionamiento para el caudal de operación promedio o caudal de diseño. Seguidamente se describen los elementos constructivos existentes en la central de Colina.

4.8.1. Listado de las Obras Civiles.

- Bocatoma con azud, ventana de captación y compuerta.
- Desarenador, con compuerta de limpia.
- Canal de conducción.
- Cámara de carga.
- Casa de máquinas.
- Canal de descarga.

4.8.2. Descripción de Obras.

a) **Bocatoma de Captación**, es de derivación tipo convencional, se ubica en la margen derecha del cauce del río Yanacancha, transversal a su flujo y al costado de un puente carrozable. Toda la estructura es de concreto armado y está conformada por el azud, un barraje fijo, la ventana de captación con enrejado metálico y la compuerta.

El azud de derivación está limitado lateralmente por muros de encauzamiento de aguas hasta la ventana de captación.



Foto N° 4.3: Rio, bocatoma, azud, rejilla y compuerta.
Fuente propia.

b) Desarenador, es un canal de forma rectangular y ligeramente variable en su profundidad, su estructura es de concreto armado, y dispone de una compuerta de ingreso de agua al inicio y otra al final, con aliviaderos, la purga se realiza mediante un conducto cerrado que desgrava y descarga los sedimentos al riachuelo. Mediante una transición se conecta la bocatoma con el desarenador.



Foto N° 4.4: Desarenador, compuerta y canal de limpia.
Fuente propia.

c) Canal de Conducción, es abierto y de forma trapezoidal, conduce aproximadamente 160 m. de longitud, desde la bocatoma en el rio Yanacancha, hasta la cámara de carga.

Su estructura es de concreto armado, y el trazado de la conducción se ha adaptado a la configuración topográfica y forma del terreno, lo que también hace que su pendiente sea ligeramente variable.



Foto N° 4.5: Canal de conducción trapezoidal y abierto.
Fuente propia.

d) Cámara de Carga, es una poza rectangular de concreto armado, se encuentra al final del canal de conducción y da la disponibilidad del volumen de agua que bajara por la tubería de presión. Tiene una rejilla de limpia metálica y un vertedero de demasías, para evacuar el agua excedente la que es conducida hacia la quebrada contigua, su toma de agua está a 77 metros de altura con respecto a la casa de máquinas.



Foto N° 4.6: Cámara de carga con ventana de alivio y rejilla.
Fuente propia.

- e) **Tubería de Presión**, es metálica, circular, de 14'' de diámetro y se encuentra en su totalidad visible encima del terreno, cuenta con juntas de dilatación para variaciones térmicas, bridas de unión y anclajes de soporte en los cambios de dirección con apoyos de concreto. Su longitud es 159 m., desde la cámara de carga hasta el codo de entrada.



Foto N° 4.7: Tubería de presión sobre apoyos y casa de máquinas.
Fuente propia.

- f) **Casa de Maquinas**, dispuesta al final de la caída de la tubería de presión y junto a la trocha carrozable. Es una edificación de un nivel que alberga a los equipos hidroeléctricos y cuyas dimensiones obedecen al tamaño de estos más los espacios de seguridad. Para la reparación de equipos, se tiene al interior un pórtico de izaje y tecele.



Foto N° 4.8: Lateral de la casa de máquinas y trocha carróza.
Fuente propia.

Estructuras:

Cimentaciones de piedra y concreto, columnas y vigas de concreto armado. Paredes de ladrillo revestido en concreto y techo con tijerales de madera y cobertura de calamina. Puerta de plancha de fierro con angulares, y ventanas con vidrios y marcos de fierro. Piso con piedra vaciada en concreto enlucido, y los anclajes para los equipos son de concreto y fierro.

Dimensiones:

Las medidas de la edificación son las siguientes.

Área = 45m^2 . (largo 10.0 m. ; ancho 6.0 m.)

Altura = 4.0 m. (incluye el techo).

- g) Canal de Descarga**, de aguas, es de tipo abierto y de sección rectangular, hecho de concreto armado, el que va desde la parte inferior del tubo de succión de la turbina, hasta el río. Sirve para evacuar las aguas turbinadas, que son devueltas al cauce natural del río Yanacancha.

Características:

Dimensiones: 0.50 x 0.50 x 0.50 m.

Longitud: 20 m.

Pendiente: 0.07



Foto N° 4.9: Canal de descarga junto a la casa de máquinas.
Fuente propia.

4.9. Componentes Hidroeléctricos

A continuación se enumeran y grafican los equipos componentes hidráulicos, mecánicos y eléctricos de la central, en el orden de posición, desde la tubería de presión hasta el tablero control y distribución:

- Tubería de presión.
- Uniones, juntas de dilatación y anclajes.
- Codo de ingreso bridas y válvula mariposa.
- Transición redonda-rectangular.
- Bomba hidráulica, gata y contrapeso.
- Junta de Montaje.
- Turbina hidráulica de flujo cruzado.
- Multiplicador de velocidad.
- Volante de inercia.
- Acoples flexibles y chumaceras.
- Alternador y bornera.
- Tablero de control.

Esquema general de la central.

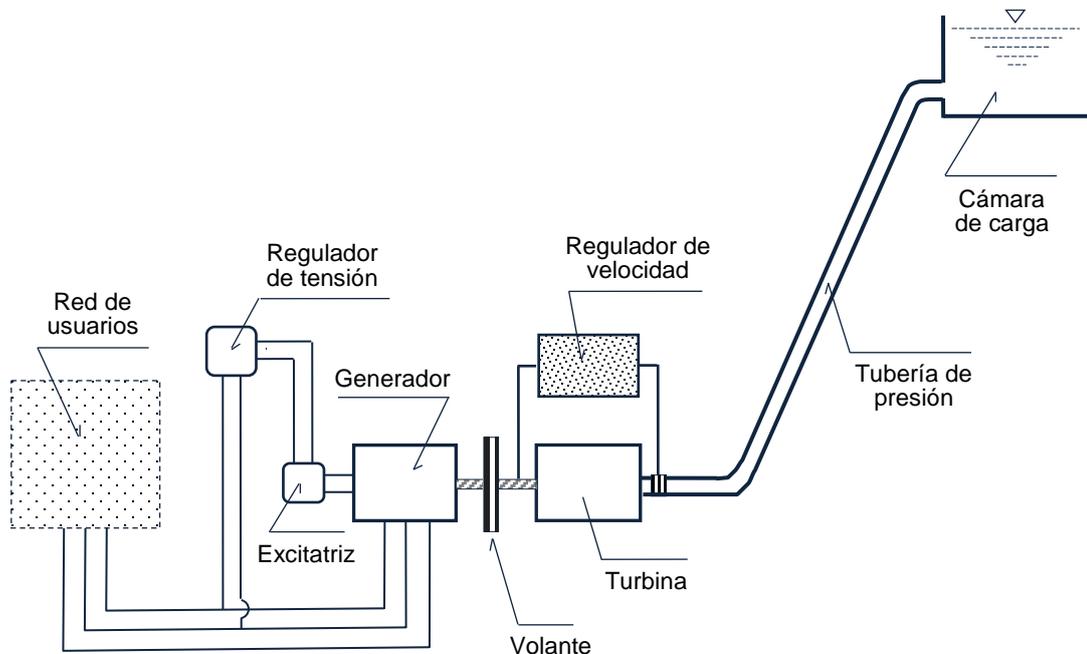


Figura N° 4.3: Componentes de la central de generación hidroeléctrica.
Fuente: Elaboración propia.

4.9.1. Descripción de Componentes.

Los componentes principales de la central de Coline, se describen a continuación.

4.9.1.1. La Turbina y sus Partes.

La turbina es Michell-Banki, de flujo transversal, de eje horizontal, admisión radial y parcial de chorro libre, de marcha lenta a través del alabe directriz ajustable de acuerdo a la variación de caudal que es admitido por el rodete que está equipado con una corona de alabes, donde el agua primero atraviesa las palas periféricas desde el exterior hacia el interior, después de haber cruzado el centro del rodete, sale por las palas inferiores hacia el exterior y luego hacia el tubo de aspiración.



Foto N° 4.10: Lateral de la turbina hidráulica de flujo cruzado.
Fuente propia.

Características:

- Tipo : Cross Flow.
- Modelo : Michell-Banki, nacional.
- Posición del eje : Horizontal.
- Velocidad de giro : 1200 r.p.m.
- Potencia nominal : 187 HP.
- Potencia eléctrica : 140 kW.
- Rodamientos : Rodillos cónicos con agujero y manguito.

Partes principales de la turbina hidráulica:

- **Rodete.-** Fabricado con discos y alabes guías en lámina de acero inoxidable CrNi., maquinado, fundamentado y pulido, el rodete o rotor tiene un diámetro exterior de 290 mm. y un ancho 150 mm., montado sobre el eje motriz de tubo de acero boehler y esta balanceado estática y dinámicamente.
- **Carcasa.-** Fabricada en plancha de acero ASTM A743 CA, SAE 1020, espesor 6 mm., aloja al rodete y alabe de regulación, el que va montado sobre dos guías bujes de bronce, con los sellos respectivos. Sobre la carcasa esta la válvula de control de presión de aire.
- **Tapas de la Carcasa.-** Son tres, de plancha de acero similar al de la carcasa, sirve para la inspección y acceso al rodete, donde también van instalados los sellos, retenes, bujes de bronce y rodamientos, para la sujeción del eje del rodete.
- **Alabe de Regulación.-** De acero fundido ASTM A743 CA 6NM, de dimensiones de acuerdo al diseño y tipo perfilado, montado sobre el eje, este alabe sirve para regular la entrada de agua hacia el rodete de la turbina.
- **Tubo de Aspiración.-** Es de plancha de fierro negro, transición redonda a rectangular que va acoplada a un costado de la carcasa, y sirve para conectar el paso del agua, desde la tubería de presión hacia la turbina.
- **Tubo de Descarga.-** Es de plancha de fierro negro, de sección rectangular, montado debajo de la carcasa, el que sirve para orientar las aguas turbinadas hacia la poza de amortiguamiento y de esta al canal de descarga.

4.9.1.2. La Junta de Montaje.

Es un componente hidráulico, que sirve de acoplamiento intermedio entre el tubo de aspiración de la turbina y la válvula de tipo mariposa, está fabricada en acero, es una transición tubular embridada y provista de sus empaquetaduras. Facilita el montaje y desmontaje del inyector y la turbina.



Foto N° 4.11: Bridas entre la válvula mariposa y junta de montaje.
Fuente propia.

Características:

- Material : Acero estructural de 1/2"
- Número de bridas : 02, de plancha de acero 3/4"
- Diámetro exterior : de 17 pulgadas.
- Pernos de ajuste : 08 espárragos con 16 tuercas de ajuste
- Reten : Sellos de jebe tipo Orring de 1/2"

4.9.1.3. La Válvula Mariposa.

Es un dispositivo de tipo mecánico e hidráulico, que permite abrir y cerrar, conectar y desconectar, regular o aislar el agua de la tubería de presión hacia la turbina. También es el órgano principal de regulación tosca o primaria de caudal.

La válvula de mariposa es de cuarto de vuelta, y controla el flujo por medio de un disco circular cuyo eje de lumbrera vertical, se encuentra en ángulo recto con respecto a la dirección del flujo de agua.

Características:

- Tipo : mariposa.
- Diámetro : 14 pulgadas (35.5 cm.)
- Material : acero inoxidable.

- Apertura y cierre : manual o a través de servo.
- Presión máxima : 15 Bares.
- Acoplamiento : bridas y pernos.

4.9.1.4. *El Regulador de Velocidad.*

Se encuentra inoperativo desde hace varios años debido a desperfectos mecánicos. Es tipo oleomecánico taquimétrico (de péndulo centrífugo), y se acciona a través de una polea y banda o faja plana acoplada al eje de la turbina, que le transmite el movimiento giratorio necesario; se complementa el sistema de regulación con la bomba de aceite, el cárter, la gata hidráulica y el contrapeso, los que permitan completar la maniobra de regulación de caudal de la turbina.



Foto N° 4.12: Regulador de velocidad oleomecánico y bomba hidráulica.
Fuente propia.

Características:

- Marca : Jahns Thoma.
- Tipo : Oleomecánico, clase AA 2
- Material : Fierro fundido.
- Potencia : 40 kW. de regulación neta.
- Funcionamiento : a presión de aceite.
- Protección : IP 41.
- Variación de frecuencia : 60 Hz, +/- 5 Hz.

4.9.1.5. El Multiplicador de Velocidad.

El multiplicador de velocidad también conocido como adaptador de velocidad, es un equipo mecánico necesario para elevar las revoluciones generadas por la turbina y poder adaptarla a la velocidad de sincronismo del generador.

El multiplicador de velocidad es un sistema de transmisión, que consta de una caja con engranajes, piñones y ejes, que están lubricados por aceite, y cuyo diseño y relación de transmisión obedece a la función $\ln(N_A/N_T)$; este equipo esta acoplado entre la turbina y el generador síncrono.



Foto N° 4.13: Multiplicador de velocidad y acoples elásticos.
Fuente propia.

Características:

- Marca : Flender
- Modelo : BA3100 SP 12 94.
- Operación : horizontal
- Relación : multiplica de 1 a 3.
- Engranajes : 03 cónicos, en baño de aceite.
- Potencia mecánica : 170 HP, con ventilador.

4.9.1.6. *La Volante de Inercia.*

Es un disco solido con hendidura circular central, de acero fundido, importado, que esta acoplado en el eje motriz que une coaxialmente al grupo turbina-generator, y sirve para aumentar la inercia del conjunto, que contrarresta variaciones de velocidad y reduce esfuerzos eléctricos y mecánicos del grupo turbina-generator, especialmente cuando varía bruscamente la carga, como en el arranque y desconexión de motores.



Foto N° 4.14: Disco volante de inercia entre los rodamientos.
Fuente propia.

Características:

- Forma : Disco macizo, rectificado.
- Material : Acero comercial ASTM A743
- Diámetro : Externo 760 mm.
- Ancho : En borde 160 mm. y central 80 mm.
- Peso : 190 kg. de acuerdo a GD^2
- Balanceo : Estático y dinámico a 1,800 rpm.

4.9.1.7. *Los Acoples Elásticos.*

Constan de dos piezas circulares metálicas unidas, con interior de goma, marca Flender, y su función es unir los ejes, transmitiendo torque y potencia, absorbiendo y amortiguando sus irregularidades, es flexible a la torsión, y admite pequeñas desalineaciones del eje.

Los acoples elásticos son tres, y están instalados entre la turbina y el multiplicador, el multiplicador y la volante, y la volante y el generador.

Características:

- Modelo : N-Euplex, tipo B, (flexibles)
- Material : Fierro fundido y goma sintética.
- Diámetro : \varnothing ext. 160 mm.
- Torque : 560 Nm.
- Velocidad : Max. 4,250 r.p.m.



Foto N° 4.15: Acoplamiento elástico montado en el eje de rotación.
Fuente propia.

4.9.1.8. El Generador.

El generador eléctrico es de tipo síncrono, de polos salientes, sin escobillas, de operación horizontal, con tres conexiones o fases (R,S,T), que salen desde la caja de borneras. Los aislamientos pueden soportar hasta 105 °C. de temperatura, y trabajar a una altura mayor de 3,800 m.s.n.m.

Se auto excita, rectificando parte de la corriente alterna con diodos rotativos, que es tomada en bornes e inyectada al rotor como corriente directa a través de anillos rozantes, su control esta auto regulado.



Foto N° 4.16: Generador junto a la caja de borneras y conexiones.
Fuente propia.

Características:

- Potencia nominal : 175 kVA.
- Tensión nominal : 400/230 V.
- Frecuencia : 60 Hz.
- Regulación de voltaje : 3 %
- Velocidad nominal : 1,800 rpm.
- Velocidad de embalamiento : 3,600 rpm.
- Factor de potencia : 0.8 el $\cos \varphi$
- Clase de aislamiento : F, estator/rotor.
- Clase de protección : IP23.
- Rendimiento (100% de carga) : 92.7%
- Carga desequilibrada por fase : 60%.
- Control de bobinas estáticas : CTP.

4.9.1.9. El Regulador de Tensión.

El regulador automático de tensión o AVR, estabiliza rápidamente el voltaje que se tiene en los terminales del generador a través de la corriente de campo de excitación. Protege al generador, es un componente electrónico analógico, marca Basler Electric, modelo DVR 2000, de fabricación americana y se encuentra instalado en el tablero de control.

Características:

- Regulación de voltaje : +/- 0.25% sobre el rango de carga.
- Corriente de campo : para excitación, 4 A. en C.D.
- Excitación : de 0 a 75 V. en C.D.
- Potencia de entrada : de 180 a 240 V.
- Frecuencia : para 50 ó 60 Hz.
- Precisión de regulación : aprox. +/-1%.

4.9.1.10. El Tablero de Control y sus Partes.

El tablero de control y distribución es tipo modular adosado a la pared, el panel es de plancha de acero laminado, reforzado estructuralmente con perfiles de acero angular. Al frente se tiene la puerta, la que permite el acceso al interior.

Internamente el tablero tiene el interruptor de potencia tripolar, fusibles, interruptores secundarios, relés, diodos rectificadores, barras de conexión y el regulador automático de voltaje. Exteriormente en la parte frontal de la puerta, están los instrumentos de medición digitales luminiscentes como voltímetro, amperímetro, , el usuario puede seleccionar la fase (P,Q,R) a visualizar por acción sobre el pulsador de la cara delantera, también se encuentran el frecuencímetro, vatímetro, llave eléctrica y luces led de alarma en caso de fallo.



Foto N° 4.17: Exterior del tablero (izquierda), interior del tablero (derecha).
Fuente propia.

Características:

- Voltímetro : digital, para fases R,S,T.
- Amperímetro : digital, para fases R,S,T.
- Frecuencímetro : digital, en Hz.
- Vatímetro : digital, en kW.
- Alarma : para sub o sobre frecuencia y voltaje
- Reparte energía : a la carga principal como a la auxiliar.

Las partes principales del tablero son:

- **Interruptores.-** Los interruptores, principal y auxiliares son del tipo termomagnéticos, para protección térmica contra sobrecarga y contra cortocircuitos, las manijas de operación llevan marcadas la tensión y corriente nominal, los interruptores están equipados con dos contactos auxiliares para la apertura intempestiva.
 - 01 interruptor de 600 Vac, 3x150 A y 10 kA. en C.C.
 - 03 interruptores de 380 Vac, 3x50 A y 10 kA. en C.C.
 - Capacidad de interrupción: 100 A
 - Números de polos: 4
- **Barras.-** Las barras principales y las derivaciones de barra son de cobre de alta conductibilidad, soportadas por medio de aislantes robustos. Las barras tienen valores nominales de corriente permanente y de cortocircuito que son por lo menos equivalentes a aquéllos del interruptor principal. (barras 3x150 A, 600 V, 10 kA en CD).
- **Alambrado.-** El alambrado de control es un conductor cableado de 7 hilos, de calibre 2.0 mm², con aislamiento termoplástico para una tensión nominal de 600 V. Los conductores que conectan al exterior terminan en regletas, las que están montadas verticalmente y son fácilmente accesibles para la conexión de los cables externos.
- **Protección.-** A todo lo largo del tablero corre una barra de puesta a tierra; la barra es de cobre y está provista de dos grapas, una a cada extremo, adecuadas para la conexión del conductor de puesta a tierra externo, que es un cable de cobre 35 mm.² de sección. Los armazones, bastidores y estructuras de metal no energizadas, están firmemente conectadas a tierra mediante la barra, para la prevención de descargas.

- **Identificación.-** Se tienen rótulos de identificación para las unidades montadas sobre el tablero, así como para los circuitos. Todos los componentes principales instalados en el interior del tablero, están etiquetados para la indicación de posición, teniendo una nomenclatura acorde con los esquemas eléctricos.

4.9.1.11. La Puesta a Tierra.

Es en sí un sistema de puesta a tierra en la casa de máquinas, donde se conectan todas las partes metálicas (masas) que no llevan corrientes, y que pudieran energizarse a causa de averías o fallas externas. La barra ubicada en el tablero de control, sirve como colector de tierras, y un conductor de cobre sin empalmes, conecta la barra con el electrodo del pozo a tierra, el sistema tiene como resistividad un valor inferior a 5 ohmios; esta protección previene a las personas ante posibles contactos accidentales o corrientes de paso.

Características:

- Varilla de cobre de 3/4' x 2.40 m.
- Conductor de Cu AWG de 50 mm² de sección.
- Conector de Cu tipo Anderson de 3/4'.
- Tierra de cultivo humoso negro.
- Sal industrial y gel.
- Caja de registro y tapa de concreto.

4.9.1.12. El Transformador.

El transformador elevador de tensión para la transmisión, es trifásico, refrigerado por aire, y se encuentra exteriormente a la salida de la casa de máquinas, sostenido entre dos postes de madera, juntamente que los cables de conexión, aisladores, terminales, equipos de maniobra y protección, como seccionadores y disyuntores.

Se tiene también sostenida en el poste de madera, una caja metálica con el interruptor de potencia, fusibles y barras de tensión, tal como se aprecia en la foto N° 4.18. Todo el conjunto descrito forma parte de la sub estación de transmisión.



Foto N° 4.18: Transformador de la sub estación sostenido en postes.
Fuente propia.

Características:

- Relación de Tensión : 0.38-0.22/10.5
- Potencia Nominal : 160 KVA.
- Frecuencia . : 60 Hz.
- Altura de trabajo : 4,000 m.s.n.m.
- Grupo de conexión : YnD5 (estrella-delta)
- Regulación de tensión : $\pm 2.5\%$, $\pm 5\%$
- Nivel de aislamiento : 36,000 V.
- Refrigeración : Natural (ONAN) sumergido en aceite,
con cuba de expansión.

4.9.1.13. El Pórtico de Izaje.

Se encuentra dentro de la casa de máquinas, es utilizado como equipo móvil para facilitar los trabajos de montaje y reparación de los equipos. El sistema de izaje lo conforma un tecele de 1.5 toneladas de capacidad de carga, operación manual y accionamiento mediante cadena.

El porta tecele está fabricado con dos columnas y una viga de soporte metálicas, cuyas dimensiones y peso garantizan su estabilidad para la condición de desplazamiento con su carga, el desplazamiento vertical se hace mediante ruedas metálicas, con rodamientos y envoltura de jebe.

4.9.2. Distribución Eléctrica.

- **Cables de Energía.-** La conexión entre el generador y el transformador del lado de baja tensión es en 380 V, se efectúa mediante un cable tripolar de 3 x 120 mm², tipo XLPE. El conductor es de cobre electrolítico, blando, cableado concéntrico, fabricado según norma ASTM B3 y BS. El aislamiento del conductor es de polietileno reticulado, con una tensión máxima de servicio de 0.6/1 kV, y 90°C. de temperatura de operación y una chaqueta exterior de PVC.
- **Distribución Interior.-** Los cables de alumbrado y tomacorrientes en las instalaciones eléctricas de la casa de máquinas son unipolares, con aislamiento para una tensión nominal de 400 V, de tipo TW. El conductor es de cobre electrolítico de alta conductividad, el aislamiento de los cables es AWG y calibre 14, de color blanco, negro y rojo, para las fases R, S y T respectivamente.
- **Tuberías.-** Las instalaciones interiores son con tuberías embutidas en el concreto o piso de cemento, y son de cloruro de polivinilo (PVC), rígido, tipo pesado según el estándar americano, de 3 m de largo. La unión entre tubos es mediante campanas a presión propias del tubo, para la unión de tramos de tubos sin campanas se usan uniones plásticas a presión, las uniones de las tuberías con las cajas, son mediante coplas de PVC.
- **Cajas.-** Están embutidas en el techo o paredes, son de fierro galvanizado, tipo pesado, y se usan para las salidas de alumbrado, interruptores, tomacorrientes, cajas de paso, y en otros puntos que son importantes. Las cajas especiales son de plancha de acero galvanizado de 1.5 mm. de espesor, no tienen huecos ciegos, la tapa se une a la caja por medio de estoboles y cuenta con empaquetadura para tener hermeticidad.

4.9.2.1. Interruptores, Tomacorrientes e Iluminación.

- **Interruptores.-** Son del tipo balancín, 10 A, 220 V, para cargas inductivas hasta su máximo amperaje, están colocados en las cajas tipo condulets rectangulares, para conductores calibre 14 AWG. Las placas de los interruptores son metálicas (F_OG_O).

- **Tomacorrientes.-** Son monofásicos y bipolares, simples, de 20 A, 220 V, con borne de puesta a tierra y cubierta a prueba de agua. Están colocados en cajas rectangulares del tipo condulets, para conductores calibre 14 AWG. Los tomacorrientes trifásicos son tetrapolares, con borne de puesta a tierra.
- **Iluminación.-** Las luminarias interiores son 03 lámparas fluorescentes lineales de 40 W. y 3,250 lúmenes cada una. Par la iluminación exterior se utiliza un artefacto tipo Braquete, que está adosados a la pared, con lámpara de vapor de sodio de 30 W y 220 V. La caja de la lámpara es metálica, la que actúa como reflector y soporte del equipo.

4.10. Impactos de la Central.

El impacto ambiental, visual y sonoro en la zona de ubicación de la planta hidroeléctrica y colindancias es mínimo, sus edificaciones en el área se describen a continuación:

La Bocatoma, construcción pequeña sobre el mismo cauce del río. Canal de conducción abierto de pequeña longitud y próximo al cauce del río. Desarenador y cámara de carga pequeños, y próximos al cauce del río. Tubería de presión, instalada directamente sobre la ladera, con una visibilidad resaltante. Casa de máquinas, es de dimensiones pequeñas, ubicada debajo de la plataforma de la trocha carrozable. El Canal de descarga, parte está debajo de la casa de máquinas y es casi imperceptible.

4.10.1. Impacto Ambiental.

La central no ocasiona ninguna distorsión o alteración dentro del medio ambiente, tampoco se tiene una incidencia dentro de la bio diversidad de la zona, teniendo un bajo impacto ambiental, en referencia a:

- Atmósfera, no se emana ningún tipo de gases tóxicos.
- Emisión de ruidos, mínimo, no causa molestias en el lugar.
- Alteraciones en el aspecto biológico, no distorsiona el medio ambiente en especial la flora.
- Recurso hídrico utilizado, no es contaminado, por el contrario es oxigenado por la turbina en funcionamiento.

- En el aspecto geográfico, no se tiene ninguna alteración en la topografía de la zona circundante.

4.10.2. Impacto Social.

La energía eléctrica es generada en la misma comunidad de Puyca, que comprende cinco sectores beneficiados, cuatro de ellos a través de una línea de transmisión. Los pobladores cuentan con el suministro de energía eléctrica todo el día, para usos como el doméstico, actividades agro-industriales y la escuela primaria.

La energía de calidad mejora su condición de vida, haciéndoles cambiar sus costumbres de vivencia, al tener iluminación nocturna, comunicación, educación para sus hijos, pequeños talleres y la incorporación de artefactos y herramientas eléctricas entre otros usos.

4.10.3. Impacto Económico.

Las zonas del proyecto están clasificadas como de pobreza extrema. Las áreas de cultivo son pequeñas y las inversiones del estado han sido muy limitadas. Hasta hoy las actividades agrícolas se hacen con los métodos tradicionales, de modo que la producción no alcanza a cubrir las necesidades de la población que vegetativamente ha ido creciendo.

Entre las actividades productivas en la zona, predomina la ganadera con la crianza de camélidos como alpacas y llamas, la agricultura esta menor escala en este valle interandino.

La producción de energía eléctrica con niveles de calidad óptimos, mejorara la economía del poblador local con la mayor duración de sus artefactos eléctricos, y por consiguiente, no tener que adquirir otro nuevo, también ahorrara en una menor frecuencia en reparaciones por deterioro de estos.

CAPITULO V

5.1. Diagnóstico de la Central de Coline.

5.1.1. Generalidades.

Este capítulo se centra en el análisis de los equipos de la central, y los parámetros de funcionamiento del sistema de generación de Coline. La elaboración del diagnóstico permite tener información precisa sobre el estado actual de los componentes hidroeléctricos, evidenciando de forma clara las posibles anomalías o fallas visibles que pudieran detectarse, sean estas por desgaste, deterioro, uso de los mismos, o como resultado de una falta de mantenimiento, corrección y reparación, según sea el caso.

La central de Coline como se indicó, es un sistema de generación aislado, con una sola unidad generadora, opera aproximadamente a la mitad su capacidad instalada. La red de distribución cercana, está en baja tensión y es para el centro poblado de Coline, pero se cuenta con sub estaciones que suministran energía en media tensión a otros sectores más alejados.

5.2. Diagnóstico de los Equipos de Generación

El presente diagnóstico determina el estado físico y operativo de los principales componentes mecánicos y eléctricos de la central, llevado a cabo sin interrumpir o parar su funcionamiento, para lo cual se hizo una inspección visual externa minuciosa de cada equipo con la asistencia de un técnico entendido en el tema y la información proporcionada por la persona encargada de la operación y mantenimiento de la central.

Los criterios para la identificación y diagnostico fueron: descripción, funcionamiento, operatividad, estado físico, antigüedad aproximada, fallas visibles y posible límite de vida útil, para cada componente calificado.

5.2.1. Condiciones Ambientales.

En cuanto a las condiciones ambientales del lugar, se tiene una temperatura promedio entre 13 °C y 9 °C dependiendo de la hora y estación del año, una altitud 3,850 m.s.n.m. en

el sector de Coline, la humedad relativa promedio anual es de 55%, propia de la zona que tiene la mayor parte del año neblina y lluvias.

En el interior de la casa de máquinas se evidencia polvo en los componentes, el que ingresa por las aberturas superiores o ventanas sin vidrios, no se aprecia mayor corrosión en las partes metálicas, las que se encuentran debidamente pintadas, la vibración y ruido que se percibe es normal, principalmente por el movimiento de la turbina; factores que también influyen en el funcionamiento de los equipos.



Foto N° 5.1: Casa de máquinas con los equipos hidroeléctricos.
Fuente propia.

5.2.2. Evaluación de Componentes.

La parte hidráulica en la casa de máquinas inicia con, el codo de ingreso de agua y un segmento de la tubería de presión, luego la válvula tipo mariposa, la junta de montaje y la transición redondo-rectangular, el inyector de la turbina, la turbina y finalmente el tubo de desfogue hacia el canal de descarga.

Los equipos electromecánicos de la planta, diagnosticados según los criterios antes mencionados, son:

- a. Turbina: Cross Flow, operativa, en funcionamiento, estado de conservación bueno, fabricación local (sin placa de datos), antigüedad aprox. 12 años, sin polvo ni corrosión

en la carcasa, sin fugas de agua a través de sellos, mantenimiento cada 90 días incluyendo engrase de rodamientos y limpieza exterior.

La turbina esta sin fugas visibles de agua, sin ruidos anormales, se notó una vibración algo mayor a lo normal, la que puede deberse al desgaste de soportes del eje, lo que puede causar desbalanceo, desalineación o daño de cojinetes, la carcasa está fijada adecuadamente y no presenta erosión visible.

- b. Multiplificador: para la velocidad, es marca Flender, operativo, estado de conservación bueno, antigüedad aprox. 12 años, sin polvo ni humedad, con algunas manchas de aceite, mantenimiento como cambio de aceite, filtro y engrase cada 60 días.

Las fugas de aceite son mínimas y están en juntas con empaques o retenes, el cárter está en su nivel de aceite lo que evita el desgaste de engranajes, los rodajes, chumaceras y ejes se encuentran debidamente lubricados con grasa.

- c. Generador: marca MagnaPlus, operativo, en funcionamiento, estado de conservación regular, fabricación americana, antigüedad aprox. 12 años, mantenimiento cada 120 días, engrase de rodamientos y revisión de aislamientos y conexiones, limpieza de bobinado interior, anualmente.

Su funcionamiento es estable, no se aprecia partes sueltas o defectos eléctricos, la vibración mínima, en la caja de borneras los aislamientos de conductores, interruptores y empalmes están en buen estado, no se ve presencia de óxido, y ha sido pintado recientemente.

- d. Regulador de velocidad: marca Jahns, oleomecanico: inoperativo desde hace varios años, requiere reparación, estado de conservación regular, fabricación alemana, antigüedad aprox. 15 años, sin mantenimiento.
- e. Bomba hidráulica: marca C&C S.A. manual de doble efecto, inoperativa, estado de conservación regular, fabricación española, de engranajes, con tanque y palanca de maniobra, antigüedad aprox. 15 años, sin mantenimiento.

- f. Trasformador: marca Delcrosa, trifásico, potencia 160 kVA, relación de transformación, 0.230-0.380/10.5 kV, operativo, estado de conservación regular, ligeramente corroído fabricación Nacional, antigüedad aprox. 12 años, ultimo mantenimiento, hace 2 años.
- g. Tablero de Control: marca SEC, nacional, panel modular, operativo, estado de conservación bueno, los instrumentos de medición funcionando, alarma de aviso desconectada, antigüedad 12 años, el mantenimiento comprende, revisión de instrumentos de medición, conexiones, aislamientos, bornes y fusibles, y limpieza general, lo que se realiza cada 120 días.

Los componentes menores como, válvulas, juntas, ejes, cojinetes, acoples, soportes y anclajes no se diagnosticaron, estando aparentemente en condiciones óptimas de trabajo.

Fuente: Trabajo de campo en sitio.

5.2.3. Pruebas Específicas.

Se pueden realizar pruebas específicas para profundizar el diagnostico, tales como: presión de aceite, fricción en partes móviles, vibración en el eje y cojinetes, ruidos en el tubo de desfogue, nivelaciones, oscilaciones en los acoples, alineamiento del eje, comprobación de tolerancias, verificación de erosión por cavitación, temperatura de los devanados, corriente y voltaje de excitación, ensayo de rechazo de carga y medición del aislamiento, entre otras. Las que podrían identificar algún desperfecto o daño futuro en los equipos, pero para realizarlas se requiere previamente parar la central y contar con los instrumentos adecuados, así como el personal capacitado para tal fin, lo que para este diagnóstico no es necesario.

5.2.4. Alcances Complementarios.

- El sistema de Puesta a Tierra que se tiene en la casa de máquinas mediante pozo y varilla, asegura la protección de personas y equipos ante descargas eléctricas (tensiones indebidas por aislamiento o corrientes de falla), facilitando la ruta para que fluyan las corrientes a tierra.

- No se tiene un sistema de protección para los equipos, en caso de parada repentina, embalamiento, falta de agua en la tubería de presión, tensión de generación fuera de niveles, desconexión por cortocircuito.
- No se cuenta con manuales de operación, protocolos de arranque y parada, planes de mantenimiento preventivo y correctivo, historial de fallas y eventos, ni procedimientos de seguridad en caso de eventualidades en la planta.

5.3. Diagnóstico de Operación del Sistema.

Para el funcionamiento del sistema de generación se tiene que, la turbina trasmite la potencia mecánica necesaria a través de un eje tubular, en el que están acoplados el multiplicador de velocidad, la volante de inercia y el alternador que genera la corriente a través de tres fases que van hacia el tablero de control; luego la sub estación que eleva la tensión para la transmisión de energía mediante las líneas hacia los lugares de consumo.

El caudal de agua ingresa por el distribuidor de la turbina de doble impulsión y circula por la corona de paletas del rodete, desde fuera hacia dentro y luego desde dentro hacia fuera, dándose así el movimiento giratorio, en esta condición se verifica que:

En operación normal de la central, el alabe del distribuidor está posicionado con una apertura de 50% de la sección de paso o 150 l/s., que es lo usualmente encontrado la mayor parte del día; para este caudal, la velocidad del grupo es estable pero en cortos periodos de tiempo.

Con un aumento o disminución de la carga demandada, se presentan oscilaciones con variación en la tensión y frecuencia, fuera de un rango aceptable. Esto se produce durante las horas diurnas, siendo más estables los valores en la noche (de 9:00 pm. a 5:00 am.).

Los instrumentos de medición del tablero de control de la central, el día que se realizó el diagnostico registraron:

- Frecuencia fuera del rango, de 52 a 66 Hz. debido a variaciones de la velocidad angular del alternador, especialmente en el arranque de motores o cargas resistivas altas.
- Variaciones de tensión de 210 a 260 V. especialmente en el arranque de motores.

- Variaciones de corriente en forma abrupta, de 30 a 90 A., eventualmente durante el día.
- La potencia demandada varió en más 35 kW. en el día, con un factor de potencia menor o igual a 0.7, y predominio de cargas resistivas e inductivas.

En el arranque los motores demandan una corriente mayor que su nominal, no obstante, de ser un evento transitorio se afecta la estabilidad de la frecuencia y voltaje.

Como cargas resistivas altas se pueden considerar a, cocinas, duchas y calefactores eléctricos, cuyo consumo de cada uno generalmente es mayor a 3,000 vatios.

5.3.1. Comportamiento del Sistema de Generación.

El sistema de generación de Coline, tiene continuamente fluctuaciones instantáneas de carga que pueden alcanzar más de 40 kW., esto hace que la velocidad de giro del rotor varié continuamente y como consecuencia se pierda la velocidad de sincronismo que es 1,800 rpms.

Para estabilizar la velocidad y acercarla a la nominal, se regula el caudal, moviendo manualmente la posición del alabe directriz, pero al tener un accionamiento mecánico lento, no se logra la rapidez de respuesta ante las variaciones de carga, por tanto, no se obtiene una velocidad constante para el grupo generador.

El operador de la central debe estar atento a las variaciones de frecuencia fuera del límite, compensando estas modificando el caudal que ingresa a la turbina. Esta operación se realiza de dos formas, girando la válvula que esta antes de la turbina con la regulación gruesa, o accionando la posición del alabe directriz mediante una manija.

Con la regulación manual de caudal, es difícil garantizar de forma eficaz que la frecuencia se mantenga estable o cercana a los 60 hercios. En los periodos que no se realiza el control de velocidad manual por el operador, la respuesta del sistema de generación a los cambios de carga demandada está determinado por dos parámetros, la constante de inercia y la de amortiguamiento, ambas de las masas giratorias de la central.

Fuente: Trabajo de campo en sitio.

CAPITULO VI

6.1. Estudio de la Demanda.

6.1.1. Comportamiento de la Demanda.

El análisis y cuantificación de la demanda de energía eléctrica, es una parte importante para el estudio de automatización de la regulación de velocidad de la central, el resultado debe aportar el consumo actual en kW/h, de la población que está en el área de influencia de la planta hidroeléctrica, además con dicho consumo se podrá proyectar la demanda para un horizonte que puede ser 20 años o más.

En el caso de comunidades que nunca han tenido servicio de energía eléctrica la determinación de la demanda de energía, debe hacerse por medio de encuestas, con lo que se establece el consumo promedio de energía eléctrica, sus usos principales, como también las actividades socioeconómicas de la población entre otros aspectos, a más de tomar como referencia a poblaciones rurales con características similares, para obtener la información que permita estimar el consumo en kilovatios.

Al no estar conectada a ningún sistema eléctrico, la comunidad de Puyca es atendida en su demanda energética por la central de Coline, la que es operada por la propia comunidad de manera básica y limitada, por lo cual entre otros aspectos no se cuenta con registros de consumo de potencia cronológica, dato importante para saber el comportamiento de la demanda eléctrica.

6.1.2. Estimación de la Demanda.

Para el dimensionamiento de la potencia de consumo en viviendas podemos tomar en cuenta la siguiente cita, *“Este consumo debe sustentarse comparando los consumos de localidades similares y cercanas al área de influencia del proyecto, esta similitud comprende criterios como zona geográfica, tamaño de localidad, nivel de dispersión entre usuarios, distancias y vías de acceso al principal foco de desarrollo. También se comparan las características socio-económicas”*.

Referencia: Guía para la formulación de proyectos de inversión del M.E.F.

El trabajo analítico y de campo contemplo los siguientes aspectos:

6.1.2.1. Ubicación y levantamiento de información.

Estadística sobre la población involucrada en el estudio como, ubicación geográfica, tipo de población, número de viviendas, servicios básicos, actividades económicas y vías de acceso.

6.1.2.2. Preparación de ficha de encuesta

Con preguntas que permitan cuantificar la demandada de energía por vivienda, el equipamiento eléctrico con que cuenta y los principales usos que se le da a esta. La que deberá ser aplicada a una muestra de la población, contrastando luego estos datos.

6.1.2.3. Objetivos.

Determinar el consumo promedio de energía en los centros poblados de Coline y Fause, para establecer la demanda. Para alcanzar este objetivo, se aplicó la siguiente metodología de cálculo, que permitió obtener la información requerida.

6.1.3. Ficha de Encuesta.

Como parte del mecanismo de captación de datos sobre las principales características del consumo de energía, con el propósito de determinar la demanda, se aplicó una encuesta directa, en viviendas que cuentan con este servicio, la primera quincena del mes de diciembre del año 2017

Se diseñó un cuestionario específico para el muestreo, y se aplicó a una muestra representativa de la población beneficiaria de la electrificación, (el 51 % del total de viviendas), para conocer el consumo eléctrico por familia en sus actividades domésticas. El modelo de la ficha de encuesta está en el Anexo B.

6.1.3.1. Datos Estadísticos:

Lugar:	Comunidad de Puyca.
Sectores Involucrados:	Coline y Fause.
Características de la zona:	Valle alto andino.
Tipo de población:	Rural, de baja densidad y dispersa.
Nivel socioeconómico:	“E”, bajo de subsistencia.

Número de Viviendas:	31 encuestadas.
Migración e emigración:	Ha tenido emigración en los últimos años.
Actividades productivas:	Agricultura y ganadería.
Vías de acceso:	Trocha carrozable, desde el desvió.
Medios de transporte:	Servicio público, 3 veces por semana.
Finalidad:	Determinar el consumo eléctrico.

6.1.3.2. Alcances del trabajo de Campo.

El trabajo de campo proporcionó información sobre aspectos socioeconómicos, consumo y usos de la energía eléctrica, analizada esta data se tiene lo siguiente:

Las viviendas en su totalidad son en edificaciones pequeñas, de uno y dos pisos, construidas en adobe y piedra, con techo de teja o cobertura de calamina, y puertas y marcos de ventanas de madera.

En su mayoría las familias son de cuatro miembros, los padres con hijos menores, generalmente dos o tres. Su principal sustento económico del hogar es la agricultura y ganadería, y en algunos casos el comercio.

Los requerimientos de energía eléctrica en los sectores encuestados son relativamente bajos, además se aprecia una tendencia a mantener un promedio de consumo. Esto es notorio al compararlo con otras poblaciones rurales similares.

En lo referente a la cocción de alimentos, esta se realiza de dos formas: con leña en fogón y con pequeñas cocinas eléctricas (de una o dos hornillas). Esto representa alrededor de la tercera parte del gasto total de energía eléctrica en el hogar.

El consumo de energía eléctrica en los hogares respecto a la estacionalidad, es decir si perciben que en algunas épocas o meses del año consumen más electricidad; la mayoría respondió que mantiene el mismo consumo todos los meses.

Un aproximado de 60 familias viven en forma permanente en el lugar, y son las beneficiarias de la electricidad (empadronadas en los anexos), así mismo, se pretende iniciar algunas pequeñas actividades agroindustriales a futuro.

6.1.4. Promedio de Consumo.

De la información recogida en la encuesta, se determinó primero la potencia eléctrica instalada por vivienda (ver cuadros A-1 y A-2, del Anexo C), esta fue de 800 Watts en promedio, por ser el que alcanzo el mayor porcentaje, con un 39% de las viviendas, para familias de aprox. cuatro miembros, el resumen se detalla en el gráfico N° 6.1; luego el consumo promedio por vivienda, el que se determinó en 320W, considerando un Factor de Demanda de 0.4, valor acorde al lugar y grupo socioeconómico de la población.

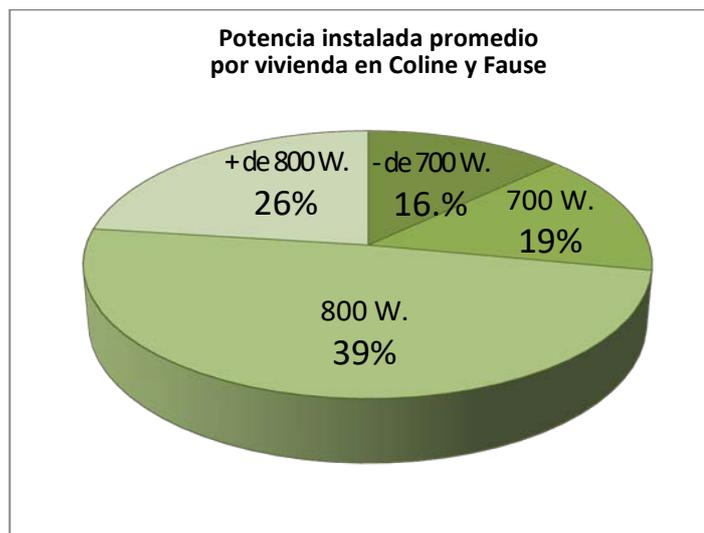


Figura N° 6.1: Potencias instaladas promedio en viviendas encuestadas.
Fuente: Elaboración propia.

La central de Coline, trabaja actualmente al 50% de su capacidad de generación, pero se tiene previsto una ampliación de la cobertura para 40 viviendas más, en lugares que aún no tiene energía y para otros usos. Consiguientemente, se podría tener un incremento de la demanda eléctrica como consecuencia de:

- Ampliación de la cobertura eléctrica.
- Ampliación del alumbrado público.
- Instalación de una posta médica.
- Proyecto de pisigranja y curtiembre.

El cuadro N° 6.1, que sigue, muestra los periodos de tiempo y el tipo de actividad de los pobladores de la comunidad de Puyca.

Cuadro N° 6.1: *Periodos y actividades realizadas durante el día.*

Periodo (hrs)	Actividad
0 a 4	descanso
4 a 6	desayuno
6 a 11	actividad agrícola
11 a 13	almuerzo
13 a 17	actividad agrícola
17 a 18	cena
18 a 20	recreación
20 a 24	descanso

Fuente: Elaboración propia.

Básicamente el uso de la energía eléctrica está orientado para atender la: cocción de alimentos, iluminación en casas, artefactos domésticos, alumbrado público, la escuela primaria y pequeños talleres.

En el cálculo de la demanda de potencia máxima, debe conocerse la potencia aparente de cada equipo, y corresponden a una de las tres cargas de uso general, en las instalaciones eléctricas de los usuarios.

- Cargas resistivas (cocción de alimentos, calefacción, lámparas incandescentes, otros), su potencia aparente consumida es igual a la potencia nominal indicada por el fabricante, ya que las mismas no consumen potencia reactiva.
- Dispositivos de estado sólido, en aparatos electrónicos diversos; en estas aplicaciones la forma de onda de la corriente demandada por el receptor no es sinusoidal, sino que aparecen armónicos.
- Motores de inducción, (taladros, amoladoras, esmeriles y sierras circulares, otros), en el arranque los motores utilizados en estos equipos, demandan una corriente mucho mayor que su corriente nominal.

En base a las potencias de cada receptor se calcula la potencia de la instalación o vivienda, considerando los Factores que tienen en cuenta, la *Utilización* (no operación a plena carga de cada receptor) y la *Simultaneidad* (operación no simultánea de todas las cargas de los usuarios), los que se abordan más adelante.

En referencia a la calidad y continuidad del servicio eléctrico, en el primer caso la respuesta fue “regular” mayoritariamente, en el segundo caso “bueno”; evaluándose esto por el número de meses al año y número de horas al día que se cuenta con electricidad. Al respecto, se tiene el servicio 11 meses al año y las 24 horas al día; las interrupciones se deben generalmente a cortes por mantenimiento o reparación de la central.

6.1.5. Calificación Eléctrica.

La calificación eléctrica es de 300 W. de potencia por vivienda. En el sector de distribución típico 1, dispuesto como centro poblado o viviendas en zonas rurales dispersas.

Referencia: Calificación eléctrica para la elaboración de proyectos de subsistemas de distribución secundaria del M. de E.M.

“Para una vivienda típica del nivel socio económico E (zonas de extrema pobreza), el total del consumo en kW/h por mes, es de 14.”

Referencia: Guía para el cálculo de consumos de energía del Osinergmin.

6.2. Cálculo de la Demanda

Considerando un factor de simultaneidad para vivienda de 0.5 (mínimo recomendado), y para alumbrado público de 1. (todo encendido al mismo tiempo).

- **Demanda Residencial:** para hallarla se tiene la siguiente relación:

$$DR = C \times P_i \times F_s \quad \dots (6.1)$$

Dónde:

DR: Demanda residencial.

C: Número de viviendas.

P_i: Potencia instalada.

F_s: Factor de simultaneidad.

Con un total 60 viviendas, una potencia instalada de 800W/vivienda y un factor de simultaneidad de 0.5; tenemos DR = 24 kW. Para hallar la energía se tiene: DR por 2h/día, (ver cuadro A-3 del Anexo C), lo que da 48 kW/h.

- **Demanda Institucional:** Se tiene una institución educativa que es la escuela primaria, cuya potencia de consumo es aprox. 1000 W, (Fs igual a 1) y 6h/día de uso, entonces la energía consumida será 6 kW/h.
- **Alumbrado Público:** multiplicamos el número de lámparas, por su potencia nominal y por Fs.

$$AP = L \times PL \times Fs \quad \dots (6.2)$$

Dónde:

AP: Demanda de alumbrado público.

L: N° de lámparas de alumbrado público.

PL: Potencia por lámpara.

Con 60 W/lámpara, (luminaria de vapor de sodio más balastro), 14 lámparas y Fs igual a 1, tenemos una demanda de alumbrado público de 840 W, con, y 12h/día encendidas, se tiene un energía de 10 kW/h.

6.2.1. Diagrama de Carga.

Que es la representación gráfica del comportamiento de la demanda del sistema de generación (intervalo de 24 h. o cronológico horas/día), y fue realizado el 1 de diciembre del año 2017; se tiene fluctuaciones de consumo de potencia, como la comprendida entre la mínima demanda (valle), a las 3:00 hrs. y la máxima demanda (pico), a las 15:45 hrs.

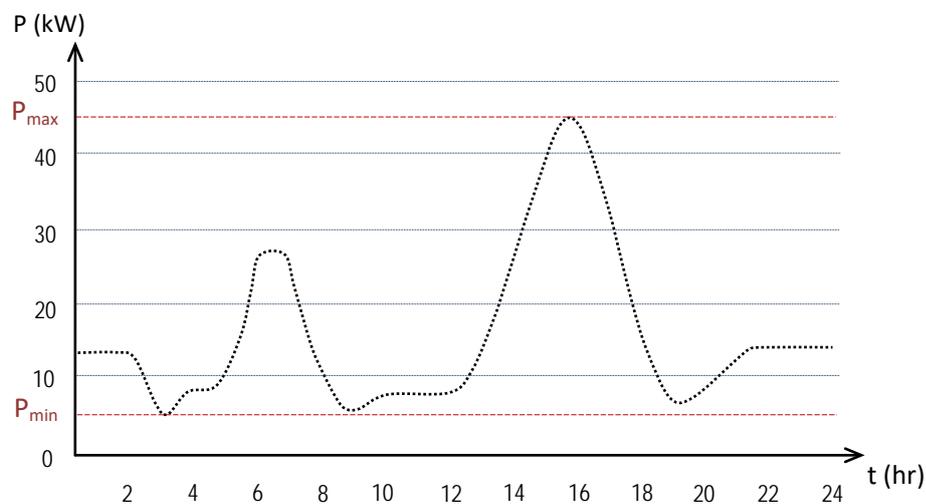


Figura N° 6.2: Curva de variación de la demanda diaria.
Fuente: Elaboración propia.

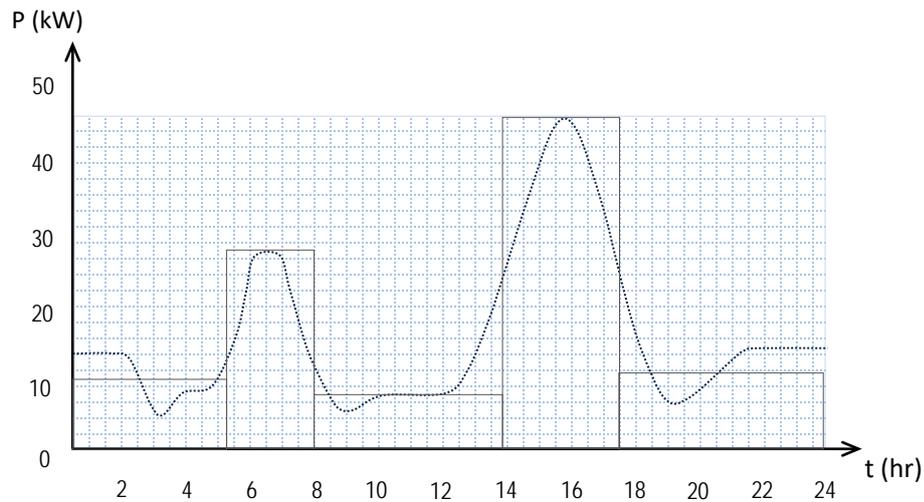


Figura N° 6.3: Cuadrícula para hallar el área bajo la curva de demanda.
Fuente: Elaboración propia.

6.2.2. Parámetros Hallados.

6.2.2.1. Energía Consumida (E_c).

Es el área que se encuentra bajo la curva de demanda, se puede determinar mediante la cuadrícula del gráfico, siendo la E_c en Kw/h:

$$\frac{\sum_0^{24} \text{cuadrados bajo la curva}}{470 \times 1\text{kW/h}} \quad \dots (6.3)$$

6.2.2.2. Factor de Carga (F_c).

Es el cociente entre la energía total consumida y la máxima demanda por el periodo de tiempo considerado, entonces se tiene:

$$F_c = \frac{\text{Energía total producida}}{\text{max.demanda} \times \text{periodo de tiempo}} \quad \dots (6.4)$$

$$F_c = \frac{470 \text{ kW/h}}{47 \text{ kW} \times 24 \text{ h}} = 0.4 \quad \dots (6.5)$$

6.2.2.3. Potencias Consumidas.

- Potencia Máxima: (P_{\max}).

Del diagrama de carga, se tiene que la potencia máxima o pico es: $P = 47 \text{ kW}$.

- Potencia Minina: (P_{\min}).

Del diagrama se tiene que la potencia minina o valle es: $P = 5 \text{ kW}$.

- Potencia Media.- (P_m): se determina la energía E , o el área bajo la curva de demanda, y se divide entre 24 horas.

$$P_m = E/t = 29. \text{ kW.} \quad \dots (6.6)$$

6.2.2.4. Factor de Simultaneidad (F_s).

Normalmente, la operación simultánea de todas las cargas de un sistema, no ocurre, habiendo siempre determinado grado de diversidad, que se expresa mediante el factor de simultaneidad.

Se define como el cociente entre la demanda máxima simultánea, y la suma de las demandas máximas de cada carga o individuales. Posibilidad de que un número de usuarios utilicen el mismo equipo en el mismo momento, varía entre 0 y 1.

$$F_s = \frac{\text{demanda maxima simultanea}}{\sum \text{demandas max. de cada carga}} \quad \dots (6.7)$$

$$F_s = \frac{D_{ms}}{\sum D_{mi}} \quad \dots (6.8)$$

6.2.2.5. Factor de Utilización (F_u).

En condiciones de operación normal, la potencia consumida por una carga es algunas veces menor que la indicada como su potencia nominal. Para el cálculo, se define el Factor de Uso como, el cociente entre la potencia efectivamente demandada por la carga y la potencia nominal de la misma.

La intensidad o factor en el uso de los equipos, varía entre 0 y 1.

$$F_u = \frac{\text{potencia demandada por la carga}}{\text{potencia nominal de la misma}} \quad \dots (6.9)$$

$$F_u = \frac{P_e}{P_n} \quad \dots (6.10)$$

CAPITULO VII

7.1. Fundamentos de la Regulación de Velocidad.

7.1.1. Introducción.

El objetivo de este capítulo es revisar aspectos teóricos generales de los sistemas dinámicos y la regulación de velocidad, que abarca al conjunto turbina y el generador. Para luego explicar analíticamente el comportamiento físico de los elementos que intervienen en el funcionamiento del sistema de control de velocidad. En el caso particular de la estabilidad de velocidad y frecuencia, esto requiere para su análisis de una representación detallada de la dinámica de todos los elementos del conjunto y sus ecuaciones de equilibrio mecánico y eléctrico.

7.2. Comportamiento Dinámico.

7.2.1. Masas Rotativas.

Una turbina hidráulica que acciona a un generador eléctrico, puede ser representada por una “gran masa rotativa” con dos torques opuestos, uno mecánico “ T_m ” y otro eléctrico “ T_e ”; tal como se muestra en el esquema de la figura N° 7.1.

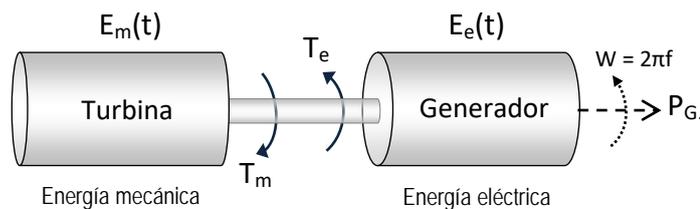


Figura N° 7.1: Conversión de energía mecánica en energía eléctrica.

Fuente: Zenteno, V. - Sistema de control automático de velocidad de generadores eléctricos.

En el generador y turbina, el movimiento de las masas rodantes conocidas como “rotor y rodete”, está determinado por la Segunda Ley de Newton, a partir de la cual se tiene la expresión matemática siguiente:

$$T = J \cdot \alpha \quad \dots (7.1)$$

Dónde:

T = torque aplicado al rotor, (Kg-m).

J = momento de inercia, (Kg-m²).

α = aceleración angular, (rad/s²).

Entonces, el torque “T” se puede definir como el momento de inercia de la máquina por la aceleración rotacional que experimenta.

También la aceleración angular del rotor está dada por:

$$\alpha(t) = \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} \quad \dots (7.2)$$

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad \dots (7.3)$$

Dónde:

ω = velocidad angular, (rad/s).

θ = posición angular del rotor con respecto a los ejes, (rad).

Referencia: Duncan, J. y Mulukutla, S. - Sistemas de potencia, análisis y diseño.

El generador síncrono en régimen permanente, tiene el torque mecánico igual al torque eléctrico. Ocurriendo un desequilibrio entre los torques actuantes en el rotor, el torque resultante que causa la aceleración o desaceleración está dado por:

$$T_{res} = T_m - T_e \quad \dots (7.4)$$

Dónde:

T_{res} = torque resultante neto (N.m.)

T_m = torque mecánico proporcionado por la turbina.

T_e = torque eléctrico debido a la demanda de energía.

Cuando hay un cambio de carga, este se refleja inmediatamente como un cambio en el torque eléctrico. Entonces se tienen las siguientes tres posibilidades:

[1] Cuando la carga eléctrica del sistema aumenta, entonces la velocidad del rotor disminuye.

$$T_e(t) > T_m(t) \quad \dots (7.5)$$

- [2] Cuando la carga eléctrica del sistema disminuye, entonces la velocidad del rotor aumenta.

$$T_e(t) < T_m(t) \quad \dots (7.6)$$

- [3] Cuando la carga eléctrica del sistema no varía, entonces la velocidad del rotor se mantiene constante, (condición ideal del sistema).

$$T_e(t) = T_m(t) \quad \dots (7.7)$$

Esta variabilidad en los cambios de torques en función de las cargas del sistema, causa la consecuente variación de velocidad del grupo turbina y generador.

7.2.2. Inercia del Sistema.

Una vez se presenta la desviación de velocidad, la energía cinética almacenada en el rodete de la turbina y rotor del generador es liberada para hacer más lenta esta desviación y por lo tanto, más fácil de regularla. En el sistema de generación, la inercia de todas las masas rodantes, se define como, el tiempo necesario para acelerar esta, desde el reposo hasta alcanzar su velocidad de rotación de diseño.

La respuesta inercial del sistema es acelerada por la diferencia de los torques aplicados, dando un torque resultante, y está dada por la ecuación diferencial del movimiento en relación al tiempo, es decir:

$$T_{res} = J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e \quad \dots (7.8)$$

La ecuación anterior puede ser normalizada en función de la constante de inercia, en p.u.

$$H = \frac{J\omega_m^2}{2VA_{base}} \quad \dots (7.9)$$

Dónde:

H = constante de inercia o energía cinética.

(en Watt, rad/s, entre VA_{base}).

ω_m = velocidad angular nominal.

y el momento de inercia en función de H es:

$$J = \frac{2H}{\omega_m^2} VA_{base} \quad \dots (7.10)$$

Substituyendo en función del torque, tenemos:

$$T_m - T_e = \frac{2H}{\omega_m^2} VA_{base} \frac{d\omega_m}{dt} \quad \dots (7.11)$$

y arreglando:

$$2H \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega_r}{\omega_m} \right) = \frac{\bar{T}_m - \bar{T}_e}{VA_{base}/\omega_m} \quad \dots (7.12)$$

los sub índices, m = masa rotante y r = radio de inercia.

Como, $T_{base} = VA_{base} / \omega_m$, la ecuación del movimiento en “por unidad”, queda:

$$2H \left(\frac{d\bar{\omega}_r}{dt} \right) = \bar{T}_m - \bar{T}_e \quad \dots (7.13)$$

$$\frac{d\bar{\omega}_r}{dt} = \frac{1}{2H} \bar{T}_{net} \quad \dots (7.14)$$

Integrando con relación al tiempo, se tiene:

$$\bar{\omega}_{res} = \frac{1}{2H} \int_0^{t_a} \bar{T}_{res} \cdot dt \quad \dots (7.15)$$

t_a : tiempo de arranque mecánico (en seg.), en el cual el torque “ T_{res} ”, acelera el rotor, desde el reposo hasta la velocidad nominal, y está dado por:

$$T_a = \frac{J \cdot \omega}{P_{max}} \quad \dots (7.16)$$

Dónde:

J = momento de inercia ($m \cdot r^2$).

ω = velocidad de rotación.

P_{max} = potencia máxima.

El parámetro de “Alievi” determina el comportamiento del agua dentro de la tubería de conducción o forzada, y está dado por.

$$r = \frac{Q \cdot a}{2g \cdot H \cdot S} \quad \dots (7.17)$$

Dónde:

a = velocidad de las ondas (en el conducto equivalente).

g = aceleración de la gravedad.

Si “ r ” es superior a 1, el agua en el conducto tiene un comportamiento de golpe de ariete de masa. Si “ r ” es inferior a 1, el agua presenta un comportamiento de golpe de ariete de onda.

Disminuyendo los tiempos de apertura y cierre del regulador, se puede mejorar la estabilidad del sistema, pero no puede hacerse arbitrariamente, dado que debe garantizarse que la presión de *golpe de ariete* se mantenga dentro de límites de diseño.

7.3. Sistema de Generación.

Si tenemos una unidad de generación eléctrica alimentando una carga local aislada, el control o regulación de velocidad y frecuencia, se realiza variando el torque mecánico de accionamiento de la turbina, que a su vez es función del flujo del agua; esta función la realiza el regulador de velocidad la turbina, en lo que se conoce como regulación primaria, luego, podemos representar su posición y funcionamiento mediante el siguiente esquema.

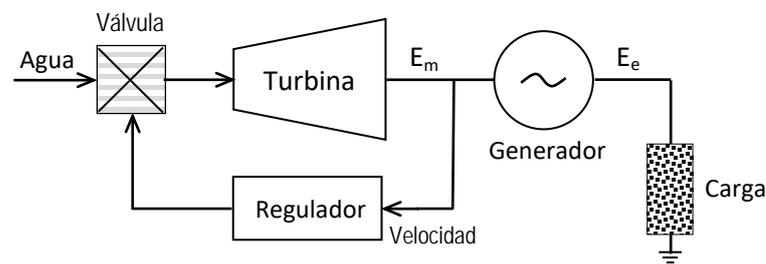


Figura N° 7.2: Generación hidroeléctrica alimentando una carga aislada.
Fuente: Elaboración propia.

7.3.1. Análisis del Generador.

La masa en rotación del generador síncrono conocida como rotor, y que experimenta un momento angular, tiene la siguiente expresión:

$$M = \omega \cdot J \quad \dots (7.18)$$

Dónde:

M = momento angular, (Kg-m²/s).

La potencia de la máquina, está relacionada con la velocidad angular y el torque que obtiene, a partir de esto se tiene:

$$P_{res} = \omega \cdot T_{res} = \omega (J \cdot \alpha) = M \cdot \alpha \quad \dots (7.19)$$

Dónde:

P_{res} = potencia resultante.

T_{res} = torque resultante.

Para condiciones iniciales, en $t = 0$, además $T_m(0)$, $T_e(0)$ y $\omega(0)$:

$$[T_m(0) - T_e(0)] + [\Delta T_m - \Delta T_e] = I \frac{d(\Delta\omega)}{dt} \quad \dots (7.20)$$

Pero:

$$\alpha = \frac{dv}{dt} \quad \text{ó} \quad \alpha = \frac{d(\Delta\omega)}{dt} \quad \dots (7.21)$$

En condiciones iniciales asumimos que $T_m = T_e$, entonces:

$$\Delta T_m(t) - \Delta T_e(t) = \omega_0 I \frac{d(\Delta\omega)}{dt} = M \frac{d(\Delta\omega)}{dt} \quad \dots (7.22)$$

$$\Delta T_m(t) - \Delta T_e(t) = \omega_0 I \frac{d(\Delta\omega)}{dt} = M \cdot \alpha \quad \dots (7.23)$$

Utilizando la transformada de *Laplace*, en el dominio de la frecuencia, con la variable compleja “s”, se tiene:

$$\Delta T_m(s) - \Delta T_e(s) = M(s) \cdot \Delta\omega(s) \quad \dots (7.24)$$

Arreglando y poniendo en función de la constante de inercia “ H ”, si se sabe que el momento $M = 2H$.

$$\Delta\omega(s) = \frac{1}{M(s)} [\Delta T_m(s) - \Delta T_e(s)] \quad \dots (7.25)$$

$$\Delta\omega(s) = \frac{1}{2H(s)} [\Delta T_m(s) - \Delta T_e(s)] \quad \dots (7.26)$$

La relación entre la variación del torque mecánico y eléctrico, y el cambio de velocidad angular, se muestra en el diagrama con la función de transferencia.

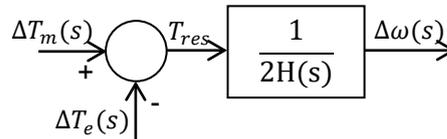


Figura N° 7.3: Diagrama en función de los torques actuantes.

Se analiza de manera similar para la variación de potencia y la respuesta inercial, se muestra el diagrama con la función de transferencia.

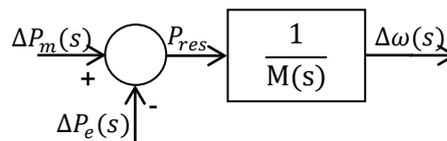


Figura N° 7.4: Diagrama en función de las potencias actuantes.

7.3.2. Análisis de la Carga.

La carga del sistema eléctrico, puede estar compuesta por dispositivos inductivos, resistivos, componentes electrónicos y otros. Para cargas resistivas la potencia eléctrica es independiente de la frecuencia; para motores la potencia eléctrica (activa), varía con la frecuencia y a su vez con la velocidad del motor. La característica de dependencia con la frecuencia de una carga compuesta por diversos dispositivos, puede ser representada como:

$$P_e = V \cdot I \cdot \cos\varphi \quad \dots (7.27)$$

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D\Delta\omega \quad \dots (7.28)$$

Dónde:

P_e = potencia eléctrica activa, (watts).

ΔP_L = variación de carga (independiente de la frecuencia).

$\Delta\omega$ = variación de carga (dependiente de la frecuencia).

D = coeficiente de amortiguamiento.

La diferencia entre la generación y la carga, producirán variación porcentual en la frecuencia, cuyo valor dependerá del coeficiente de amortiguamiento del sistema.

$$\Delta P_L(\text{frec}) = D \cdot \Delta \omega \quad \dots (7.29)$$

D, puede ser expresado, como un cambio porcentual de la carga, sobre el cambio porcentual en la frecuencia.

$$D = \frac{\Delta P_L}{\Delta \omega} \quad \dots (7.30)$$

Ejemplo: Si la carga cambia en 1.5%, frente a un cambio del 1% de la frecuencia, entonces $D = 1.5$.

El diagrama de bloques del generador, incluyendo el efecto de la amortiguación de la carga; con el momento angular, $M = 2H$, y $D =$ amortiguación.

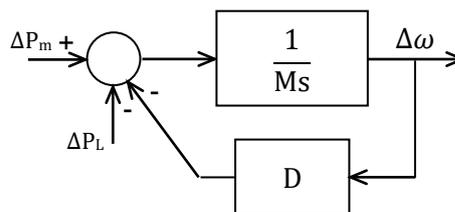


Figura N° 7.5: Diagrama del generador con amortiguación de la carga.

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.

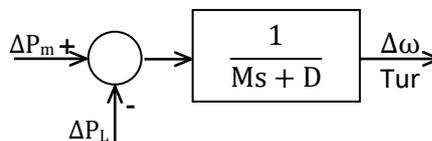


Figura N° 7.6: Diagrama de bloques reducido del generador.

7.3.3. Análisis de la Turbina.

Las variables en el modelo matemático de la turbina hidráulica son las siguientes:

T_{ch} : constante de tiempo de carga.

ΔP_v : cambio de la posición nominal de la válvula (admisión).

Con estos datos tenemos, la función de transferencia y el diagrama de bloque que se muestra.

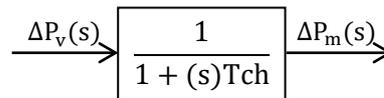


Figura N° 7.7: Diagrama de bloques de la turbina hidraulica.

Uniendo ambas expresiones, tenemos el diagrama de bloques de la turbina y el generador.

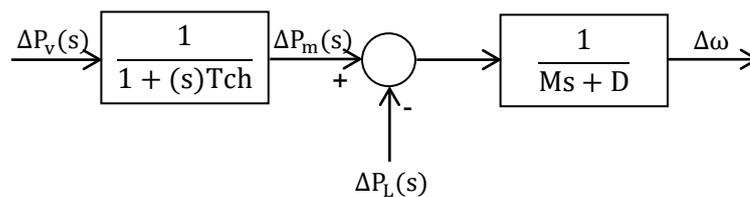


Figura N° 7.8: Turbina y generador con amortiguación de la carga, en lazo abierto (sin realimentación).

El grupo puede tolerar generalmente una variación de tensión de hasta +/-10 V, sin mayor problema; en cuanto a la variación de frecuencia, en la mayoría de los casos no debe ser mayor a 2 Hz. Los Reguladores de Voltaje Automático o AVRs, modernos, mantienen el voltaje constante solo en un determinado rango de frecuencia.

7.3.4. Aumento de la Inercia.

El dispositivo que amortigua y reduce las oscilaciones del conjunto turbina-generador al aumentar su inercia, provocando un retardo en los cambios se le conoce como *Volante de Inercia*, es un elemento totalmente pasivo, actúa en combinación con el regulador de velocidad, acelerando o frenando al grupo, al tiempo que atenúa los vaivenes de velocidad del mismo en irregularidades como cambios de régimen y carga o descarga brusca.

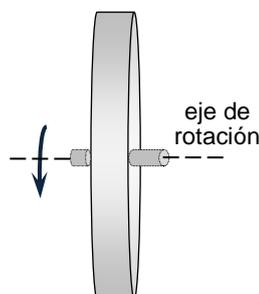


Figura N° 7.9: Volante de inercia, disco solido metálico sostenido en el eje.

La característica dinámica de la volante, es su *Momento de Inercia* respecto al eje de rotación.

También, un factor importante en la inercia del sistema, es el tamaño, longitud y trayectoria de la conducción del agua a la central. Si se aumenta las dimensiones de la conducción podría disminuirse la inercia del conjunto de generación.

Las masas en rotación como el rodete, el rotor o la volante, tienen un Factor de Inercia “*F*”. Para cumplir determinadas condiciones de regulación, el factor debe tener un valor mínimo, que en algunos casos es suficiente al sumar el de la turbina y el generador, sin necesidad de incluir una Volante de Inercia, mientras que en otros puede que no sea suficiente, por lo que habrá que incluir la *volante* en el eje del grupo, y cuyo factor de inercia (dato de fabricación) complementa al del total.

$$\text{Momento de inercia:} \quad J = \frac{G_d \cdot D_m^2}{4g} \quad \dots (7.31)$$

$$\text{Factor de inercia:} \quad F = G_d \cdot D_m^2 \quad \dots (7.32)$$

Dónde:

G_d = peso del disco volante (N).

D_m = diámetro medio del disco (m).

g = aceleración de la gravedad 9,01 (m/s²).

7.4. Estudio de la Estabilidad del Sistema

La estabilidad es la capacidad del sistema eléctrico de retornar al sincronismo frente a perturbaciones fuertes, tanto en régimen permanente como transitorio, manteniendo un balance de torques en el eje del grupo de generación, de manera que no aumente la diferencia de estos de forma indefinida. Las perturbaciones que ocurren pueden ser, una falla en la línea de transmisión, la salida de operación del generador o una pérdida importante de carga, las que son consideradas contingencias severas y podrían causar la pérdida de sincronismo o estabilidad.

La estabilidad también se puede definir como la condición por la cual los eventos transitorios del sistema consecutivos a una variación de carga, desaparecen conforme

transcurre el tiempo; matemáticamente esta condición se cumple cuando las raíces de la ecuación características del sistema, son números reales negativos o números complejos conjugados. Según esto, a partir de la función de transferencia del sistema es posible definir si el proceso de regulación es estable o no.

Para el análisis de la estabilidad en un evento transitorio, como una variación brusca de carga, se debe simplificar la ecuación característica del sistema y reducirla a una de segundo orden, debido a que:

$$\lambda = \omega\sqrt{1 - \alpha^2} \quad \dots (7.33)$$

Dónde:

λ : coeficiente que relaciona α , con ω

y limita el periodo de la onda.

α = aceleración angular (del rotor).

ω = velocidad angular (del rotor).

En el siguiente gráfico se muestra la curva de estabilidad, cuantificada con el segmento $A_2 < A_1$

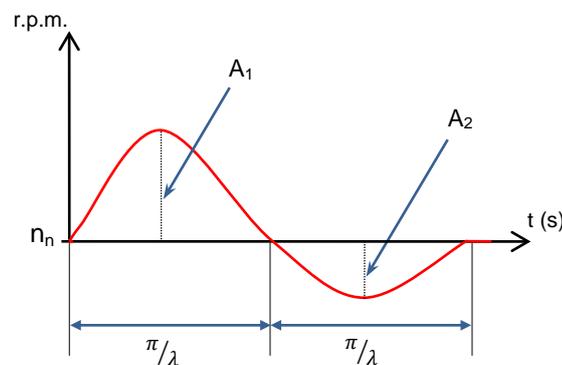


Figura N° 7.10: Curva de estabilidad en una variación de carga demandada.
Fuente: Suárez, L. - Regulador de velocidad eléctrico electrónico de turbinas.

En el gráfico N° 7.10 mostrado, el análisis de la estabilidad (velocidad), se realiza para una variación brusca de carga; primero se quita el 60% de la carga, luego se aumenta el 60% de la carga, entonces se ve que la curva del proceso transitorio se invierte y se amortigua.

Los modos de frecuencia están continuamente excitándose y amortiguándose por las características dinámicas del sistema de potencia. Para estabilizar el generador, se debe

tratar de mantener la velocidad de rotación de diseño y la frecuencia constante, cuando se presenta una perturbación o variación de carga en el sistema; donde se correlaciona el tiempo de respuesta del regulador de velocidad, el momento de inercia del grupo de generación y las características transitorias del conducto o tubería de presión.

Aun actuando la regulación de velocidad, siempre habrá una cantidad de desviación de la velocidad de rotación, y esta dependerá de:

- El tiempo requerido para alterar el flujo del aceite hidráulico del sistema de regulación que corresponda con la acción por el cambio de carga.
- La cantidad de efecto volante de la masa rotativa (rodete, rotor, volante), en otras palabras de la constante o momento de inercia del conjunto.
- El tiempo requerido por el flujo de agua para responder a la acción causada por el cambio en el punto de operación de la turbina.

La variación de velocidad de rotación se puede expresar en función del factor de amortiguamiento y de un tiempo de establecimiento. Estas cantidades no se pueden medir directamente, pero se pueden deducir de la respuesta medida de la unidad ante una perturbación que ocasiona desviaciones de velocidad.

7.4.1. Análisis de Estabilidad de la Central.

Se tiene la central hidroeléctrica alimentando una carga, con la turbina representada por un modelo matemático lineal y el regulador de velocidad por una ganancia $K_G=1/R$, como el generador representado por un retardo de primer orden, cuya constante de tiempo es función de la inercia de las masas rotantes del generador y la turbina, según la ecuación del movimiento. con $T_M = 2H$, entonces, se tiene la gráfica N° 7.11 para la central.

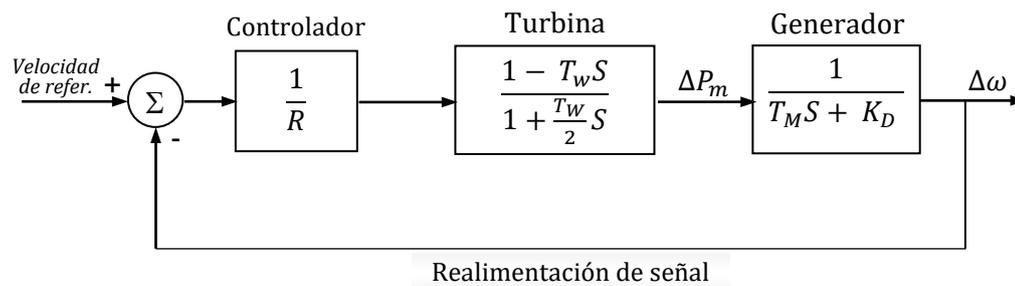


Figura N° 7.11: Diagrama de la central con control de velocidad.

El análisis de estabilidad a partir del modelo lineal de la central, con el método del *lugar de las raíces*. Se determina, si, $R > 0.2$ ó $R > 20\%$; para los valores típicos de las constantes asumidos, el sistema es estable.

Matemáticamente esta condición debe cumplirse, cuando las raíces de la ecuación característica del sistema (denominador de la función de transferencia igualado a cero), son números reales negativos o números complejos conjugados.

Según esto, partiendo de la función de transferencia del sistema, es posible definir si el proceso de regulación es estable o no. Aplicando el criterio del “lugar de las raíces” a la ecuación característica del sistema.

7.4.2. Lugar Geométrico de las Raíces.

Analizando la señal de salida del sistema, para los valores típicos de las constantes, y evaluando la estabilidad dinámica en operación aislada, como consecuencia de la respuesta de la unidad ante cambios en la frecuencia en el sistema mostrado con la gráfica N° 7.12.

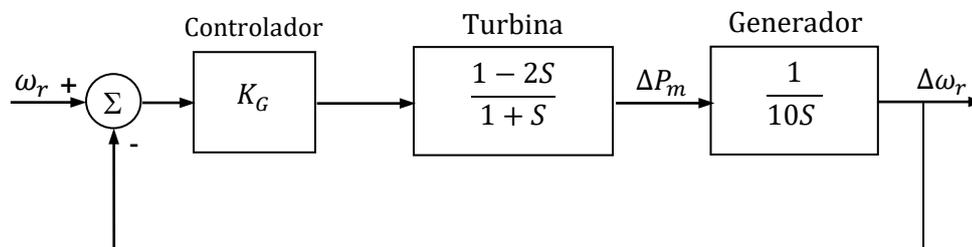
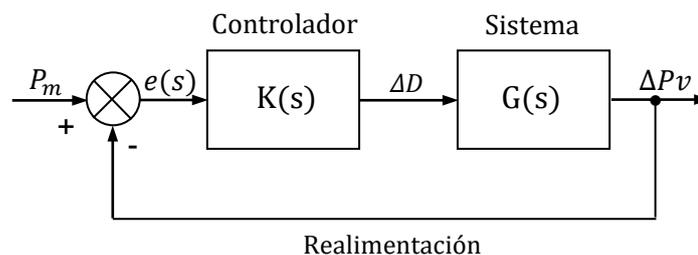


Figura N° 7.12: Diagrama y funciones del controlador, turbina y generador.

$$T_W = 2 \text{ s. } T_M = 10 \text{ s. } K_D = 0, \text{ y } K_G = \frac{1}{R}$$

Referencia de valores: Kundur, P.

Resumiendo el diagrama:



El sistema controlado es la turbina.

$$G(s) = \frac{K(1-2s)}{(1+s)}, \text{ en lazo abierto} \quad \dots (7.34)$$

y, la función de transferencia es.

$$F.T.(s) \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\Delta P_v}{P_m} = \frac{G(s)}{1+H(s) \cdot G(s)} \quad \dots (7.35)$$

$H(s)$, es la realimentación del lazo y vale 1, entonces:

$$M(s) = \frac{K-2sK}{K(1-2s)+1+s}, \text{ en lazo cerrado} \quad \dots (7.36)$$

y, $P(s) = K(1 - 2s) + 1 + s = 0$; luego “K”, puede tomar valores entre $-\infty < K < +\infty$, entonces varía la salida del sistema controlador en función de cómo asumimos este valor.

Analizando K:

Si, $K < 0$, las raíces son reales y crece desde cero positivamente, es estable.

Si, $K = 0$, la raíz es real y negativa. ($s = -1$)

Si, $K = 1$, la raíz es real y positiva. ($s = 2$), y es estable.

Si, $0 < K$, la raíz es positiva y decrece hasta acercarse a cero, es estable.

Sera estable, cuando tenga raíces reales en el semiplano derecho “S” del sistema de referencia; y para los valores asumidos de K, es estable. Entonces, el lugar geométrico de las raíces o polos (X) del polinomio característico en lazo cerrado, se muestra en el gráfico.

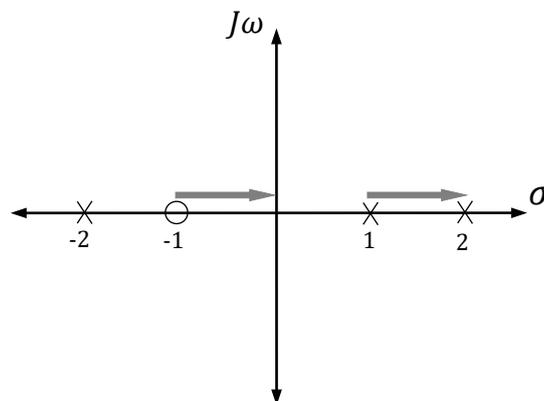


Figura N° 7.13: Evolución de los polos del sistema en el plano complejo.

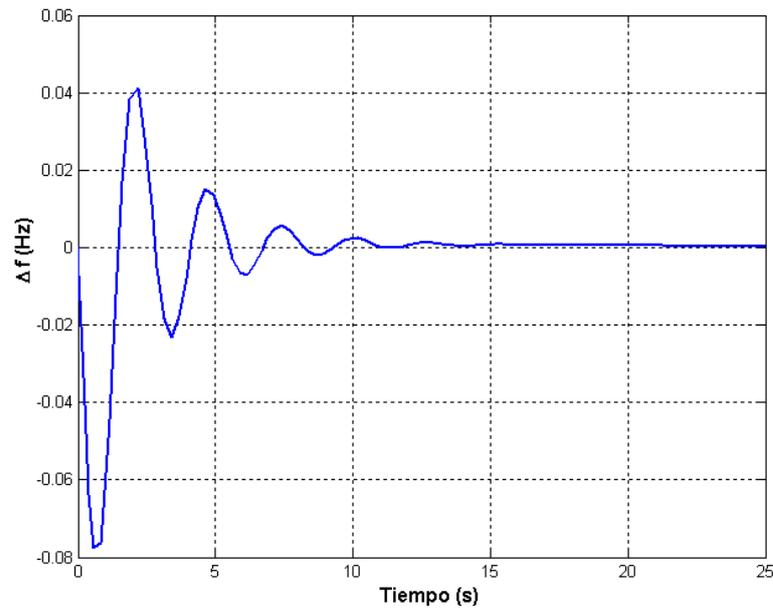


Figura N° 7.14: Evolución de la frecuencia hasta estabilizarse en 14 s.
Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico N° 7.15, se detalla el comportamiento de la frecuencia eléctrica en función del tiempo (existe proporcionalidad entre frecuencia y velocidad), al producirse un aumento momentáneo de la carga del generador síncrono en 20%; la frecuencia del sistema cae luego de 4 segundos de 62.2 a 56.8 Hz. Esta prueba fue realizada por el grupo de Automatización de Fuentes de Energía Renovables, de la universidad del Oriente en Cuba (U.O.), 2009.

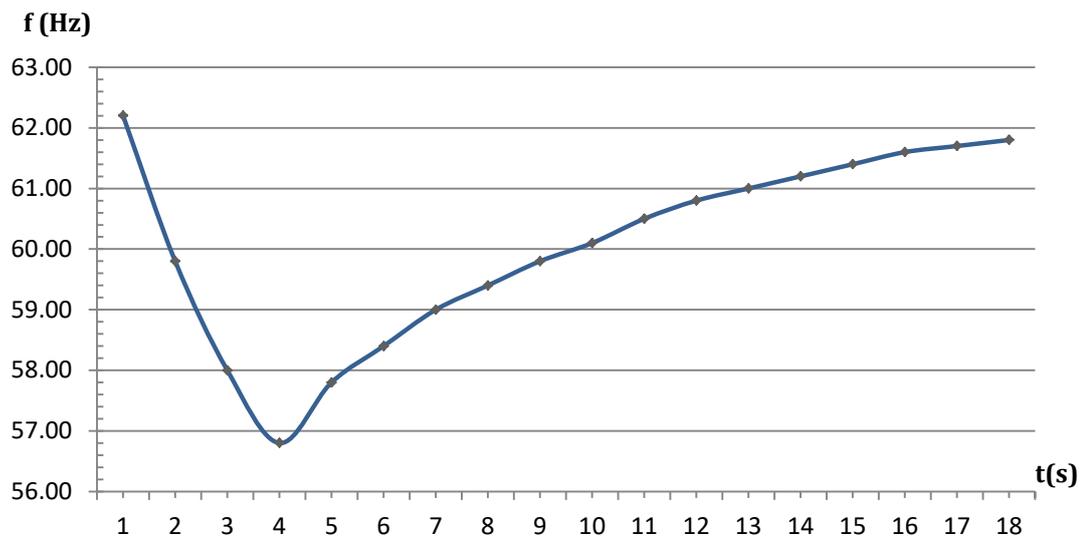


Figura N° 7.15: Variación de la frecuencia por aumento de la carga del grupo.
Fuente: Grupo de automatización, Escuela de mecánica.

7.5. Tipos de Carga Demandada.

Las cargas de tipo resistivas no son afectadas por las variaciones de frecuencia, y el bajo voltaje no disminuye la vida útil de estos elementos, en cambio sí modifica los efectos de la corriente, se producirá menos calor en las cocinas o termas y disminuirá la intensidad de luz en las lámparas incandescentes. Una tensión mayor a la nominal produce mayor calor y el consecuente deterioro de los elementos conductores y aislantes.

Las cargas inductivas y capacitivas son sensibles a las variaciones de frecuencia y voltaje. En el caso de las lámparas fluorescentes, una disminución del 15% de la tensión será suficiente para que no encienda. Los motores tendrán mayor dificultad para el arranque cuando el voltaje baje, y los equipos electrónicos podrían presentar problemas.

7.6. Regulación en la Velocidad del Sistema.

Los factores que determinan una buena regulación en la velocidad del grupo de generación:

- La precisión y fidelidad en régimen permanente.
- La estabilidad y prontitud de respuesta en régimen transitorio.

Entre estas dos cualidades se deberá buscar un balance para llegar a una optimización en la regulación. Además, para que exista una regulación exitosa de la velocidad, es necesario que la máquina no opere a su máxima capacidad, ni a su mínimo técnico, sino que posea reservas en giro, es decir:

$$P_{\min.} < P_{\text{operación}} < P_{\max.} \quad \dots (7.37)$$

Una característica fundamental de la regulación, es la curva de la elasticidad, que representa la dependencia entre la velocidad del grupo y la potencia, y a su vez el grado de apertura del alabe en el distribuidor de la turbina. La regulación es *estática* si la velocidad disminuye cuando crece la potencia, y es *isodrómica* (con servo de doble acción), si la velocidad permanece constante en intervalos de tiempo iguales, para cualquier potencia.

Para obtener una regulación de velocidad estable, se debe tener una reacción lo más rápidamente posible al presentarse el efecto perturbador. El paso de un régimen a otro se efectúa con variaciones de velocidad persistentes, por tanto, el regulador es incapaz de

alcanzar de modo estable el nuevo régimen; en este punto dependerá del grado de apertura del distribuidor de la turbina, y está ya no podrá funcionar al mismo número de revoluciones desde vacío hasta plena carga porque su velocidad será diferente.

Con un sistema de regulación estática y con el estatismo positivo, las oscilaciones de potencia y velocidad irán gradualmente amortiguándose. En la gráfica N° 7.16 se puede ver las variaciones de potencia mecánica ΔP (rojo) y las variaciones de velocidad ΔV (azul), en función del tiempo (abscisa).

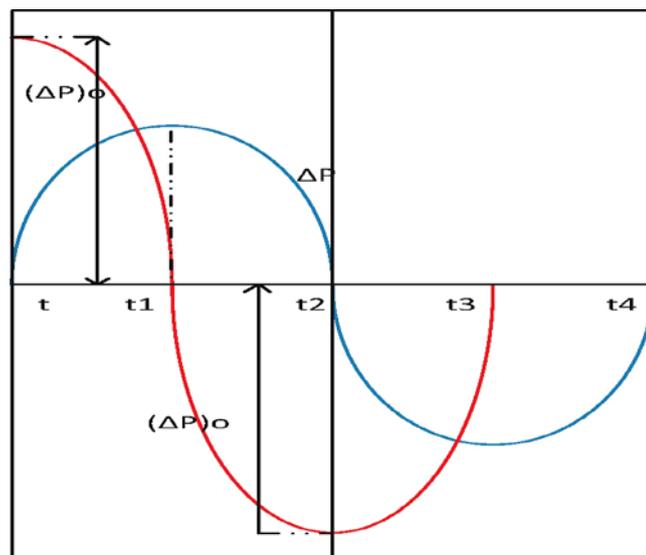


Figura N° 7.16: Variación de velocidad en oscilaciones con regulador estático.
Fuente: Zopetti, G. - Centrales hidroeléctricas.

7.6.1. Control de la Frecuencia.

La estabilidad de frecuencia está asociada al comportamiento del sistema eléctrico de potencia ante perturbaciones severas. En régimen permanente es posible asumir que la frecuencia es la misma en todo el sistema, luego, para el control de la frecuencia y tensión se asume el principio de desacoplamiento de control, donde la tensión es controlada por la potencia reactiva y la frecuencia mediante la potencia activa, por lo tanto, el control se realiza en forma independiente. Ante alguna perturbación en el sistema de regulación de velocidad, como un escalón de demanda, la respuesta inercial y las acciones de control temporales que se realizan, son las que se muestran con la gráfica N° 7.17, siguiente.

Fuente: Rosales, J. - Determinación de parámetros de regulador de tensión, regulador de velocidad y PSS. de la central de Carena.

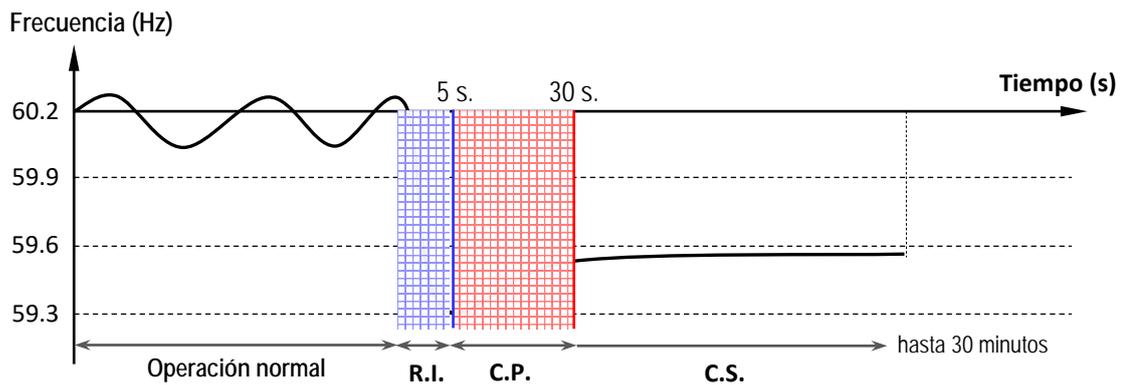


Figura N° 7.17: Respuesta de la frecuencia ante una perturbación en el sistema.

Fuente: Rosales J. - Determinación de parámetros de regulador de tensión, regulador de velocidad y PSS. de la central de Carena.

Los eventos temporales registrados en el gráfico N° 7.17, se resumen en:

- Respuesta inercial de las masas (R.I.).
- Control primario de frecuencia (C.P.).
- Control secundario de frecuencia (C.S.).

a. Respuesta Inercial.- de las masas, es el periodo de 0 a 5 segundos, corresponde al transitorio luego de la contingencia, donde se produce un descenso abrupto de la frecuencia, debido a que existe mayor demanda que generación de potencia. Esto se debe a la insuficiencia de energía en el sistema, que es compensada por la energía almacenada en el rotor del generador, lo que resulta en una disminución de su velocidad y consecuentemente de la frecuencia. Este periodo se denomina respuesta inercial, por cuanto la inercia del sistema de potencia es la variable que limita la tasa de decaimiento de la frecuencia durante los primeros segundos.

Así, mientras mayor inercia posea el sistema, menor es el decaimiento de la frecuencia y viceversa.

b. Control Primario.- de la frecuencia, es el periodo de 5 a 30 segundos, es el lapso donde los reguladores de velocidad de las máquinas síncronas, empiezan a operar para recuperar el balance entre la generación y demanda de potencia activa. El objetivo principal del CPF, es restaurar el balance entre la potencia activa generada y la demanda. Cabe destacar que la frecuencia no es restaurada a su valor nominal. En esta etapa actúan los reguladores de velocidad convencionales del sistema sobre las válvulas o compuertas de admisión, para así modificar la potencia activa que el generador suministra al sistema.

c. Control Secundario.- de la frecuencia, es el periodo que puede durar hasta 30 minutos (en grandes sistemas), corresponde al intervalo en el cual se elimina el error de régimen permanente de la frecuencia al final del CPF, llevándola a su valor nominal. Esto se logra modificando las consignas de potencia de las unidades generadoras. El CSF puede efectuarse de forma automática, a través de lazos de control sobre la referencia de la potencia de las máquinas, o de forma manual

La inestabilidad de la frecuencia puede ocurrir por descoordinación del sistema de control o insuficiencia de reserva rodante, para realizar la regulación de la frecuencia, lo que se denomina inestabilidad de largo plazo y está relacionada a la eficiencia del CPF y el CSF.

Referencia: Castro, F. - Impacto de la generación distribuida en la estabilidad de sistemas de potencia.

Luego, tenemos la representación de la estabilidad e inestabilidad del sistema, con la gráfica N° 7.18 de la onda sinusoidal de corriente alterna, amortiguada y sub amortiguada.

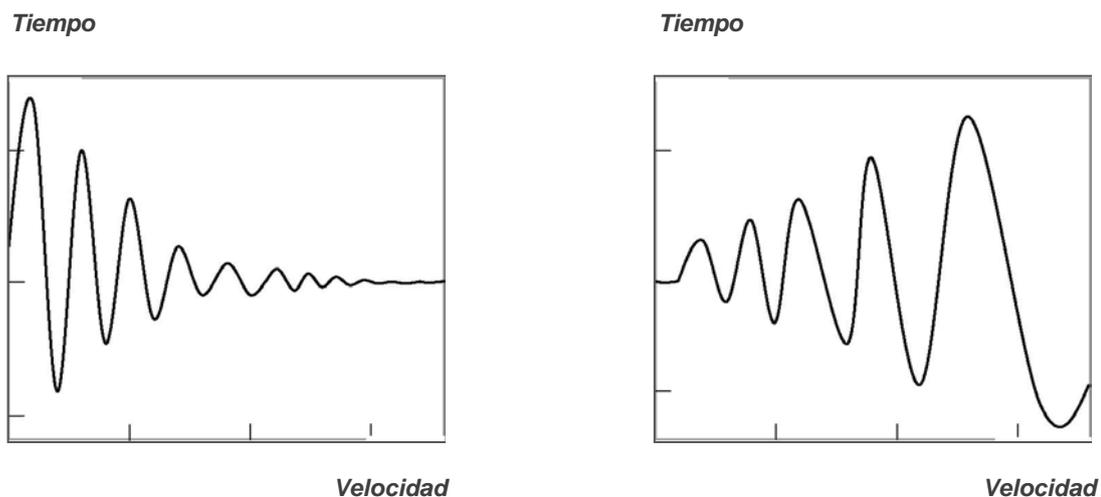


Figura N° 7.18: Se amortigua la oscilación (estabilidad), se amplía la oscilación (inestabilidad).

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

Normalmente existen ligeras variaciones de frecuencia, debido a la fluctuación del balance entre la generación y la demanda de potencia del sistema. La grafica N° 7.19, muestra la onda sinusoidal de la frecuencia estable, dentro de un rango cercano a los 60 hercios, al mantenerse la velocidad síncrona del generador.

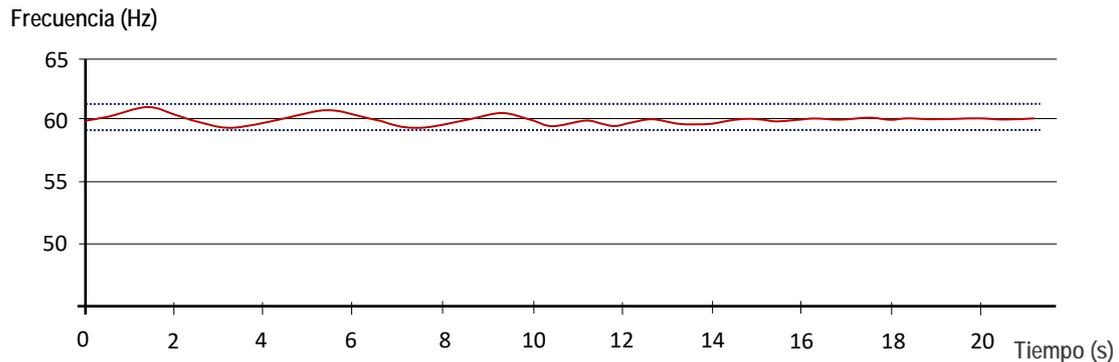


Figura N° 7.19: La frecuencia a la velocidad síncrona del generador.
Fuente: Elaboración propia.

La grafica N° 7.20, muestra la onda sinusoidal de la frecuencia inestable, fuera del rango cercano a los 60 hercios, en los primeros segundos no se controla la velocidad síncrona, como consecuencia del tiempo muerto que tiene el regulador de velocidad.

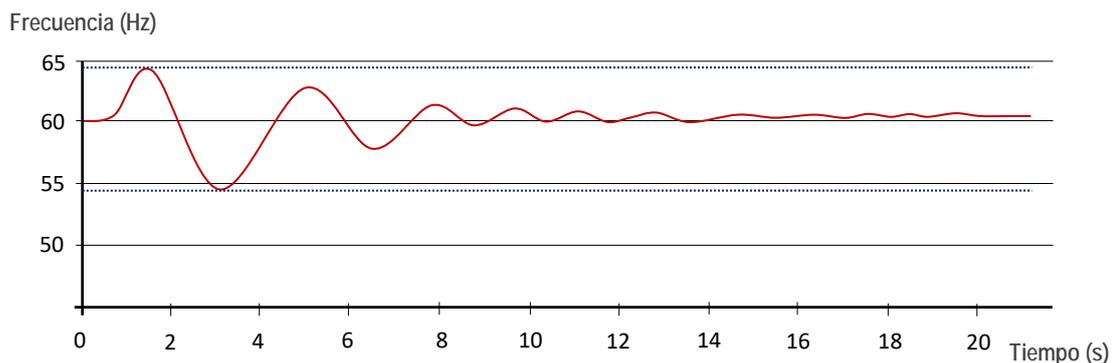


Figura N° 7.20: La frecuencia luego de obtenida la regulación.
Fuente: Elaboración propia.

7.6.2. Tiempo de Maniobra del Regulador.

El tiempo total de maniobra en los reguladores de velocidad, está entre 4 a 6 segundos, pero si la variación de la potencia resistente se efectúa bruscamente este tiempo es insuficiente, y la maniobra resulta lenta para los órganos de regulación, entonces se producirá una variación transitoria de velocidad y el valor normal de ésta se restablecerá después de un cierto tiempo, dependiente del momento de inercia de las masas giratorias y de la característica del funcionamiento del regulador. Disminuyendo estos 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 y por lo tanto, que la columna de agua no se separe en los puntos superiores de la tubería ni en el tubo de aspiración.

CAPITULO VIII

8.1. Modelamiento de la Regulación de Velocidad.

8.1.1. Introducción.

Los modelos matemáticos utilizados en los sistemas dinámicos, se basan en una representación teórica que describe el proceso en forma aproximada. Los modelos matemáticos de plantas o procesos son obtenidos mediante dos técnicas fundamentales, modelamiento e identificación; debido a la complejidad de los modelos matemáticos, se recurre generalmente al método de la identificación experimental del proceso.

El modelo matemático del sistema de regulación de velocidad va a depender de la turbina que se controla, de su forma de operación y construcción, del grado de precisión o detalle requerido en el análisis dinámico y de las características de la tubería de presión. El modelo puede ser simple o complejo y está determinado por constantes de tiempo, ganancias, límites de operación y variaciones de desplazamientos. Los modelos son también de utilidad en estudios de estabilidad dinámica en sistemas de potencia, las perturbaciones que pueden presentarse necesitan que los equipos tengan una rápida respuesta para modificar su salida.

8.1.2. El sistema de Control de Velocidad.

Los componentes que intervienen en el control de la velocidad de la turbina, requieren de un análisis previo de todas las condiciones del sistema dinámico en estudio, así el modelo podrá simular de mejor manera su comportamiento. Las ecuaciones o expresiones matemáticas que se obtienen, sirven para elaborar las funciones de transferencia y luego los diagramas de bloques, los mismos que al ser conectados entre sí configuran el modelo completo de la central de generación.

El sistema de control de velocidad se basa en la teoría matemática, y el modelo matemático lineal del sistema de regulación de velocidad de una central, es utilizado para pequeñas perturbaciones y comprende a la turbina hidráulica y su tubería de presión.

Referencia: Cop. Reivax - Manual de control automático, y Cevallos, B. - Análisis de pequeña señal de sistemas de regulación.

8.2. Modelo Matemático del Sistema.

8.2.1. Función de Transferencia del Modelo Lineal.

Para la obtención de la función de transferencia linealizada en torno a un punto de equilibrio, se deben considerar aspectos que simplifican el modelo a determinarse.

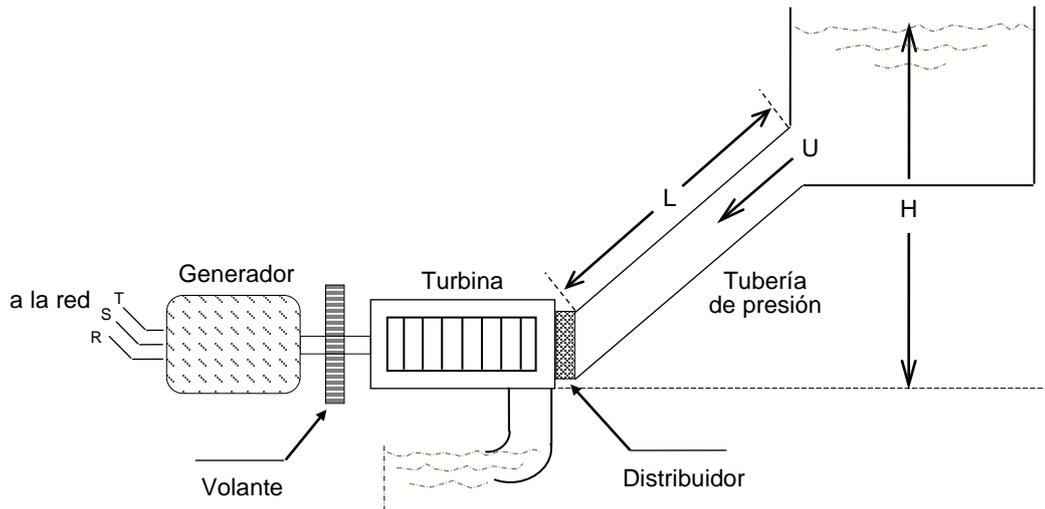


Figura N° 8.1: Representación de la central de generación hidroeléctrica.

- La tubería de presión o conducto forzado es inelástico.
- El agua siendo un líquido es incompresible.
- La velocidad del agua varía proporcionalmente con la apertura del distribuidor
- y con la raíz cuadrada de la altura de la caída de agua.
- La potencia mecánica de la turbina es proporcional al producto de la caída
- por el volumen del agua.
- Se considera la resistencia hidráulica despreciable.

Referencia: Co. Reivax - Manual de control automático & Kundur, P. Power system stability and control.

8.2.2. Función de Trasterencia de la Turbina.

Las características de la turbina así como de la columna de agua en la tubería, están dadas por tres conceptos básicos, que se definen a continuación:

- Velocidad del agua en la tubería de presión.
- Potencia mecánica de la turbina.
- Aceleración de la columna de agua.

a. Velocidad del agua en la tubería de presión, está dada por.

$$U = K_U \cdot G \cdot \sqrt{H} = (g \cdot L) \cdot G \cdot \sqrt{H} \quad \dots (8.1)$$

Dónde:

U = Velocidad del agua.

G = Posición del alabe del distribuidor.

H = Altura o caída de agua (en el distribuidor).

K_U = Constante de proporcionalidad. ($K_u = g \cdot L$)

También la velocidad la podemos expresar como:

$$U = 0.125 \cdot \sqrt{2gH_b} \quad \dots (8.2)$$

Luego, algunas ecuaciones hidrodinámicas:

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{g}{L} (\Delta H) \quad \dots (8.3)$$

$$\frac{dU}{dt} = -\Delta H \cdot \frac{Q \cdot L}{g \cdot H \cdot A} \quad \dots (8.4)$$

Para el caudal de agua: $Q = A \cdot U$ y $Q = \frac{A \cdot L}{t}$

Dónde:

Q = caudal de agua.

H_0 = valor de régimen inicial de H.

A = área de la sección del conducto.

L = largo del conducto o tubería.

Analizando para pequeños desplazamientos o variaciones cercanos al punto de operación, (las pérdidas se consideran despreciables), tenemos:

$$\Delta U = \frac{\partial U}{\partial H} \cdot \Delta H + \frac{\partial U}{\partial G} \cdot \Delta G \quad \dots (8.5)$$

Reemplazando por las derivadas parciales de (8.1) y dividiendo todo por $U_0 = K_U \cdot G_0 \cdot \sqrt{H_0}$, (punto de operación es en condiciones nominales), tenemos:

$$\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{\Delta H}{2H_0} + \frac{\Delta G}{G_0} \quad \dots (8.6)$$

o también, normalizada la ecuación.

$$\Delta U = \frac{1}{2} \Delta \bar{H} + \Delta \bar{G} \quad \dots (8.7)$$

El subíndice “o” indica valores en régimen permanente o estacionario, y la barra “--” sobrescrita, indica valores normalizados en P.U., basados en valores operativos de régimen permanente.

El trabajo (W), realizado por una masa de agua (m), que se encuentra a una altura (H) y se deja caer, es igual a la energía potencial de la misma.

$$W = m \cdot g \cdot H \quad \dots (8.8)$$

y la potencia correspondiente será, por tanto.

$$P = \frac{W}{t} = \frac{m \cdot g \cdot H}{t} = \frac{(\rho \cdot V) \cdot g \cdot H}{t} \quad \dots (8.9)$$

“g”, es la aceleración de la gravedad y “ρ”, es la densidad del agua.

El volumen por unidad de tiempo, se define como caudal (Q), entonces la expresión de potencia se puede reagrupar como.

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad \dots (8.10)$$

El caudal también se define como la velocidad del agua y el área por la que atraviesa, de esta forma la ecuación anterior, se puede reescribir como:

$$P = \rho \cdot g \cdot (U \cdot A) \cdot H \quad \dots (8.11)$$

Reagrupando términos constantes, lo que simplifica la expresión, entonces:

b. Potencia mecánica de la turbina, está dada por:

$$P_m = K_p \cdot H \cdot U \quad \dots (8.12)$$

Que es directamente proporcional a la presión que ejerce la columna de agua en el distribuidor, y a la velocidad de la misma; y la presión en el distribuidor está en función a la altura de la caída de agua "H".

Dónde:

P_m = Potencia mecánica.

K_p = Constante de proporcionalidad. ($K_p = \rho \cdot g \cdot A$)

H_0 = valor de régimen inicial de H.

(para pequeños desplazamientos cercanos al punto de operación).

$$\Delta P_m = \frac{\partial P_m}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial P_m}{\partial U} \Delta U \quad \dots (8.13)$$

Sustituyendo por la expresión correspondiente a la derivada parcial, linealizando y dividiendo ambos lados de (8.11) por $P_{m0} = K_{p0} \cdot H_0 \cdot U_0$, o el punto de operación, tenemos:

$$\frac{\Delta P_m}{P_{m0}} = \frac{\Delta H}{H_0} + \frac{\Delta U}{U_0} \quad \dots (8.14)$$

o bien,

$$\Delta \overline{P}_m = \Delta \overline{H} + \Delta \overline{U} \quad \dots (8.15)$$

La variación incremental de potencia mecánica de la turbina, es igual a la variación de la caída más la variación de la velocidad del agua en la tubería de presión, (en valores normalizados).

Si se reemplaza $\Delta \overline{U}$, en la ecuación (8.6), por su valor obtenido en (8.14), se tiene:

$$\Delta \overline{P}_m = 1.5 \Delta \overline{H} + \Delta \overline{G} \quad \dots (8.16)$$

Que es la variación de la potencia mecánica, en función de la variación de la caída o salto, y la apertura del distribuidor.

De modo semejante, substituyendo $\Delta\bar{H}$ en la ecuación (8.14), se tiene:

$$\Delta\bar{P}_m = 3\Delta\bar{U} - 2\Delta\bar{G} \quad \dots (8.17)$$

Tenemos la variación de la potencia mecánica, en función de la variación de velocidad del agua y la apertura del distribuidor.

c. Aceleración de la columna de agua, es debido a una variación de caída en la turbina (energía potencial), de acuerdo a la segunda ley de Newton, tenemos:

$$\sum_F \vec{\rightarrow} = m \cdot a \quad \dots (8.18)$$

La masa al interior de la tubería es, $m = \rho \cdot A \cdot L$

La presión ejercida por el fluido es, $P = \rho \cdot g \cdot H$

Y se sabe que $P = \frac{F}{A}$, aplicando estas ecuaciones se obtiene:

$$\rho g H_2 A - \rho g H_1 A = (\rho L A) \frac{d\Delta U}{dt} \quad \dots (8.19)$$

Reordenando y simplificando.

$$(\rho \cdot L \cdot A) \frac{d\Delta U}{dt} = -A(\rho \cdot g) \cdot \Delta H \quad \dots (8.20)$$

Para que exista un caudal dentro de una tubería de presión, como se puede concluir de (8.19), es necesario que exista una diferencia de presión entre el punto inicial y el punto final de esta.

Dónde:

ρ = densidad del agua (g/cm^3).

L = longitud de la tubería (m).

g = aceleración de la gravedad (m/s^2).

ρLA = masa de agua en la tubería.

t = tiempo (segundos).

ΔH , es la variación de la altura en el distribuidor, y está dada por $\Delta H = H_2 - H_1$

Dividiendo ambos lados de (8.19) por A , g , H_0 , U_0 , siendo normalizada y en P.U. se logra, la ecuación de la aceleración de la columna de agua.

$$\frac{L \cdot U_0}{g \cdot H_0} \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta U}{U_0} \right) = - \frac{\Delta H}{H_0} \quad \dots (8.21)$$

El valor negativo resultante de la expresión, representa una pequeña contra presión en el distribuidor, que puede afectar la regulación del sistema.

8.2.3. Inercia del Agua en el Conducto.

Produce retardos en los cambios de flujo de agua, ante variaciones en la posición del servomotor que mueve el alabe regulador, y se puede determinar mediante la expresión.

$$T_w = \frac{L \cdot U}{g \cdot H_n} \quad \text{ó} \quad \frac{Q \cdot L}{g \cdot H_n \cdot A} \quad \dots (8.22)$$

Dónde:

T_w = tiempo de arranque o partida del agua.

Q = caudal (máximo).

H_n = caída o salto neto (nominal).

T_w , se define como el tiempo requerido para acelerar el agua en el conducto, desde el reposo hasta la velocidad U_0 , bajo la caída de agua H_0 .

$$T_w = \frac{L \cdot U_0}{g \cdot H_0} \quad \dots (8.23)$$

Y, substituyendo en (7.20) tenemos:

$$T_w \cdot \frac{d\Delta \bar{U}}{dt} = -\Delta \bar{H} \quad \dots (8.24)$$

T_w varía con la carga, cuanto mayor es la carga, mayor es su valor. (T_w , a plena carga varía entre 0,5 y 3 segundos).

Si cerramos el distribuidor de la turbina, una contra presión se produce al final del conducto, y el agua es desacelerada. Entonces si hay una variación positiva de presión, y habrá una variación negativa de aceleración del agua.

De las ecuaciones (8.6) y (8.23), podemos tener la relación entre variación de velocidad y variación en la posición del distribuidor.

$$T_w \frac{d\Delta\bar{U}}{dt} = 2(\Delta\bar{G} - \Delta\bar{U}) \quad \dots (8.25)$$

Substituyendo d/dt por el operador "S" de la transformada de Laplace, y arreglando tenemos:

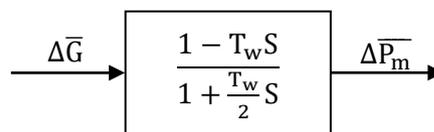
$$\Delta\bar{U} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2}T_w S} \Delta\bar{G} \quad \dots (8.26)$$

Finalmente, substituyendo por su valor tomado de la ecuación (8.16) se llega a:

$$\frac{\Delta\bar{P}_m}{\Delta\bar{G}} = \frac{1 - T_w S}{1 + \frac{T_w S}{2}} \quad \dots (8.27)$$

8.2.4. Modelo de la Turbina y su Conducto para Coline.

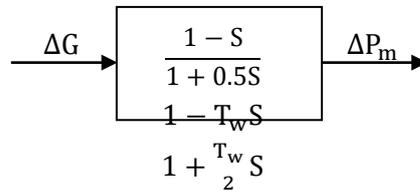
Partiendo de la función de transferencia de la turbina ideal y su conducto de agua; asociado, donde la potencia mecánica cambia en función de la variación de apertura del distribuidor, entonces, de la función de transferencia y diagrama de bloques será;



Reemplazando valores de la central de Coline, el tiempo de partida del agua T_w , de (8.22), se tendrá:

$$T_w = \frac{0.3 \cdot 160}{9.81 \cdot 77 \cdot 0.06} = 1s.$$

y, la función de transferencia, de (8.27), se obtiene:



Analizando la función hallada:

El modelo linealizado de la turbina y su tubería de agua, se caracteriza por un único parámetro, la constante “ T_w ” o tiempo de partida nominal del agua en la tubería de presión, sin embargo, esto tiene la desventaja de limitar el análisis a un solo punto de operación.

8.3. Modelo de la Turbina No Ideal.

Las características en estado estable de la turbina pueden representarse a través de ecuaciones linealizadas alrededor de la condición normal de funcionamiento.

Las expresiones para determinar el modelo de una turbina no ideal, pueden ser establecidas considerando las variaciones de velocidad del agua (ΔU) y de la potencia mecánica (ΔP_m), entonces:

$$\Delta \bar{U} = a_{11} \cdot \Delta \bar{H} + a_{12} \cdot \Delta \bar{\omega} + a_{13} \cdot \Delta \bar{G} \quad \dots (8.28)$$

$$\Delta \bar{P}_m = a_{21} \cdot \Delta \bar{H} + a_{22} \cdot \Delta \bar{\omega} + a_{23} \cdot \Delta \bar{G} \quad \dots (8.29)$$

Dónde:

$\bar{\omega}$, = velocidad de rotación (en p.u.).

ΔH , ΔW , y ΔG , son variaciones relativas de altura, velocidad angular, y apertura de agua respectivamente.

La variación de rotación $\bar{\omega}$ es pequeña, si la unidad está sincronizada a un sistema de potencia grande y los términos relacionados con $\Delta \bar{\omega}$ pueden ser despreciados, entonces:

$$\Delta \bar{U} = a_{11} \cdot \Delta \bar{H} + a_{13} \cdot \Delta \bar{G} \quad \dots (8.30)$$

$$\Delta \bar{P}_m = a_{21} \cdot \Delta \bar{H} + a_{23} \cdot \Delta \bar{G} \quad \dots (8.31)$$

Los coeficientes a_{11} y a_{13} , son las derivadas parciales de la velocidad del agua con relación a la caída o altura, y a la apertura del distribuidor. Los coeficientes a_{21} y a_{23} , son derivadas parciales de la potencia mecánica de la turbina, con relación a la caída o altura, y a la apertura del distribuidor, estos coeficientes “a” dependen de la carga de la máquina y pueden ser determinados de las características de la turbina en el punto de operación.

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{\partial \bar{Q}}{\partial \bar{H}} & a_{12} &= \frac{\partial \bar{Q}}{\partial \bar{W}} & a_{13} &= \frac{\partial \bar{Q}}{\partial \bar{G}} \\ a_{21} &= \frac{\partial \bar{P}_m}{\partial \bar{H}} & a_{22} &= \frac{\partial \bar{P}_m}{\partial \bar{W}} & a_{23} &= \frac{\partial \bar{P}_m}{\partial \bar{G}} \end{aligned} \quad \dots (8.32)$$

La barra – encima, indica condición normal de funcionamiento. Estos valores se obtienen a partir de las curvas características de la turbina, en particular al coeficiente “ a_{22} ” (siempre negativo), que se denomina coeficiente de autorreglaje de la turbina.

Usando las ecuaciones (8.30) y (8.31), en lugar de las ecuaciones (8.6) y (8.15), se llega a la relación entre $\Delta \bar{P}_m$ y $\Delta \bar{G}$, que es la función de transferencia.

$$\frac{\Delta \bar{P}_m}{\Delta \bar{G}} = a_{23} \frac{1 + (a_{11} - a_{13} \cdot a_{21} / a_{23}) \cdot T_{WS}}{1 + a_{11} \cdot T_{WS}} \quad \dots (8.33)$$

Cuadro N° 8.1: Valores de coeficientes “a” por el nivel de carga.

Nivel de Carga	a_{11}	a_{13}	a_{21}	a_{23}
plena carga	0.58	1.1	1.40	1.5
sin carga	0.57	1.1	1.18	1.5

Referencia: Kundur, P. - Power system stability and control.

Los coeficientes “a” representan sensibilidades del caudal y momento motor, en una turbina ideal de flujo cruzado, sin pérdidas, los valores son:

$$a_{11} = 0.5 \quad a_{13} = 1 \quad a_{21} = 1.5 \quad a_{23} = 1$$

Reemplazando en (8.33) para los valores dados, se tiene:

con, $T_w = 1s$.

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta G} = 1 \frac{1 + (0.5 - \frac{1 \cdot 1.5}{1})S}{1 + 0.5S}$$

Luego:

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta G} = \frac{1-S}{1+0.5S} \quad \dots (8.34)$$

Es la función de transferencia de la turbina no ideal, se ve como la potencia mecánica varia, al cambiar la posición de apertura del distribuidor.

8.3.1. Características de la Turbina.

La función de transferencia establecida en las ecuaciones (8.26) o en la (8.33), es del tipo de fase no mínima (cero en el semi-plano derecho del sist. de referencia S complejo), lo que le da una característica especial a este sistema. Así, para una variación de un escalón de carga en la posición del distribuidor de la turbina ideal, la respuesta será.

Del teorema del valor inicial, hallamos el valor inicial de la variación de potencia:

$$\Delta \overline{P}_m(0) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{s} \frac{1 - T_w s}{1 + \frac{T_w s}{2}} = -2 \quad \dots (8.35)$$

y por el teorema del valor final tendremos:

$$\Delta \overline{P}_m(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{s} \frac{1 - T_w s}{1 + \frac{T_w s}{2}} = 1 \quad \dots (8.36)$$

la respuesta total a la variación de potencia, será:

$$\Delta P_m(t) = [1 - 3e^{-(2/T_w)t}] \cdot \Delta \overline{G} \quad \dots (8.37)$$

La grafica N° 8.2, que sigue, muestra la respuesta a una apertura instantánea del 100% del distribuidor de una turbina ideal, con $T_w = 4s$. La apertura no produce un cambio inmediato en el caudal o flujo de agua, debido a su inercia.

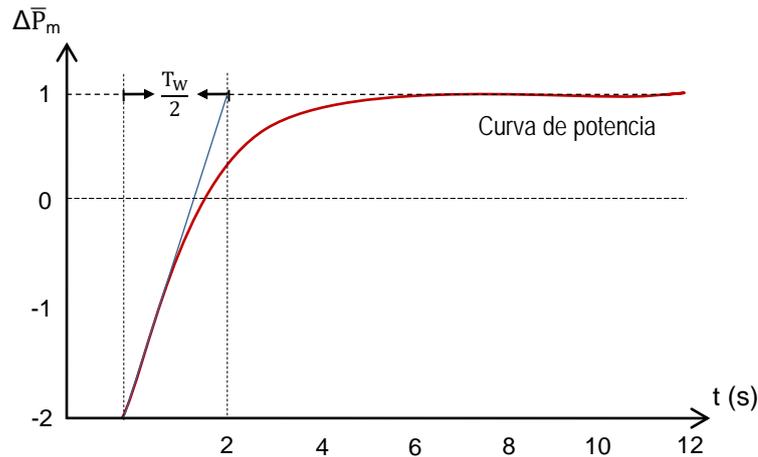


Figura N° 8.2: Curva de variación de la potencia mecánica de la turbina,
Fuente: Co. Reivax - Manual de control automático.

8.3.2. Análisis de la Variación de Potencia.

De la figura anterior, inmediatamente después de la apertura unitaria del distribuidor (en un tiempo $t = 1$ s.), la potencia mecánica se reduce a -2 p.u., para después crecer exponencialmente hasta 1 p.u. (valor en régimen permanente), con una constante de tiempo de $T_w/2$ segundos.

La característica especial según se observa es que la potencia mecánica inicialmente varía en oposición a la dirección de la variación del distribuidor (el distribuidor se abre y la potencia baja).

La razón es que al ocurrir la apertura rápida del distribuidor, el flujo no varía inmediatamente, debido a la inercia del agua. Mientras la presión en la turbina es reducida, causando reducción en la potencia.

Con la respuesta determinada por T_w , el agua acelera hasta que el flujo alcanza un nuevo valor de régimen permanente y consecuentemente tiene un nuevo valor de régimen para la potencia mecánica.

Las gráficas que siguen, muestran la evolución de la potencia mecánica y la velocidad del agua y aumento del caudal de una turbina hidráulica, con $T_w = 1$ s, después de una reducción de 10% en forma de escalón en la apertura del distribuidor.

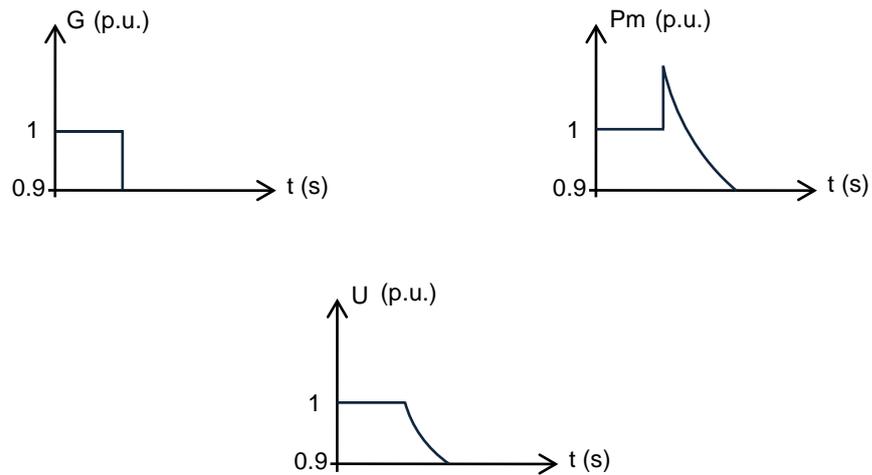


Figura N° 8.3: Respuesta a un escalón (-0.1 p.u.) en la apertura del distribuidor.

Las figuras siguientes, muestran las mismas variables, pero ahora para una reducción en forma de rampa, de la apertura del distribuidor que es de 0.1 p.u. en 1 s.

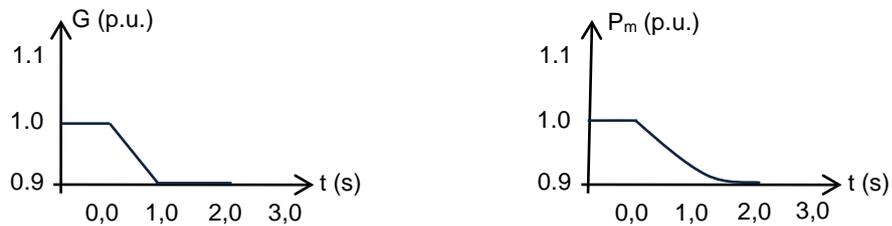


Figura N° 8.4: Respuesta a una rampa en la apertura del distribuidor.

Las figuras anteriores dan una respuesta a una señal de tipo rampa de carga de - 0.1 p.u., en la apertura del distribuidor de la turbina, con $T_w = 1s$.

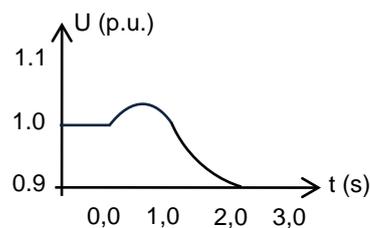


Figura N° 8.5: Respuesta a una señal mixta (-0.1 p.u.) en la apertura del distribuidor.

8.3.3. Cálculo de la Caída Hidráulica.

La caída registrada en el distribuidor de la turbina, o altura de la columna de agua “H”, es igual a la energía almacenada en la velocidad nominal, dividida por los KVA nominales del generador.

$$H = \frac{\text{Energía almacenada (KW.s)}}{\text{KVA}_{\text{nominal}}} \quad \dots (8.38)$$

Dónde:

KW.s = energía, expresada como potencia nominal de la turbina por el tiempo.

KVA = torque mecánico, en base a los KVA nominales del generador.

La energía almacenada, es igual a la energía cinética, entonces:

$$E_c = \frac{1}{2} J \cdot \omega_{om}^2 \quad (\text{en W.s}) \quad \dots (8.39)$$

o también,

$$E_c = \frac{1}{2} J \cdot \omega_{om}^2 \times 10^{-6} \quad \dots (8.40)$$

Dónde:

E_c = energía cinética (KW.s)

J = momento de inercia (kg.m²)

ω_{om} = velocidad nominal del generador, (rad/s)

$$\omega_{om} = 2\pi \frac{\text{rpm}}{60} \quad \dots (8.41)$$

Entonces, reemplazando (2) en la ecuación de la caída hidráulica.

$$H = \frac{1}{2} \frac{J \omega_{om}^2 \times 10^{-6}}{\text{KVA}_{\text{nominal}}} \quad \dots (8.42)$$

$$H = 5.48 \times 10^{-9} \frac{J(\text{rpm})^2}{\text{KVA}_{\text{nominal}}} \quad \dots (8.43)$$

La representación de la inercia de las partes girantes (rodete, rotor, volante), puede ser hecha a través del diagrama de bloques del gráfico N° 8.6, con, T_s = torque sincronizante.

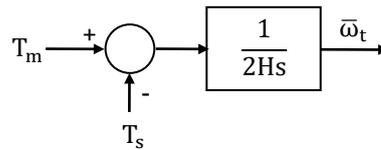


Figura N° 8.6: Diagrama de bloques de la inercia del sistema.

8.3.4. Respuesta de la Carga a la Desviación de Frecuencia.

Algunas cargas demandan una potencia independiente de la frecuencia de alimentación, por ejemplo, cargas resistivas destinadas a calentamiento o lámparas incandescentes para iluminación. Otras cargas, por el contrario, responden a un incremento de la frecuencia aumentando la demanda, por ejemplo, los ventiladores y bombas. En conjunto, la relación entre el incremento de demanda total (ΔP_e) y el incremento de frecuencia en el sistema, puede expresarse como:

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D \cdot \Delta \omega_r \quad \dots (8.44)$$

Dónde:

ΔP_L : es el incremento de potencia independiente de la frecuencia

D: constante que relaciona la " $\Delta \omega_r$ " con el incremento de potencia debido a ella.

$D \cdot \Delta \omega_r$: variación de la carga dependiente de la frecuencia,

La constante "D" actúa como un mecanismo de amortiguamiento de la variación de frecuencia; todo aumento de frecuencia $\Delta \omega_r$ provoca un ligero aumento de la demanda $D \Delta \omega_r$, que se opone al incremento de frecuencia inicial.

Si no existiese regulación de velocidad en el generador síncrono, la respuesta del sistema frente a una variación de la demanda quedaría determinada por la constante de inercia H y por la constante de amortiguamiento D.

Momento de inercia del rotor, también puede darse en función WR^2 , que es igual al peso de las partes girantes, multiplicado por el cuadrado de los radianes de giro.

$$J = \frac{WR^2}{32.2} \times 1.356 \quad \dots (8.45)$$

El momento de inercia del rotor, en slug.es: $f.t^2 = WR^2/32.2$

$$H = \frac{5.48 \times 10^{-9} (W^2) (\text{rpm})^2}{\text{KVA}_{\text{nominal}}} \left[\frac{\text{KW.s}}{\text{KVA}} \right] \dots (8.46)$$

Se denomina T_a o también T_m , al tiempo de partida mecánica o tiempo de aceleración de la unidad, y se define como el lapso de tiempo requerido para que el torque nominal acelerante del rotor, vaya desde cero hasta la velocidad nominal.

T_a , puede ser obtenido de un ensayo de rechazo de carga (abriendo el interruptor principal del generador), a través de la derivada de la velocidad de la unidad en el instante inicial del rechazo.

$$T_a = \frac{\frac{P_e}{P_n}}{\left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{t=0}} \dots (8.47)$$

Dónde:

P_e = potencia eléctrica (rechazada).

P_n = potencia nominal (de placa).

$\left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{t=0}$ = Variación de velocidad, después de la apertura del disyuntor.

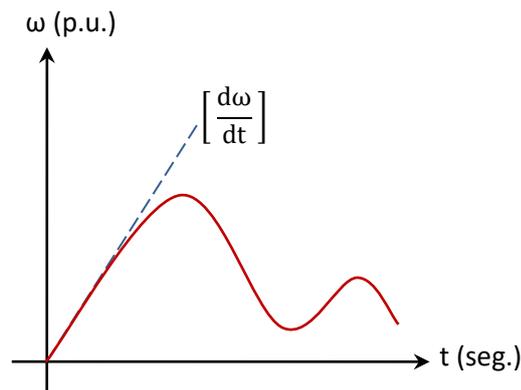


Figura N° 8.7: Variación de velocidad luego de abrir el interruptor.

Se elabora una señal utilizada como consigna o referencia de velocidad si el disyuntor o interruptor automático del grupo está abierto, o como consigna de posición, si el disyuntor del grupo está cerrado. En la Figura N° 8.8: se ven las funciones del sistema.

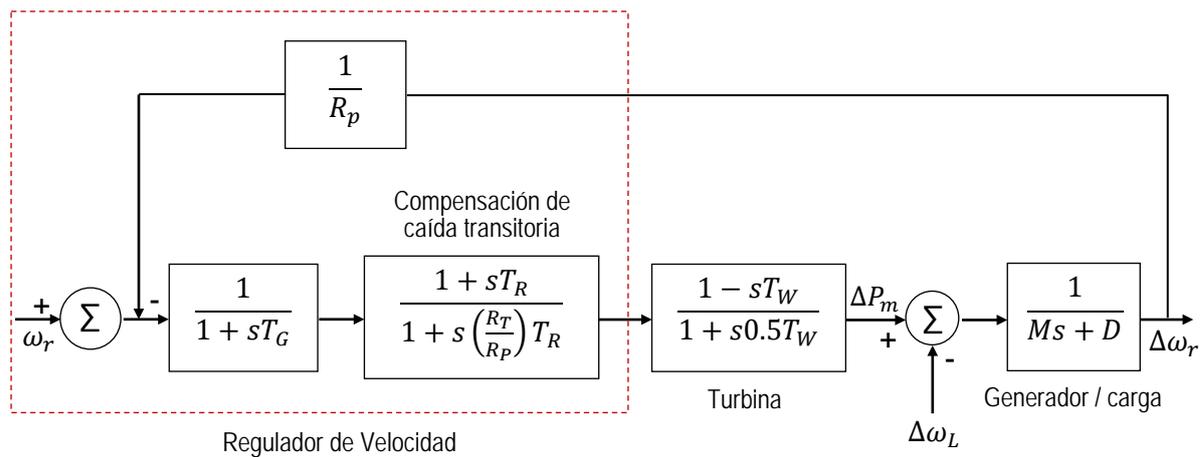


Figura N° 8.8: Diagrama y funciones de transferencia del sistema generación.
Referencia: Kundur, P - Power system stability and control.

Dónde:

T_W : constante de tiempo del agua, requerido para acelerar la columna de agua desde el reposo hasta la velocidad (valor típico, 1 s).

R_P : pendiente de velocidad en estado estacionario (valor típico, 0.05).

T_G : constante de tiempo del regulador (valor típico, 0.2 s).

T_R : Tiempo de reset de la compensación transitoria (valor típico, 5 s).

R_T : pendiente de la velocidad transitoria (valor típico, 0.38).

D : coeficiente de amortiguación de la carga (valor típico, 1).

M : coeficiente del momento angular (valor típico, 6 s).

8.4. Modelo del Regulador de Velocidad Constante

Seguidamente se representan dos esquemas diferentes para el modelo del regulador de velocidad sincrónico, (que realiza el control en periodos de tiempo constante o Isócronos), y con realimentación de señal, que obtiene del error de la velocidad igual a cero para diferentes salidas del generador; en el cual, el cambio de la velocidad angular, al pasar la carga de 0 al 100%, es representado por “R” o *Estatismo Transitorio*, siendo esta una característica particular para cada regulador de velocidad.

Dónde:

Q: caudal de ingreso de agua.

R: ganancia del estatismo.

K_i : ganancia del amplificador.

$1/S$: un integrador (sumador).

ω_r : velocidad de referencia de la turbina.

G_v : % de posición de la válvula.

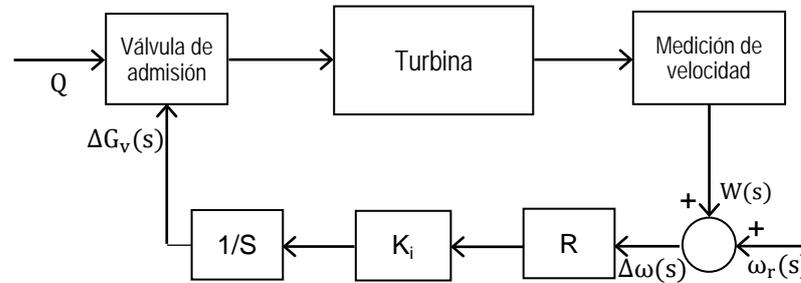


Figura N° 8.9: Diagrama del regulador de velocidad constante con ganancia.

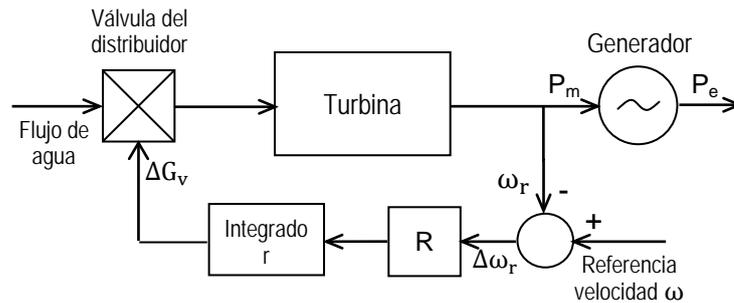


Figura N° 8.10: Diagrama del regulador de velocidad isócrona o sincrónica.

Dónde:

ω_r : velocidad de referencia, del rotor.

$\Delta\omega_r$: variación de velocidad, del rotor.

P_m : potencia mecánica.

P_e : potencia eléctrica.

Luego se observa en las simulaciones (con diferentes trazos), variaciones transitorias de la amplitud de la frecuencia (oscilaciones), que tiende a estabilizarse aprox. antes de los 15 segundos, al modificar la ganancia K_i del amplificador o integrador del regulador de velocidad isocrona, para encontrar un valor optimo de modulación de la onda; los valores dados a K_i son: 0.5, 1.0, 1.2 y 1.5.

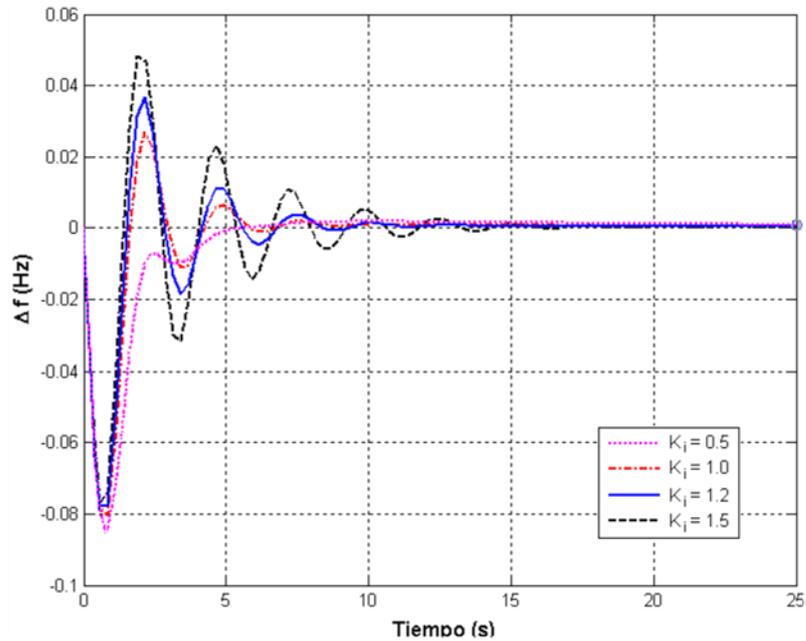


Figura N° 8.11: Comportamiento transitorio de la frecuencia al variar la ganancia.

Debido a la presencia del integrador, el sistema sólo alcanzará el régimen permanente cuando el error de velocidad $\Delta\omega_r$ sea cero. La respuesta a un incremento de carga escalón del sistema con regulador sincrónico, se muestra con la figura N° 8.12.

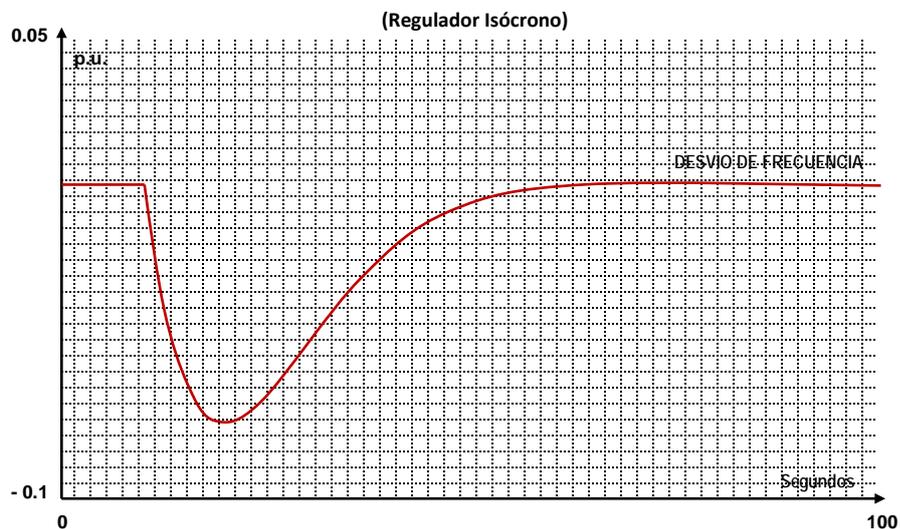


Figura N° 8.12: Respuesta a variación de carga del regulador de velocidad isócrono.

El aumento de la carga P_e , hace a la frecuencia bajar con una tasa definida por la inercia de la máquina H. Al bajar la frecuencia, por acción del regulador, hay un aumento de la potencia mecánica, esto causa una disminución en el ajuste de reducción de la frecuencia y

su posterior aumento hasta el restablecimiento a su valor anterior. La potencia mecánica alcanzará el régimen permanente aumentando el valor equivalente al aumento de la carga.

El regulador sincrónico es satisfactorio si el generador opera en un sistema aislado. Para hacer la división de carga con otros generadores, el regulador de velocidad debe tener la característica de "caída de velocidad" o estatismo permanente.

8.4.1. El Actuador y el Servomotor.

El actuador electro-hidráulico y el servomotor del distribuidor, son parte del sistema de amplificación de fuerza del regulador de velocidad, (con aceite a presión). El esquema del actuador varía conforme al fabricante, pero todos tienen una válvula transductora electro-hidráulica o válvula proporcional y una válvula distribuidora. El diagrama de bloques y la función de transferencia del sistema aceite dinámico, que comprende al actuador y servomotor, se grafica con la figura N° 8.13, siguiente.

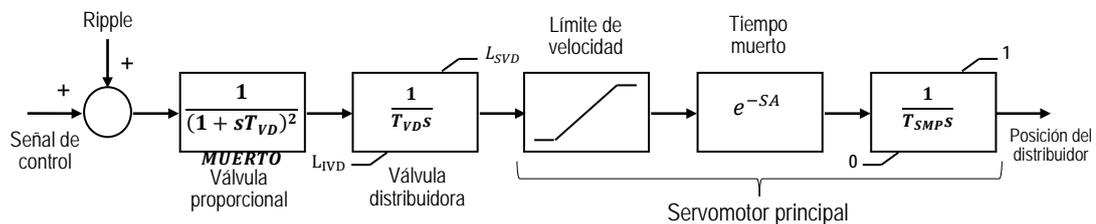


Figura N° 8.13: Diagrama y funciones del actuador, válvulas y servomotor.

Dónde:

Ripple: tensión en C.A. aplicada a la válvula proporcional para minimizar el efecto de zona muerta. (evita problemas de trabamiento de las partes mecánicas).

8.5. Simulación de la Respuesta Dinámica.

Para la simulación del comportamiento dinámico de la generación eléctrica, se considera al sistema completo de la central de Coline, representado mediante sus funciones de transferencia e implementado en el *Simulink* del entorno de programación *MatLab*, para tener así las aproximaciones a condiciones reales de funcionamiento de la central con la regulación de velocidad.

El modelamiento matemático está dado en el dominio de la variable compleja S , y su respuesta en función del tiempo. El diagrama de bloques y sus funciones de transferencia mostrados en la figura N° 8.14, se dan para el sistema de generación completo, compuesto por, regulador de velocidad, turbina hidráulica, generador eléctrico y la carga demandada.

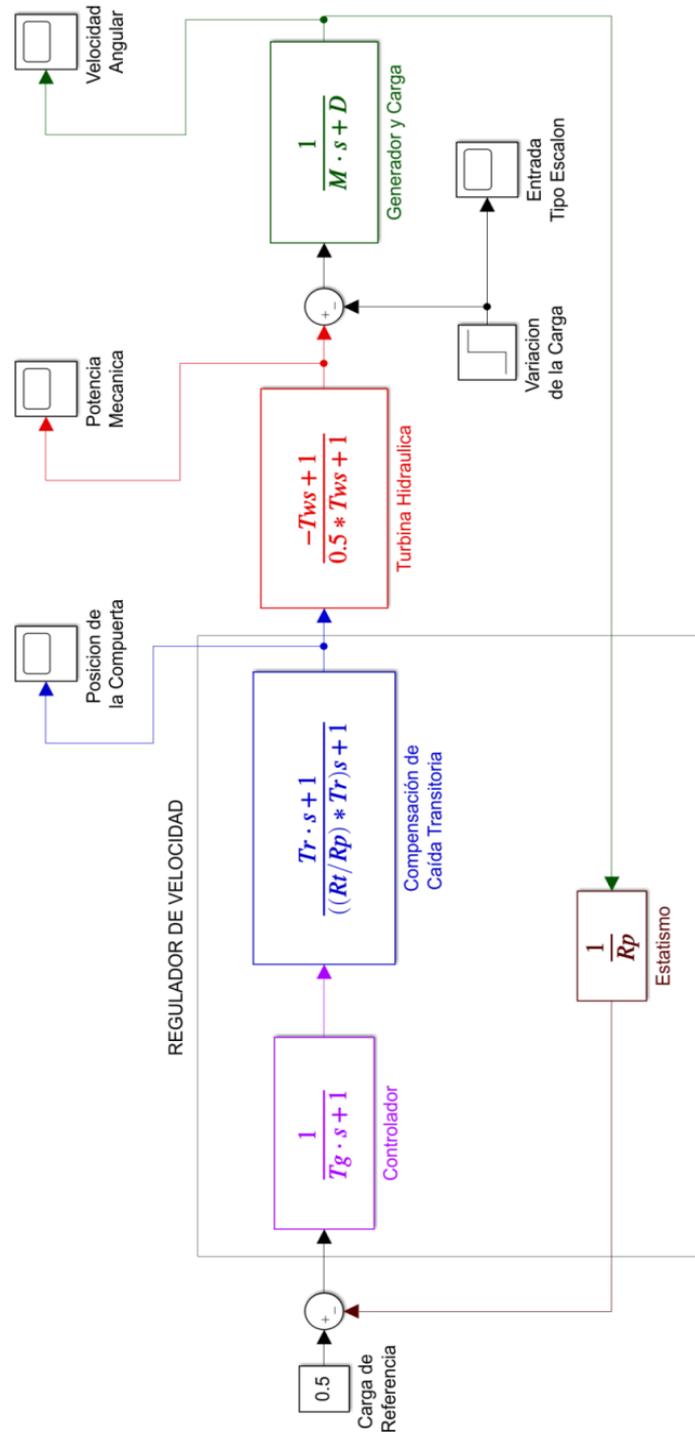


Figura N° 8.14: Diagrama de bloques de la central con regulación.

Las funciones de transferencia están dadas con los valores típicos para las constantes de tiempo y ganancias del controlador (electrónico), y son las que se dan en el cuadro N° 8.2.

Cuadro N° 8.2: *Parámetros utilizados para la simulación.*

Parámetro	Valor	Unidades
T_w	1.0	seg.
R_P	0.05	adim.
T_g	0.2	seg.
T_r	5.0	seg.
R_t	0.38	adim.
D	1.0	adim.
M	6.0	seg.

Referencia: Kundur, P. - Power system stability and control.

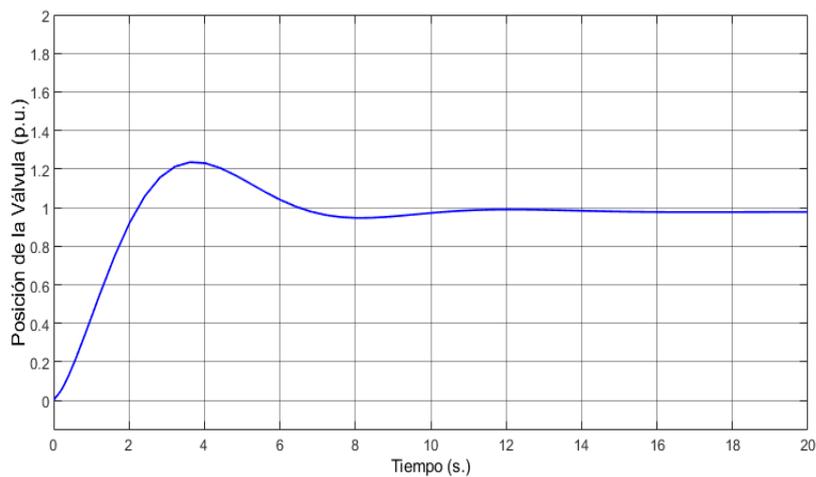


Figura. N° 8.15: Señal de variación de la apertura del distribuidor.

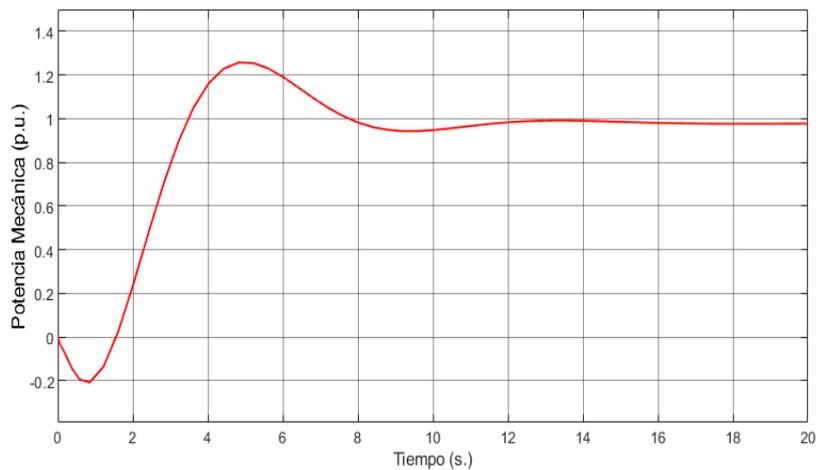


Figura. N° 8.16: Señal de variación de la potencia de la turbina.

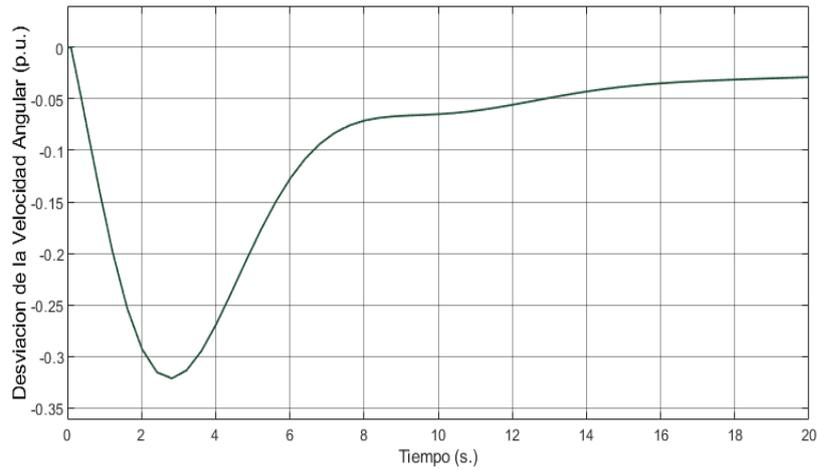


Figura. N° 8.17: Señal de variación de velocidad de la turbina.

El gráfico N° 8.18, muestra el diagrama y funciones de transferencia del modelo lineal. Inicia el sistema en estado estable y a la velocidad de referencia, luego se aplica una carga de 10% de la nominal al generador, y se produce por acción del regulador de velocidad que es $1/R$, la apertura del distribuidor de la turbina para recuperar la velocidad síncrona.

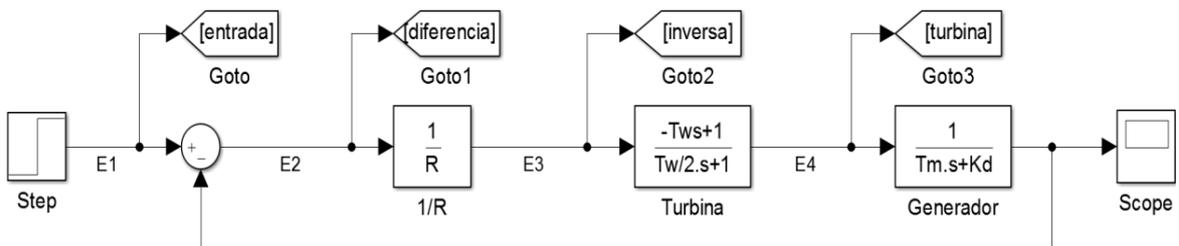


Figura N° 8.18: Diagrama y funciones del modelo lineal con regulación.

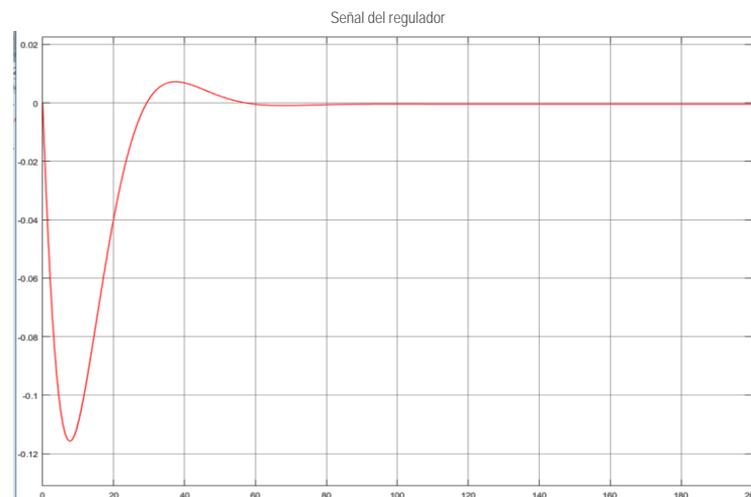


Figura N° 8.19: Respuesta de la frecuencia (p.u.) ante un aumento de carga.

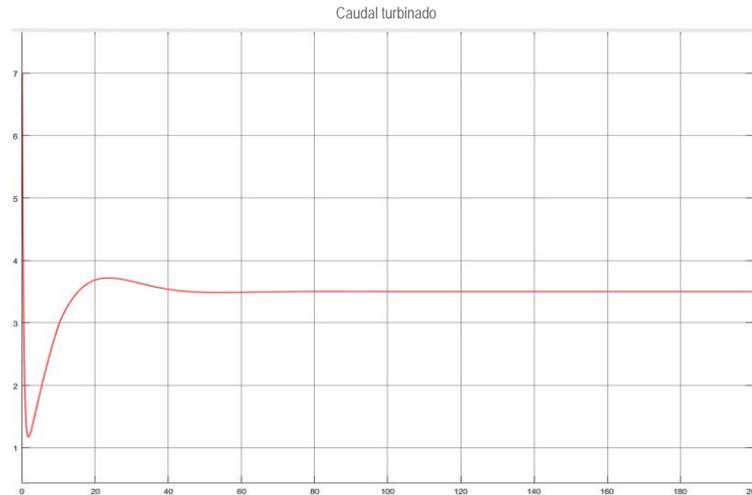


Figura N° 8.20: Respuesta del caudal (p.u.) ante una disminución de carga.

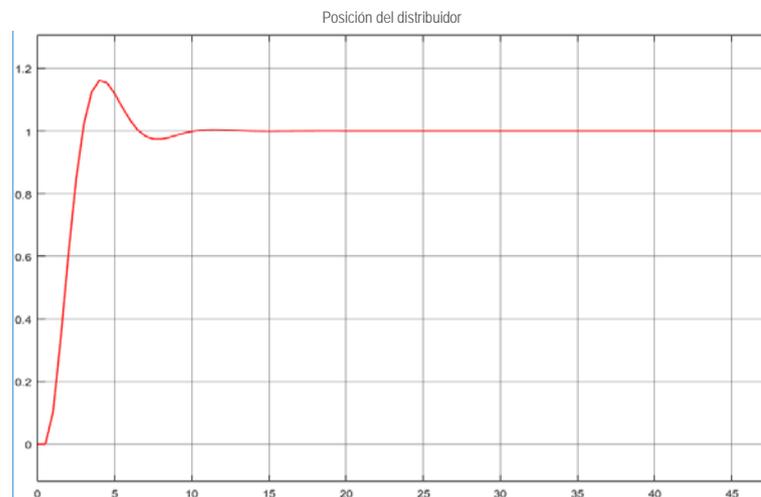


Figura N° 8.21: Variación de apertura del distribuidor ante un aumento de carga.

8.5.1. Conclusión de las Simulaciones.

Obtener un punto óptimo de funcionamiento, consiste en evaluar el sistema de control de velocidad en lazo o bucle cerrado, bajo distintas condiciones de carga, para determinar el régimen de operación adecuado y el balance entre generación y demanda, de forma tal que se logre una respuesta de la frecuencia estable en el tiempo.

Los cambios en la carga local dados en forma de escalón, permiten visualizar la respuesta transitoria para variables como, apertura del distribuidor, velocidad de rotación o variación de la frecuencia, y estas se dan con la amortiguación de oscilaciones esperadas, como consecuencia de la actuación del regulador de velocidad.

CAPITULO IX

9.1. Mecanismo Regulador de Velocidad.

9.1.1. Componentes Reguladores de Caudal.

Como se mencionó el dispositivo que regula el caudal de una turbina Michell-Banki es el álabe directriz, que se encuentra dentro del distribuidor. Para lograr esto, se tiene un sistema de accionamiento lineal, que transfiere el movimiento entre el Actuador y el Alabe, formado por partes mecánicas, basadas en palancas, varillas, bielas, articulaciones y rodamientos, que ensamblados entre sí pueden accionar la apertura o cierre del distribuidor, pudiendo este ser automático mediante un servomotor o manual maniobrado con una manivela o una rueda de timón. La grafica N° 9.1, muestra un tipo de mecanismo de accionamiento del alabe.

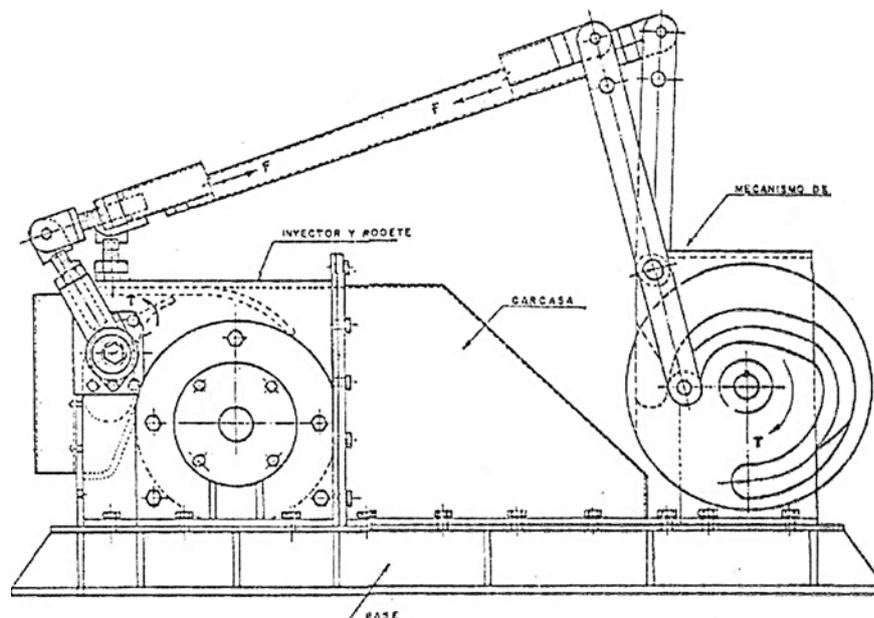


Figura N° 9.1: Mecanismo regulador de caudal de la turbina Michell-Banki.
Fuente: OLADE - Manual de diseño y fabricación de equipos para P.C.H.

El regulador de acción indirecta (con amplificación de desplazamientos mecánicos), es el más utilizado, dada la envergadura y potencia de las turbinas, el cual se caracteriza por tener elementos auxiliares de amplificación, capaces de desarrollar los elevados esfuerzos que se requieren para conseguir que el álabe o válvula del distribuidor, responda rápidamente a las señales de control de regulación, adoptando la posición adecuada, en razón al mayor o menor caudal de agua que deba incidir sobre los álabes del rodete.

Seguidamente se detalla un automatismo mecánico, utilizado para la transformación del movimiento rectilíneo alternativo del servomotor, en movimiento circular en el eje del alabe regulador que controla la sección de paso de agua.

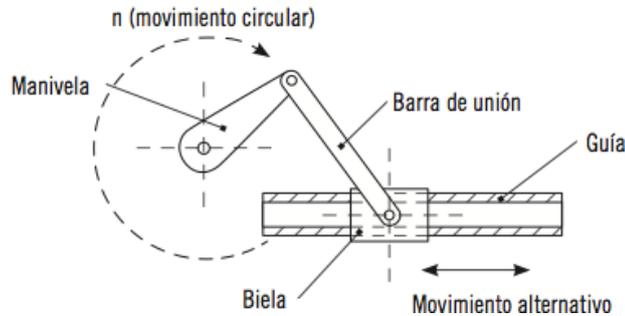


Figura N° 9.2: Biela-manivela para cambiar movimiento rectilíneo en circular.
Fuente: Elaboración propia.

9.1.2. La Unidad Amplificadora de Potencia.

Es el sistema que permite la obtención y transmisión de la energía hidráulica necesaria para la amplificación de potencia y desplazamiento mecánico en el actuador del regulador, que a su vez maniobra sobre la posición de la válvula, utilizando para este fin aceite, al cual se le suministra presión mediante una bomba rotativa a base de engranajes. La bomba puede ser accionada directamente por la turbina, o mediante un motor eléctrico (electrobomba), el circuito hidráulico completo se aprecia en el siguiente esquema convencional.

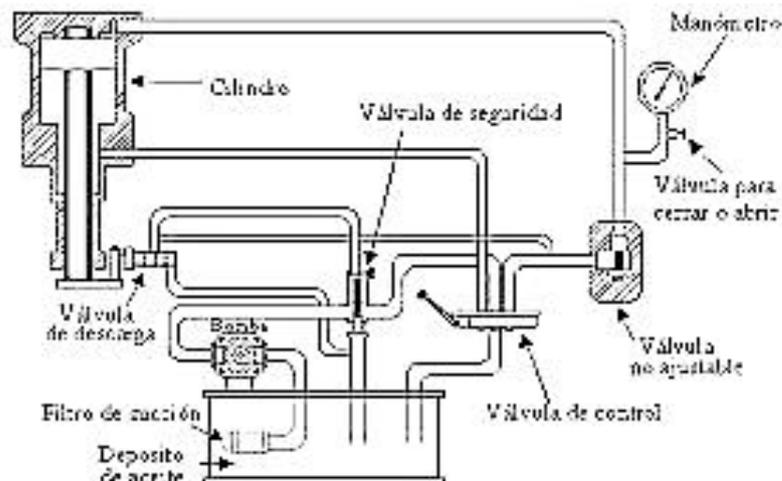


Figura N° 9.3: Circuito hidráulico amplificador de potencia mecánica.
Fuente: Meneses, J. - Control de velocidad de motores para bombeo de sistemas hidráulicos.

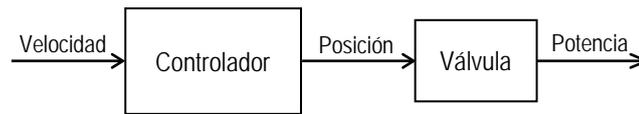


Figura N° 9.4: Diagrama de bloques del sistema de control de la válvula.
Fuente propia.

La señal del controlador de velocidad, que está en función de la variación o error de la velocidad, al ser amplificada esta, añade un pequeño retraso adicional al sistema. Dicho retraso normalmente está entre 0.2 y 1 segundo. La función de transferencia del controlador de la válvula de admisión de caudal, se da con la expresión N° 9.5.

$$\frac{\Delta P_v}{\Delta P_g} = \frac{1}{1 + T_g s} \quad \dots (9.1)$$

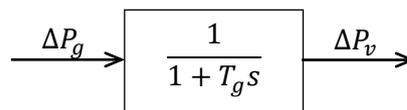


Figura N° 9.5: Función de transferencia de controlador de la válvula
Fuente propia.

Dónde:

ΔP_v : cambio en la posición de la válvula.

ΔP_g : cambio en la señal de salida del regulador.

T_g : constante de tiempo del amplificador.

En los reguladores de velocidad las funciones que involucran potencias mayores, deben ser realizadas por amplificadores hidráulicos. Este dispositivo es en esencia similar para reguladores de velocidad electrónicos, mecánicos y eléctricos, ya que sus elementos como el servomotor, válvula distribuidora, tanque acumulador, cárter de aceite, depósito sumidero, bomba, y los componentes adicionales como, pistones, válvulas, tuberías y deflectores; son afines y cumplen en conjunto la función de aumentar la fuerza.

La presión en los tanques acumuladores de aceite generalmente está entre 100 y 300 psi, esta presión varía de acuerdo a los requerimientos de fuerza en el eje de salida del cilindro del servomotor, necesaria para mover el alabe directriz, inyector o compuerta de caudal, dependiendo del tipo de turbina.

El automatismo del sistema amplificador hidráulico es fundamental, ya que la sincronización mecánica con la parte eléctrica o electrónica debe ser óptima y exacta (sin margen de error) para obtener el control adecuado de la velocidad de giro de la turbina.

9.2. Componentes de la Turbina para Regular el Caudal.

Una vez que se conoce el diseño y características de la turbina, se pueden establecer los criterios para definir la geometría del inyector y el alabe, los que permiten cambiar la potencia que entrega la turbina. La figura N° 9.6, muestra una Michell-Banki, con la forma característica del dispositivo regulador de caudal, el que se aprecia dentro de la cámara inyectora y a la derecha del rotor.

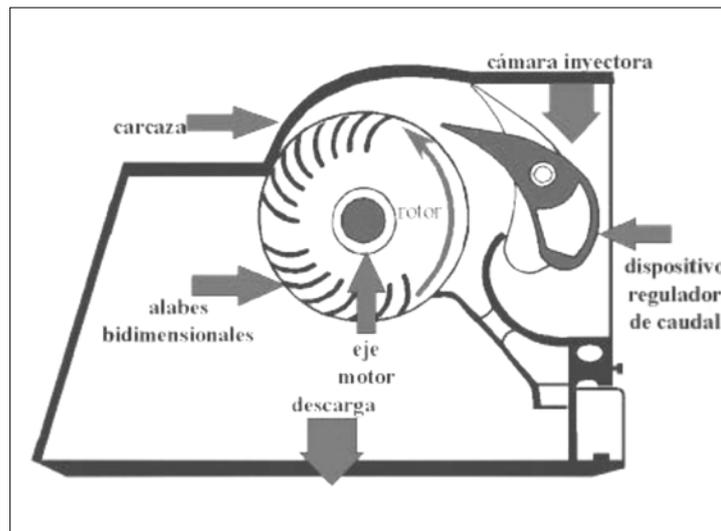


Figura N° 9.6: Componentes principales de la turbina Michell-Banki.
Fuente: Muguerza, D. - Micro centrales hidroeléctricas.

9.2.1. Descripción de Componentes.

9.2.1.1. El Álabe Regulador.

O también álabe directriz, es metálico, de tipo perfilado (corte de ala de avión) y esta sostenido en un eje sobre el cual se mueve, que se apoya en la carcasa de la turbina, en uno de sus extremos se actúa sobre él a través de una manivela para accionarlo manualmente. También se puede acoplar al eje una biela, la que a su vez se conecta al eje del embolo del servomotor, para mover el álabe automáticamente.

El accionamiento sobre el álabe directriz puede adoptar también otras configuraciones, que van desde las más sofisticadas con controladores automáticos, hasta las simples puramente mecánicas.

9.2.1.2. La Cámara Inyectora.

El inyector de caudal de la turbina puede tener varias geometrías, con uno o dos compartimientos. En los casos en que el inyector se diseña con un compartimiento, el mecanismo de regulación consiste en una palanca instalada en el eje del alabe directriz que se acopla al regulador de velocidad. Si el inyector tiene dos compartimientos, es necesario diseñar un mecanismo de regulación que combine los procesos de apertura y cierre de ambos, a fin de obtener una buena eficiencia cuando la turbina opera a carga parcial.

9.2.1.3. Las Levas.

Las levas se utilizan en aquellas turbinas con inyectores de dos compartimientos, el canal de estas levas está diseñado para que el proceso de apertura se realice en etapas. Al girar la leva de regulación, esta hace mover al rodamiento ubicado en el extremo del brazo principal, produciéndose el giro de este, con lo cual se acciona la palanca del álabe directriz en el inyector, lo mismo ocurre en el lado posterior, donde se ubica la palanca del alabe del otro compartimiento.

9.2.1.4. Los Rodamientos.

El rodamiento es utilizado para fijar el eje rotatorio y reducir la fricción, puede ser de rodillos o bolas, para seleccionarlo se requiere determinar la fuerza radial que actúa sobre él, en base al análisis de los brazos de palanca, partiendo del torque máximo requerido para girar el alabe directriz. Determinada la fuerza radial sobre el rodamiento, se selecciona el tipo y tamaño del mismo.

9.2.1.5. Otras Piezas.

Una barra roscada y tuerca se ubican en la palanca de regulación del inyector y en el brazo secundario, para afinar la dimensión en el ensamblaje.

La estructura que soporta las levas de regulación alberga cojinetes de deslizamiento en un tubo metálico y en donde se ubica el pivote del brazo principal.

El eje motor que además soporta las levas de regulación y cojinetes de deslizamiento, y que se acoplará al regulador de velocidad, está hecho de acero macizo.

Se tiene resortes helicoidales de compresión de forma circular, y se concluye con los pasadores que se utilizan en las uniones de los brazos de palanca.

9.3. Cálculos Mecánicos para la Turbina.

Para tener la relación de transmisión del multiplicador de velocidad, previamente se deberá obtener analíticamente la velocidad de rotación de la turbina.

Datos de diseño de la central.

- Salto neto, 77 m.
- Caudal disponible, 0.3 m³/s.
- Turbina, de flujo transversal.

9.3.1. Potencia de la Turbina (P_m).

Se determina con la siguiente expresión:

$$P_m = g \cdot Q \cdot H \cdot \eta \quad \dots (9.2)$$

Dónde:

P_m : potencia mecánica de la turbina (kW).

g : aceleración de la gravedad (m/s²).

Q : caudal de agua, a la turbina (m³/s).

H : altura de la caída, o salto neto (m).

η^* : rendimiento, de la turbina (adimensional).

* El rendimiento de la turbina Michell-Banki, está entre 60 y 75%; para la deducción escogemos 62% ó 0.62, por tratarse de una turbina de fabricación local cuyo rendimiento es menor. *Referencia: OLADE..*

Reemplazando:

$$P_m = (9.8)(0.3)(77)(0.62)$$

$$P_m = 140.35 \approx 140 \text{ kW.} \quad \dots (9.3)$$

9.3.2. Diámetro del Rodete (D_r).

Se determina con la siguiente expresión:

$$D^* = \frac{Q}{\sqrt{H}} \quad \dots (9.4)$$

Dónde:

D^* : relación para hallar el diámetro (adimensional)

Reemplazando:

$$D^* = \frac{0.3}{\sqrt{77}} = 0.0342 \quad \dots (9.5)$$

El resultado lo comparamos con el siguiente cuadro, para la selección del diámetro más apropiado.

Cuadro N° 9.1: *Rango para el diámetro del rodete de la turbina.*

Q/\sqrt{H}	Diámetro del rotor (mm)
0.02236 – 0.04743	200 a 290
0.04743 – 0.07906	300 a 390
0.07906 – 0.11068	400 a 490
0.07906 – 0.15812	500 a 590

Fuente: OLADE.- Manual de diseño y fabricación de turbinas Michell Banki.

De acuerdo al cuadro, tenemos:

$$D_r = 0.29 \text{ m. } \text{ó} \text{ } 290 \text{ mm.}$$

9.3.3. Velocidad de Rotación (N_t).

$$N_t = K \cdot \frac{\sqrt{H}}{D_r} \quad \dots (9.6)$$

Dónde:

N_t : velocidad de rotación de la turbina (rpm)

K : constante de velocidad (adimensional)

D_r : diámetro del rodete, exterior (m)

Escogemos el valor de “ K ”, de acuerdo al tipo de turbina utilizada.

Cuadro N° 9.2: Valores para la constante “K” adimensional.

Tipo de turbina	Valor de K
Pelton de 1 o más toberas	38.00
<u>Michell Banki</u>	<u>39.80</u>
Francis lenta	40.00
Francis normal	55.40
Francis rápida	74.50
Kaplan	0.725 Nq

Fuente: ITDG. - Manual de mini y micro centrales hidroeléctricas.

Reemplazando:

$$N_t = 39.8 \frac{\sqrt{77}}{0.29}$$

$$N_t = 1,203 \cong 1200 \text{ rpm} \quad \dots (9.7)$$

9.3.4. Relación de Transmisión (R_t).

$$R_t = \frac{N_T}{N_G} \quad \dots (9.8)$$

Dónde:

R_t : relación de transmisión mecánica.

N_g : velocidad del generador (rpm).

se tiene, N_t : 1,200 rpm. , N_g : 1,800 rpm.

Luego, reemplazando en la expresión (9.8):

$$R_t = \frac{1,200}{1,800} \Rightarrow \dots (9.9)$$

$$R_t = 0.67$$

El multiplicador de velocidad instalado entre la turbina y el generador, debe igualar esta diferencia de velocidad, con la relación de transmisión hallada.

9.4. Accionamiento del Alabe Directriz.

Se necesita disponer de un determinado esfuerzo para accionar el servomotor que regula el alabe en el distribuidor, esto se logra mediante la aplicación de elevadas presiones en el circuito de aceite. Podemos tener el requerimiento aproximado de fuerza de este circuito hidráulico, partiendo del tipo y características de la turbina.

El elemento de control, necesita de un cierto trabajo para mover en una carrera completa al servomotor de compuerta, en el cierre o apertura del álabe directriz, y que depende del tamaño y geometría del rodete. La capacidad de trabajo efectiva necesaria para actuar sobre este mecanismo y vencer las resistencias que se oponen, parte de una fuerza, la que se puede calcular.

9.4.1. Fuerza Necesaria Para Mover el Alabe.

El alabe directriz actúa por el desplazamiento del eje y pistón del servomotor, que recibe aceite a presión, proveniente del acumulador aire-aceite, después de haber pasado por la válvula piloto, que alimenta la línea de potencia del servomotor y produce la fuerza.

La capacidad de trabajo, expresada en Kg-m o N-m, es el valor obtenido de multiplicar la máxima fuerza requerida para accionar el alabe directriz, por la carrera del servomotor; se utilizan usualmente presiones de aceite de 16 Kg./cm², 24 Kg./cm² o 45 Kg./cm², para pequeñas turbinas; pudiéndose ajustar el sistema de acuerdo a los requerimientos de fuerza en el eje de salida del servomotor.

Mediante las siguientes relaciones matemáticas se puede calcular aprox. esta fuerza.

9.4.1.1. Fuerza de Empuje del Pistón (F_a).

La fuerza requerida por el pistón del servomotor principal, es igual a la máxima resistencia que se opone al mecanismo regulador de caudal (alabe).

Hallamos el volumen del alabe directriz, con la expresión:

$$V_a = S_a \cdot L_a \quad \dots (9.10)$$

Dónde:

V_a : volumen del alabe (cm^3).

S_a : sección del alabe (9 cm^2).

L_a : longitud del alabe (15 cm).

Reemplazando en (9.10), tenemos:

$$V_a = 15 \times 9 = 135 \text{ cm}^3$$

Teniendo el volumen, calculamos su masa (acero inoxidable):

$$m_a = V_a \times \delta \quad \dots (9.11)$$

$$m_a = 135 \times 7.7$$

$$m_a = 1,039.5 \text{ gr. ó } 1.04 \text{ kg.} \quad \dots (9.12)$$

Dónde:

m_a : masa del alabe (gr.).

δ : densidad del acero (7.7 gr/cm^3).

Encontramos la fuerza para mover el alabe, con la expresión:

$$F_a = m_a \cdot g \quad \dots (9.13)$$

Dónde:

g : aceleración de la gravedad. (9.81 m/s^2)

Reemplazando en (9.13), tenemos:

$$F_a = 1.04 \text{ kg.} \times 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$F_a = 10.2 \text{ N.}$$

Consideraremos el 60% de esta fuerza, al estar el alabe sostenido en su eje de giro:

$$F_{a1} = 6.12 \text{ N.} \quad \dots (9.14)$$

9.4.1.2. Fuerza de Impacto del Chorro (F_{ch}).

Hallamos la fuerza de impacto del chorro de agua en el alabe directriz, o fuerza hidrostática, con la expresión siguiente:

$$F_c = 2 \frac{\gamma Q}{g} \sqrt{\left(\frac{Q}{S_c}\right)^2 - 2g \cdot H(\cos \beta)} \quad \dots (9.15)$$

Dónde:

γ : peso específico del agua (9800 N/m³).

Q : caudal de diseño (0.3 m³/s).

S_{ch} : sección del chorro (0.0075 m²).

H : altura de la columna de agua (77 m).

β : ángulo de impacto del chorro (30°).

Reemplazando en la expresión (9.15), se tiene:

$$F_c = 2 \frac{(9800)(0.3)}{9.81} \sqrt{\left(\frac{0.3}{0.0075}\right)^2 - 2(9.81)(77)(0.86)}$$

$$F_c = 10,367.8 \text{ N.} \quad \dots (9.16)$$

9.4.1.3. Fuerza Total Necesaria (F_t).

La fuerza teórica necesaria para mover el alabe directriz con el flujo de agua, será la sumatoria de las fuerzas parciales halladas, según la igualdad que sigue.

$$\sum F = F_a + F_{ch} \quad \dots (9.17)$$

Dónde:

F_a : fuerza para vencer el peso del alabe.

F_{ch} : fuerza para vencer el impacto del chorro.

Reemplazando en (9.17), se tiene la fuerza total.

$$F_t \cong 10.37 \text{ kN.} \quad \dots (9.18)$$

9.4.1.4. *Capacidad de Trabajo del Servomotor.*

La capacidad de trabajo aproximada del servomotor principal, requerida para el cierre total del distribuidor de la turbina, se define como:

$$W = F_t \cdot Y \quad \dots (9.19)$$

Dónde:

W = capacidad de trabajo (Joules).

Y = carrera del servomotor (m).

La determinación analítica de la capacidad de trabajo del servomotor es complicada, e implica la necesidad de calcular todas las resistencias (pasivas y activas) intervinientes, en el mecanismo para cerrar la turbina, y se dispone solo de una expresión experimental para hallarla.

Con el transcurso del tiempo aumentan mucho las resistencias pasivas, y son debido al desgaste, deterioro, oxidación, ensuciamiento u obstrucción de la turbina, por lo que es recomendable disponer de cierta holgura sobre la capacidad (torque) del regulador de velocidad, para hacer frente a estos inconvenientes.

Referencia: Zoppetti, G. - Centrales hidroeléctricas.

CAPITULO X

10.1. Selección del Regulador de Velocidad.

10.1.1. Introducción.

El tener un sistema óptimo, confiable y de costo accesible en la regulación de velocidad de la mini central de Coline, constituye el principal objetivo de este estudio. La regulación manual de caudal se utiliza principalmente para micro Centrales con potencias menores a 50 kW, y el campo de aplicación de la regulación por balanceo de carga está en el rango de las centrales con potencias menores a 100 kW. Se justifica la regulación automática por caudal para centrales con más de 100 kW. de potencia.

“Algunos investigadores justifican la regulación manual de caudal para las pequeñas o mini Centrales Hidráulicas, o sino la regulación a través del balanceo de carga. La primera opción determina reducidas inversiones, pero es poco confiable e insegura y tiene mayores costos de operación, la segunda solución significa derroche de energía en muchos casos necesaria y no permite la utilización racional del agua, donde es necesaria usarla para otros fines, como la agricultura”.

Referencia: Murgeza, D. - Micro centrales hidroeléctricas.

El sistema de regulación debe abarcar condiciones que se estipulan para pequeñas “centrales de generación”, de aquí que este sistema tienen rangos determinados para su aplicación, lo que merece la necesidad de su estandarización; tomando en cuenta el tipo de central, esto conlleva a que algunos investigadores se inclinen en señalar que los sistemas de regulación de velocidad no son compatibles con Micro o Mini centrales, debido a que su costo es elevado en comparación al costo de la turbina.

10.1.2. Condiciones Previas del Regulador.

La turbina de la central, estará implementada con un sistema de regulación de velocidad, que garantice la mayor eficiencia, exactitud y facilidad de ajuste de parámetros. Además, deberá adecuarse para operar establemente con carga aislada, su velocidad de respuesta debe ser buena, y permitir hacer cambios en la consigna de caudal y velocidad por el operador.

La señal de salida del elemento controlador será la referencia para el posicionamiento del sistema de servomotor del álabe del distribuidor, actuando a través del amplificador de fuerza, compuesto preferentemente por un transductor electrohidráulico, una válvula piloto y la válvula distribuidora principal, además.

- a. El regulador de velocidad debería contar con las funciones de:
 - Regulación automática de frecuencia.
 - Regulación de desviaciones de velocidad.
 - Limitación mecánica de apertura del alabe regulador.
 - Ajuste para operación en abierto y con carga.

- b. El regulador de velocidad debería tener los siguientes indicadores:
 - Frecuencia del generador.
 - Abertura de álabe regulador.
 - Posición del limitador de apertura.
 - Velocidad de la turbina.

Además, se deberá precisar en el catálogo del fabricante, el peso total del regulador, dimensiones (altura, largo, ancho), también, capacidad del tanque y cárter de aceite.

10.1.3. Comparativa del Regulador Electrónico y Mecánico.

En esta parte, se expondrá en sentido general, las características más destacadas de ambos sistemas, respecto a componentes y funciones esenciales.

La diferencia sustancial entre el regulador de velocidad electrónico, sea digital o analógico, y el mecánico, sea hidráulico o eléctrico, consiste en utilizar la salida del generador (potencia real) en los electrónicos, en lugar de la posición del alabe (caudal ingresado) en los mecánicos, como señal de retroalimentación del elemento de control, obteniéndose, una relación lineal entre el ajuste de velocidad y la carga de la unidad de generación.

El cuadro N° 10.1, muestra la equivalencia para los elementos de control de un regulador electrónico y un regulador mecánico, en los que se usa el mismo principio para la función que se desempeña pero con diferentes componentes y tecnología.

Cuadro N° 10.1: *Comparación de controles electrónicos y mecánicos.*

FUNCIÓN Y TIPO DE COMPONENTE		
Función	Regulador Electrónico	Regulador Mecánico
Sensor de velocidad	Inductivo magnético	Pesos rotantes
Referencia de velocidad	Potenciómetro de ajuste	Resorte de velocidad
Punto de sumatoria	Suma de señales	Rodamiento collar
Estabilidad	Reset (estabilidad) potenciómetro	Válvula aguja (corrector)
Ganancia	Potenciómetro de ganancia	Resorte de compensación
Acción correctiva	Unidad de procesamiento	Rodamiento del péndulo
Realimentación	Captador inductivo	Levas y palancas
Amplificador	Amplificador diferencial	Área de control (válvula piloto)

Fuente: Elaboración propia.

En la comparativa de reguladores de velocidad se debe tener en cuenta lo siguiente:

- En los reguladores mecánico-hidráulicos y electro-hidráulicos, el censado de velocidad, la realimentación con estatismo permanente, y las funciones de cálculo son provistas por elementos mecánicos, además se utiliza un amortiguador (dashpot) para la compensación de estatismo transitorio.
- En los reguladores electrónicos se alcanza mayor exactitud en la retroalimentación, manteniendo la salida de la unidad constante independientemente de cambios, con esto es posible la acción de control derivativa que aumenta la velocidad de respuesta al cambio en la variable de salida y que no se logra en los reguladores mecánicos.
- Los reguladores mecánico-hidráulicos como los electro-hidráulicos tienen mayor robustez ante las variaciones límite de carga, pero presentan una respuesta más lenta, en relación a la prontitud y versatilidad de los reguladores electrónicos analógicos y digitales.
- Los reguladores mecánico-hidráulicos como electro-hidráulicos están expuestos a mayor desgaste por tener mayores partes y piezas en movimiento, así como a la fatiga de sus materiales, en comparación a elementos de estado sólido que se encuentran en los reguladores electrónicos.

- En los reguladores electrónicos el costo del sistema hidráulico se incrementa, debido al uso de dispositivos transductores para el control y monitorización, esto ya que operan mediante señales eléctricas que deben ser convertidas a otra magnitud física.
- Los riesgos de fallo que puede presentar el regulador mecánico, es el desgaste y las descalibraciones aleatorias de partes y piezas, que afectan la eficiencia, confiabilidad y disponibilidad de la unidad de generación, debido al envejecimiento del mismo, como:

Fallo en contrapesas, éste es el dispositivo sensor de velocidad mecánico.

Fallo en rodamientos, que procesa el control correctivo de velocidad.

Falla en resorte de ajuste de velocidad, que fija la velocidad de referencia.

Falla de la válvula aguja y sistema de compensación, que son acciones complementarias del sistema de control.

- Los reguladores de velocidad electrónicos analógicos o digitales, permiten:
 - Un control preciso y versatilidad de uso.
 - Incremento en la seguridad de la unidad de generación.
 - La simplificación del régimen de operación.
 - La optimización en tiempo de detección y respuesta.
- Los fallos que puede presentar los reguladores de velocidad electrónicos son:
 - Riesgo de avería en los sensores.
 - Riesgo de avería en la tarjeta electrónica.
 - Riesgo de desperfecto del sistema hidráulico.
 - Desperfecto de sistemas auxiliares (ventilación y refrigeración).

Sin embargo, la probabilidad de ocurrencia de fallos o averías de las partes electrónicas es mínima, (no más de una vez durante el ciclo de vida).

10.2. Condiciones Evaluables Para la Selección.

De los diferentes equipos de control disponibles para regular la velocidad de una hidroturbina mediante el control de caudal, cada uno con tecnología, y características propias; y considerando que el tema tratado en el presente Capítulo, ha sido poco estudiado desde la perspectiva de la valoración objetiva de las funciones y beneficios de estos equipos; es así

que se ha tomado en cuenta condiciones funcionales para la selección del regulador de velocidad, además se recurrió a bibliográfica especializada, como libros, publicaciones y trabajos de investigación, para poder determinar las bondades e inconvenientes que presenta cada regulador de velocidad en su funcionamiento, las características de sus principales componentes, la ocurrencia de desperfectos en su trabajo y sus posibles consecuencias, como también la adaptación a necesidades propias de la planta de generación.

Los aspectos antes mencionados sirvieron de referencia para determinar la importancia de *ocho consideraciones o ítems relevantes*, que sean comunes y evaluables a todas las alternativas, propuestas en un cuadro comparativo (ref. Játiva, F. 2014), siete de ellas son condiciones técnicas o funcionales y la última es la parte económica (costo comparativo de los equipos); que hacen a un determinado regulador de velocidad más ventajoso frente a los otros. Seguidamente se las define:

- [1] **Sensibilidad.-** Considera que el grupo hidroeléctrico conforma un sistema muy interrelacionado con el regulador de velocidad, debiendo tener alta sensibilidad a pequeñas oscilaciones, y a cargas entre cero y la correspondiente a la máxima apertura del alabe directriz.
- [2] **Eficiencia Funcional.-** Considera que el regulador de velocidad debe garantizar un funcionamiento eficiente, con exactitud, para optimizar los parámetros controlados (no debe exceder de +/- 10% del valor nominal) bajo diferentes condiciones y ante variaciones transitorias de carga.
- [3] **Manejo de Señal.-** Considera que la señal de error de velocidad detectada mediante el elemento o unidad de control de regulador, y ser compararla con la señal de entrada o de consigna (retroalimentación), para la determinación de las correcciones o de desviación de la velocidad o frecuencia.
- [4] **Operación y Mantenimiento.-** El mantenimiento del regulador podrá hacerse por personal no especializado y su operación deberá ser adecuada a las condiciones de su aplicación (toda condición), Además facilidad de montaje y desmontaje de piezas o partes, en caso de avería, la reparación debe ser rápida, para no importar piezas que puedan tenerse localmente.

- [5] **Banda Muerta.-** Considera un rango de frecuencia especificado, en el cual se inhibe la actuación del regulador de velocidad, ya que su aporte a la calidad de la frecuencia es mínimo. (zona de insensibilidad para los valores muy cercanos a la frecuencia nominal del sistema controlado).
- [6] **Velocidad de Respuesta.-** Considera que la velocidad de detección y respuesta del regulador ante perturbaciones, debe ser rápida para mantener la constante la velocidad síncrona y la estabilidad del conjunto. en apertura o cierre del distribuidor de la turbina (de 5 a 10 segundos),
- [7] **Adaptación a Condición de Planta.-** Considera la factibilidad de adaptación al lugar de operación y condiciones de la central (tipo de turbina, potencia, posición del distribuidor y trabajo en red aislada), también su confiabilidad de operación en una planta de limitados recursos técnicos.
- [8] **Costo Comparativo.-** Este factor es importante tratándose de una mini central. Algunas tecnologías de reguladores de velocidad debido a la complejidad de su diseño y componentes elevan el costo de su fabricación. El precio siempre deberá estar en función de las prestaciones del equipo regulador ofrecido.

10.2.1. Alternativas de Solución Presentadas.

Con lo expuesto anteriormente, se plantean cuatro posibles alternativas de solución, que corresponden a los equipos reguladores de velocidad desarrollados en el Capítulo III de este trabajo, y son:

- Alternativa A, Regulador de velocidad mecánico - hidráulico.
- Alternativa B, Regulador de velocidad mecánico - eléctrico.
- Alternativa C, Regulador de velocidad electrónico - analógico.
- Alternativa D, Regulador de velocidad electrónico - digital.

10.2.2. Selección del Regulador de Velocidad.

Teniendo todos los sistemas de control de velocidad vistos, y caracterizados por sus particularidades, variables más representativas, así como su desempeño mediante el modelamiento y la simulación hecha. Se presenta un cuadro resumen de evaluación

cuantitativa, que permite la comparativa en su conjunto, para apreciar las prestaciones de cada equipo en relación a los demás.

10.2.3. Criterios de Puntuación.

Una vez analizadas las comparaciones de la evaluación hecha de los reguladores y sus componentes, esta nos provee la información suficiente para la cuantificación de los valores establecidos en la Tabla N° 10.2, dándose la escala de jerarquía de puntaje: desde un punto (1) para “regular o aceptable”, hasta cuatro (4) puntos para “excelente”, como se muestra.

Cuadro N° 10.2: *Condición de puntaje mediante escala.*

Condición	Puntaje
regular	1
bueno	2
muy bueno	3
excelente	4

Cuadro N° 10.3: *Características evaluables para los reguladores de velocidad.*

COMPARATIVA DE LA EVALUACIÓN									
Tipo de equipo	Costo	Sensibilidad	Eficiencia funcional	Manejo de Señal	Mantenimiento	Menor banda muerta	Velocidad de respuesta	Adaptación condición de planta	Total
Regulador Mecánico - Hidráulico	3	2	1	2	2	2	2	3	17
Regulador Mecánico - Eléctrico	3	2	2	2	3	2	2	3	19
Regulador Electrónico - Analógico	2	4	3	3	4	3	4	2	25
Regulador Electrónico - Digital	1	4	3	4	3	3	4	2	24

Fuente: Elaboración propia.

Referencia: Játiva, F. - Diseño y construcción de un banco para el control automático de velocidad para plantas hidroeléctricas.

10.3. La Alternativa Seleccionada.

Después de la comparativa a la que han sido sometidos los distintos reguladores de velocidad, y considerando los aspectos más relevantes de cada uno, como el puntaje total

alcanzado en el cuadro resumen comparativo; se extrae la alternativa propuesta como equipo de regulación de velocidad para la central de Coline: El Electrónico - Analógico.

Este regulador tiene ventajas comparativas, como consecuencia de sus prestaciones y parámetros, además está determinado por un equipo analógico, capaz de censar las revoluciones a través de un transductor de estado sólido y según eso actuar eficientemente sobre la admisión para regular el caudal de ingreso, teniendo la señal de retroalimentación de la posición del distribuidor. Dado que al haber variaciones súbitas en la carga solicitada al generador, siempre habrá desviaciones en la velocidad de rotación, y actuando rápida y convenientemente sobre el caudal se logrará volver a la velocidad de sincronismo.

La alternativa propuesta será viable, dependiendo del presupuesto disponible, tomando en cuenta que el regulador tiene un costo mayor al de la turbina de la central. También se deberá hacer un entrenamiento al operario a cargo, si bien no tendrá una labor permanente, deberá conocer su funcionamiento, para operarlo, supervisarlo y realizar el mantenimiento básico.

10.3.1. Descripción de la Alternativa.

En la unidad de control electrónica analógica, un sensor de frecuencia capta la señal de la línea en los bornes del generador, la señal es convertida a tensión y luego amplificada a través de elementos integrados para ser comparada con la señal patrón que se toma de la red con la ayuda de una fuente de alimentación. Si la turbina gira a velocidad nominal (corresponde a una frecuencia de 60 Hz.), la tensión en la salida del comparador es igual a 0 voltios. Si se aumenta la carga, la velocidad disminuye, entonces la señal en el comparador es negativa y se da el mando para que intervenga el relay o actuador de apertura de válvula de regulación de caudal. Si se quita carga la velocidad aumenta, entonces la señal en el comparador se vuelve positiva y activa el relay de cierre de válvula de regulación de caudal.

Ante desviaciones de la frecuencia de referencia, el controlador electrónico envía una señal eléctrica al actuador electro-hidráulico, entonces el circuito de aceite dinámico, junto al servomecanismo accionan el varillaje de acoplamiento, abriendo o cerrando la válvula o alabe de regulación. Es importante señalar que estos dispositivos actúan

aproximadamente cuando la señal es igual a 58 Hz o 62 Hz., y se detiene el controlador cuando la frecuencia es un poco mayor a 58 Hz. o cuando es un poco menor a 62 Hz, según el caso. Además, el regulador electrónico analógico presenta una considerable estabilidad para el caso de variación brusca de carga.

Una particularidad importante de este regulador de velocidad, es que compensa la variación de ganancia en función del punto de trabajo. Esta propiedad es fundamental para la estabilidad del sistema en red aislada.

10.3.2. Ventajas y Desventajas.

Ventajas:

- Sencillez de operación, (no requiere configuración).
- Diseño modular y compacto, (reducidas dimensiones).
- Robusto y seguro en el accionar.
- Modificación de parámetros de ajuste y banda de regulación.
- Bloqueo mecánico en los realys, (accionamiento simultaneo).
- Velocidad de respuesta dinámica al control de caudal.
- Modificación automática de parámetros de arranque y sincronización.
- Mantenimiento solo para el actuador electro hidráulico.

Desventajas:

- No se utilizan todas las funciones del regulador, como la comunicación inalámbrica a distancia, o el cambio instantáneo de parámetros en acoplamiento a la red.
- El circuito electrónico está sometido a sobretensiones, puesto que va conectado a la salida del generador.
- Ante la probabilidad de corto circuito ($V=0$) o falla de la transmisión el sistema de regulación se queda sin alimentación.

Referencia: Suarez, L. - Regulador de velocidad eléctrico electrónico de turbinas.

Balance Ventajas - Desventajas.

El balance ventajas - desventajas, se inclina por las mayores ventajas del equipo, desde el punto de vista de su desempeño operativo, además permite una buena adaptación a planta, y su precio ha ido bajando, siendo actualmente accesible para una mini central.

La decisión final la tendrá el proyectista encargado al evaluar este estudio, pero en general la selección en la práctica se hace en base a criterios obtenidos de la experiencia, con tendencia a tener la tecnología más reciente, pero considerando siempre la economía de la instalación.

10.3.3. Características Principales del Regulador.

Las características básicas de un equipo de regulación de velocidad varían y son datos que el fabricante debe proporcionar para el regulador que ofrece. En el caso del regulador seleccionado o de cualquier otro, estos valores son necesarios para su correcta operación y mantenimiento, algunas de estas características se describen, las que deben estar en el catálogo, apoyadas por gráficos o esquemas pero sin limitarse solo a esta información.

- a. Velocidad de giro del péndulo o taquímetro (rpm): en los modelos, mecánico-hidráulicos y electro-hidráulicos.
- b. Velocidad de giro de la bomba de aceite (rpm), que tiene un control y accionamiento independiente, y es una electrobomba.
- c. Carrera del servomotor (m), es la distancia que puede recorrer el pistón del servomotor para variar la posición del mecanismo de admisión de agua, desde marcha en vacío hasta plena carga.
- d. Capacidad de trabajo (Kg-m), que es el valor obtenido de multiplicar la máxima fuerza que se requiere para accionar el mecanismo de admisión de agua a la turbina por la carrera del servomotor.
- e. Regulación o ajuste de velocidad (en %), es el rango de velocidad dentro del cual el regulador puede funcionar; este ajuste se consigue actuando sobre el dispositivo variador de velocidad y se expresa como un porcentaje de la velocidad nominal.
- f. Estatismo permanente (en %), que es la diferencia relativa de las velocidades en vacío y a plena carga de la turbina; generalmente varía entre 0% y 6%.
- g. Tiempo de amortiguación del retroalimentador (segundos), tiempo que demora el pistón del amortiguador en recorrer toda su carrera por acción del resorte. Puede ser graduado mediante una válvula de aguja.
- h. Tiempo de cierre del agua (seg.), es el tiempo que emplea el servo para conseguir un cierre total del mecanismo de admisión de agua a la turbina; por lo general varía entre 3 y 15 segundos.

- i. Grado de insensibilidad (en %), es la variación de velocidad necesaria para que se inicie la regulación, tomada de la medida de fricción que existe en el regulador.
- j. Presión de operación del aceite (PSI), es la máxima presión de trabajo en el circuito hidráulico y que puede regularse mediante una válvula de seguridad; por lo general alcanza los 300 PSI.
- k. Temperatura de operación del aceite (°C), medida en el tanque reservorio, debe estar en sus niveles de operación normal y puede regularse mediante enfriadores.
- l. Capacidad y tipo de aceite (Gls y °G), volumen de aceite necesario en el cárter para el funcionamiento del accionador del regulador, así como el tipo y grado de viscosidad del aceite.
- m. El sistema hidráulico completo, deberá estar diseñado para operar satisfactoriamente con la mínima presión de aceite y soportar en forma segura la máxima presión de aceite.

Los fabricantes de reguladores de velocidad, proponen estructuras funcionales *estándar* de sus equipos para los diferentes tipos de turbinas, a partir de las cuales se pueden realizar las adaptaciones necesarias para una aplicación en particular como el acoplamiento mecánico o requerimiento de fuerza para la regulación.

10.3.4. Montaje y Funcionamiento.

Las especificaciones que siguen, establecen los requerimientos técnicos que debe cumplir el equipo y los accesorios que lo conforman, para su correcto montaje en la planta y funcionamiento adecuado, asimismo, los materiales usados en su fabricación deben ser aptos a las exigencias del servicio prestar.

10.3.4.1. Especificaciones de Montaje.

El regulador de velocidad deberá ser instalado por un técnico calificado, siendo completamente armado como una sola unidad y cumplir con lo siguiente:

- a. El gabinete de control de velocidad (modular), y su actuador deberá colocarse entre la turbina y el generador, protegidos contra salpicadura de agua.
- b. El equipo debe ser montado y fijado en posición vertical, sobre un soporte liso y plano de concreto, no sometido a vibraciones bruscas o golpes.

- c. Delante de la superficie frontal del gabinete de control, habrá un espacio libre suficiente para facilitar la realización de trabajos y operaciones.
- d. Al colocar el actuador, verificar que el eje de accionamiento gire libremente y que el engranaje o acoplamiento se desplace libremente.
- e. La bomba hidráulica debe montarse verticalmente sobre un soporte de concreto no sometido a vibraciones o golpes, y cerca al servomotor principal, con las tuberías de conexión lo más cortas y rectas posibles para evitar pérdidas por rozamiento.

10.3.4.2. Consideraciones para el Funcionamiento.

Para la puesta en servicio se debe tener en cuenta que:

- a. El equipo y componentes deberán estar convenientemente diseñados para facilitar su montaje, limpieza, mantenimiento y operación.
- b. El regulador, deberá ser de tal forma que evite la acumulación de humedad y minimice la deposición de polvo o suciedad en su superficie.
- c. Todas las partes del equipo que estén sujetas a desgaste deberán ser intercambiables.
- d. El desplazamiento del actuador y su acople mecánico deberá ajustarse para posiciones del alabe que van, desde sin carga hasta plena carga.
- e. Al instalar el equipo revisar toda información del fabricante o proveedor como, dimensiones, plano de ensamblaje, acoplamientos y conexiones.

10.3.5. Inspección y Pruebas.

La inspección y pruebas del regulador de velocidad considera lo siguiente:

- a. Realizar las pruebas al sistema de tuberías del actuador, a una presión de 150% de la normal de trabajo, y pruebas a dispositivos de interface de la unidad de control.
- b. Previo a la puesta en operación del equipo de regulación de velocidad, se deberá verificar el correcto conexionado de las instalaciones eléctricas, mecánicas e hidráulicas.
- c. Al concluir la instalación se deberán realizar las pruebas de operación, según las recomendaciones del fabricante y las normas respectivas, esto en presencia de un supervisor o quien recepcione.
- d. Se incluirá un protocolo de procedimientos y pruebas del fabricante, adecuados para el caso, detallando la finalidad y método de trabajo, así como los instrumentos, el que será explicado y entregado.

- e. El equipo deberá tener disponibilidad de repuestos, para hacer el cambio después del desgaste, y el manual del fabricante entregado contendrá los datos de operación y mantenimiento.

10.3.6. Condiciones de Operación.

El equipo suministrado y todos sus materiales, deberán estar diseñados para operar satisfactoriamente en condiciones climáticas de la zona establecida, cuyos valores son:

- Temperatura máxima en verano 18° C.
- Temperatura mínima en invierno - 4° C.
- Altitud sobre el nivel del mar 3,850 m.
- Humedad relativa promedio anual 75%.

Fuente: Expediente técnico de replanteo de obra de la M.C.H. de Colina.

10.4. Normas Aplicables.

Además de las normas del Código Nacional de Electricidad, se admiten otras normas internacionales, siempre y cuando no signifiquen una reducción de la calidad, seguridad y durabilidad de los materiales y el equipo suministrado. Se seguirán las disposiciones, normas y recomendaciones provistas por los siguientes organismos competentes:

- INDECOPI: Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y Protección de la Propiedad Intelectual.
- IEC : International Electrotechnical Commission.
- ISO : Organización Internacional de Normalización.
- AWS : American Welding Society.
- ANSI : American National Standards Institute.
- ASTM : American Society for Testing and Materials.

Deberá considerarse la versión vigente de cada norma a la fecha de colocación del equipo de regulación de velocidad.

En el Anexo E, se dan, las principales casas fabricantes de reguladores de velocidad.

CAPITULO XI

11.1. Evaluación Económica.

11.1.1. Introducción.

El objetivo de este capítulo, consiste en analizar el equipamiento del regulador de velocidad automático propuesto desde el punto de vista técnico y económico, para poder viabilizar y justificar su estudio, mejorando el sistema actual de generación eléctrica en la central de Coline.

En el análisis económico de un proyecto en general, se considera tanto una evaluación económica como la evaluación financiera. La primera supone que todas las compras y ventas son al contado y que el capital es propio, la segunda, incluye a todos los flujos financieros del proyecto, haciendo la distinción entre capital propio y capital prestado.

Cuando se realiza el reemplazo o incorporación de un equipo o maquinaria como es el caso, el análisis se sustenta únicamente en la evaluación económica mas no financiera, por cuanto *“el equipo a anexar solo es parte de un proceso productivo y no produce ingresos por sí mismo”*; es decir su incorporación mejorara la calidad del servicio eléctrico suministrado al usuario, por tanto es muy difícil cuantificar con precisión la contribución de esta máquina en el resultado y en el costo total del producto. Es decir el equipo bajo estudio no genera un ingreso directo, sino que junto con otros, proporciona el servicio determinado, y la inversión hecha, se irá pagando con los beneficios obtenidos a lo largo de la vida útil del mismo.

El periodo de tiempo utilizado como horizonte de evaluación es de 20 años, considerando el promedio de la vida útil estimado del equipo a instalarse en la central de Coline, tomando en cuenta que se le dará un uso apropiado y un adecuado plan de mantenimiento, a efectos de lograr extender la vida útil promedio.

11.1.2. Costos y Beneficios de la Inversión.

11.1.2.1. Costos.

Por lo general los costos de un regulador de velocidad nuevo son altos, pero se justifican. Estos costos implican el activo fijo, intangible y capital de trabajo, y se

subdividen en dos grupos: los de inversión y los de operación y mantenimiento. Se pueden desagregar en los siguientes ítems:

Inversión del proyecto.

a. Activo fijo:

Equipo Electromecánico.

- Regulador de velocidad automático.
- Sistema amplificador de fuerza.

Montaje e Instalación.

- Instalación del equipo.
- Fletes de transporte.
- Pruebas y Otros.

b. Activo Intangible:

- Estudios de pre inversión.
- Asesoría técnica y supervisión.
- Gastos generales.

c. Capital de Trabajo:

Costo de Operación.

- Gastos de personal.
- Lubricantes, grasas y otros.
- Equipo e implementos de seguridad.

Costo de Mantenimiento.

- Repuestos y materiales.
- Herramientas.
- Personal y otros.

11.1.2.2. Beneficios.

La mayoría de las pequeñas centrales de generación trabajan sin personal permanente, y funcionan mediante un sistema automático de control. La implementación del equipo de regulación de velocidad, beneficiara, reduciendo costos en la operación de la central, en

comparación con lo que demanda el actual sistema manual, dependiente de un operador permanente para la regulación y control; también se incrementara la seguridad, tanto para el personal de operación como en la producción de energía eléctrica.

a. **Disminución de Costos a través de:**

- Reducción de costos de operación.
- Reducción de costos de mantenimiento.
- Eliminación de costos por daños secundarios.
- Reconocimiento de fallas a tiempo.

b. **Incremento de beneficio a través de:**

- Optimización del aprovechamiento de energía.
- Aumento de la seguridad de los equipos.
- Menos tiempos de parada en reparaciones.
- Incremento de la vida útil de la central.

Dentro de los beneficios económicos se consideran dos ítems: Ingresos por Venta de Energía y por Valor Residual.

- Venta de Energía.

Es un ingreso mensual adicional, que se cobrara desde la puesta en operación del equipo de regulación de velocidad, hasta el fin de su vida útil.

- Valor Residual.

Es el valor del bien (equipo de regulación), en su último año de vida útil en la central, tomando en cuenta su depreciación o pérdida de valor en función del tiempo.

Se cobrara una tarifa fija mensual a los usuarios y eventualmente se pondrá un monto adicional por alguna contingencia; el dinero recaudado servirá para gastos de operación y mantenimiento de la central.

No se ha elaborado el cuadro de Flujo de Caja, por cuanto el proyecto no genera ningún ingreso como ganancia o lucro, por tanto no se puede cuantificar los indicadores de la evaluación económica.

11.1.3. Análisis Costo - Beneficio.

La decisión en torno a la implementación o no del proyecto o estudio, se basa en identificar los costos y beneficios atribuidos al mismo, y valorarlos con el objetivo de determinar si es conveniente o no su ejecución.

La evaluación económica utiliza el método Costo - Beneficio, para lo cual se requiere definir cuáles son los costos, los beneficios y cuantificarlos con la mayor precisión posible.

Para este proyecto, los costos están dados por: la inversión inicial, el costo de mantenimiento y el costo de recambio de piezas. Como beneficio tenemos un mejor rendimiento por kilovatio/hora, y el ahorro de personal (operario), por cuanto este solo tendrá que supervisar eventualmente y no como se hace ahora en forma permanente.

11.1.4. Indicadores de Beneficio Inmediato.

Junto con los antecedentes descriptivos del estudio, y luego de realizar la evaluación económica para ver la factibilidad del proyecto, el cual se determina a través de algunos indicadores, y los resultados obtenidos confirmaban que es completamente factible.

Entonces se tiene:

a. Calidad del Producto.

Los parámetros eléctricos, como la tensión y frecuencia, mejoran, estando dentro de límites o rangos aceptables de operación, sin trasgredir las tolerancias permitidas.

b. Continuidad del Suministro.

La confiabilidad de la generación eléctrica mejorara, teniendo una continuidad en el servicio eléctrico a los usuarios, y menos interrupciones por fallas en la central.

c. Personal Contratado.

Con regulación manual, se tiene 1 operario por turno de trabajo de 8 horas, en total 2 operarios cubren las horas de control de diurnas. Con la regulación automática, 1 operario para supervisión del funcionamiento, por aproximadamente 15 minutos. 4 veces al día. Lo que conlleva un ahorro en pago de personal.

11.2. Propuesta de Inversión a Detalle.

Para definir el costo unitario del equipo físico de regulación de velocidad seleccionado y sus componentes asociados, se tomaron como referencia valores sugeridos por algunas casas fabricantes y valores publicados en páginas Web de quienes comercializan e instalan estos equipos, los que se encuentran descritos y valorizados en dólares, en los ítems del cuadro N° 11.1, el que sirvió para hacer el análisis de la inversión económica con el cuadro comparativo.

Cuadro N° 11.1: *Inversión total y a detalle para implementar el regulador.*

Ítem	Descripción.	Propuesta A	Propuesta B	Propuesta C
01	Regulador de velocidad electrónico analógico*.	\$29,300.00	\$27,300.00	\$28,600.00
02	Sistema mecánico de acoplamiento al inyector**	\$ 270.00	\$ 350.00	\$ 300.00
03	Supervisión de montaje y puesta en servicio.	\$ 190.00	\$ 190.00	\$ 190.00
04	Capacitación en el manejo del equipo.	\$ 250.00	\$ 250.00	\$ 250.00
05	Transporte hasta el emplazamiento.	\$ 690.00	\$ 690.00	\$ 690.00
06	Descarga y montaje del equipo.	\$ 220.00	\$ 220.00	\$ 220.00
07	Imprevistos.	\$ 160.00	\$ 160.00	\$ 160.00
Total		\$31,080.00	\$29,160.00	\$30,410.00

Fuente: Elaboración propia.

* El precio no incluye el I.G.V.

** Costo relativo al acoplamiento.

El cuadro de inversión para la implementación del regulador electrónico analógico, tomo en cuenta las siguientes propuestas económicas:

- Propuesta A; fabricante Andritz (Austria), modelo Hipase -T.
- Propuesta B; fabricante L& S Electric, (EEUU.), modelo VT-500.
- Propuesta C; fabricante Reivax, (EEUU.), modelo RVX1000.

Todas las propuestas se han tomado el modelo básico del fabricante, con unidad hidráulica de baja presión incluida, además cumplen con las normas y especificaciones mostradas en el Capítulo X, siendo la diferencia su precio y lugar de fabricación, ya que ANDRITZ es una empresa Austriaca con fabricación de reguladores en Brasil, sin embargo L& S ELECTRIC y REIVAX, son empresas de Americanas con fabricación en Argentina y Brasil respectivamente.

El costo total de inversión para la implementación del equipo de regulación de velocidad, considerando la alternativa de “menor costo” entre las tres propuestas es de \$. 29,160.00.

Finalmente, concluimos que la evaluación económica realizada nos da elementos para concluir en la viabilidad del estudio.

Con el equipo regulador de velocidad en funcionamiento, se podrá tener una evaluación real de campo que valide los indicadores descritos anteriormente.

En el Anexo F, se muestran los catálogos de los reguladores de velocidad electrónicos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones.

Se presentan las conclusiones principales de lo expuesto en esta tesis, las cuales surgen a partir de los objetivos que fueron planteados al inicio del estudio.

- Luego de realizado el estudio del sistema de generación de la central de Coline, se concluye que “su automatización mediante un equipo de regulación de velocidad, lograra mejorar sustancialmente la calidad del suministro eléctrico”, en términos de parámetros de frecuencia y voltaje evitando se afecte su operación normal y un aumento en la seguridad de la planta, prescindiendo al operador permanente en la central para realizar esta función tan importante. También se tendrá un mejor funcionamiento de los aparatos o equipos eléctricos de los usuarios, con la consecuente reducción de costos por fallos y reparaciones de los mismos.
- Del diagnóstico operativo realizado en la central de Coline, en base a mediciones y observaciones de campo, logro evaluar el comportamiento de las variables más importantes del sistema de generación ante distintos cambios de la demanda, y se advierte una falta de regularidad en la velocidad de la turbina, que incide directamente en la frecuencia y tensión generada, fuera de límites aceptables, y limitando su operación a caudales entre 120 y 150 l/s, esto como consecuencia del desequilibrio entre la potencia eléctrica demandada y la potencia mecánica que aporta la turbina, como consecuencia a perturbaciones externas en el sistema eléctrico, con fluctuaciones instantáneas de frecuencia de 52 a 66 Hz, y más de 35 kW en la demanda, principalmente por conexión y desconexión de carga en la red,

En el diagnóstico físico de los equipos electromecánicos de la planta, evidencio que no hay anomalías o fallas visibles detectables, sean estas por desgaste, deterioro, o como resultado de una falta de mantenimiento de los mismos, además se determinó que estos componentes están en condiciones operativas aceptables de funcionamiento y dentro de su periodo de vida útil.

- El estudio concluyó que la calidad de la energía producida en central de Coline no es óptima, sin los niveles aceptables de tensión, frecuencia y forma de onda sinusoidal, acordes a los requerimientos y normas del mercado eléctrico nacional, y siendo estas

variables dependientes directamente del sincronismo del generador, que se obtiene a su velocidad nominal, con el intervalo de valores admisibles de frecuencia de $\pm 0.6\%$, para variaciones sostenidas; entonces, teniendo controlada la velocidad (cercana a la nominal), la central trabajara con mayor eficiencia, produciendo más kilovatios/hora con el mismo volumen de agua, y evitando se genere una mala calidad de energía, que se traduce en un deficiente funcionamiento de los equipos eléctricos conectados a esta red.

- Se determinó que la estabilidad del generador síncrono está afectada por las características no lineales del sistema de potencia, produciéndose cambios de velocidad instantánea u oscilaciones del generador síncrono tras la ocurrencia de una perturbación. Luego, los sistemas de regulación de velocidad de turbinas, requieren se evalúe y corrija constante y rápidamente la respuesta dinámica de los controles, sean estos de tipo mecánico, eléctrico o electrónico y sus sistemas hidráulicos asociados, para tener el control de frecuencia y potencia activa del generador, asegurando la estabilidad necesaria en todo instante. No es posible mantener una velocidad del generador rigurosamente constante, es preciso admitir un error, ya que este es aprovechado para hacer la corrección mediante la realimentación de la señal al regulador.
- Por lo expuesto en el estudio, se concluye que, el sistema más conveniente para automatizar el control de velocidad, manteniendo regulada la frecuencia del generador, es el sistema por variación de caudal, con cualquiera de sus distintas tecnologías o tipos de reguladores. El sistema de regulación de velocidad estático por disipación de carga, no se recomienda para potencias de generación mayores a los 100 kw., a más que el generador debe trabajar todo el tiempo a plena carga, lo cual acelera el desgaste, deterioro y disminuye su vida útil. Por otro lado, las regulaciones mixtas caudal - carga, requieren de dos equipos de regulación comandados en una sola unidad de control, lo que incrementa la complejidad de la instalación y el sistema mismo, y por tanto su costo es mayor en comparación a las otras opciones.
- El trabajo realizado describió todos los sistemas de regulación de velocidad disponibles para centrales de generación eléctrica, apoyados con diagramas y funciones de transferencia, lo que facilitó su comprensión general, funcionamiento y características. La representación analítica, permitió hacer la evaluación comparativa de cuatro tipos de reguladores de velocidad por caudal, cada uno con tecnología propia, valorando ventajas e inconvenientes de estos sistemas como el de sus principales componentes, concluyéndo

en el cuadro resumen que cuantifica condiciones técnicas y funcionales más el costo comparativo de los reguladores propuestos, con lo cual se logró el objetivo de determinar la alternativa de solución más conveniente para la central de Coline, que es el equipo de regulación Electrónico-Analógico.

Las ventajas operacionales del regulador electrónico-analógico son, la disminución de la complejidad y tamaño del equipo, incremento de la velocidad y calidad de control en señal, reducido mantenimiento, simplicidad de manejo y adecuación a planta, también un menor costo frente al regulador electrónico-digital.

- Se implementó un modelo matemático lineal del sistema de control de velocidad a la turbina, mediante funciones de transferencia y diagramas de bloques. La simulación realizada con Simulink, permitiendo tener el comportamiento aproximado en pequeña perturbación de la central de Coline, estableciéndose el efecto del regulador de velocidad electrónico PI en la respuesta dinámica del sistema, teniendo la variable controlada “velocidad”, bajo la acción controladora “apertura del distribuidor”, con la rapidez esperada de respuesta del regulador frente a variaciones de tipo escalón de carga, manteniendo la frecuencia en el rango deseado, mediante una acción correctiva y reduciendo las desviaciones. También se demuestra que la función de transferencia de la turbina y su conducto en el “Modelo Ideal”, como en el modelo “No Ideal”, es la misma, para los valores de diseño de la central, esto es como consecuencia que ambas funciones han sido linealizadas.

Mediante el método del “Lugar de las Raíces” y con una ganancia menor a 1, se determinó que los Polos en el Semiplano Derecho, se encuentran en la región de estabilidad, entonces el sistema es estable. Los valores típicos utilizados para las constantes de tiempo modulan apropiadamente el controlador electrónico PI, permitiendo amortiguar la amplitud de onda de frecuencia hasta estabilizarla en un tiempo menor a 10 segundos.

Recomendaciones.

De las conclusiones a las que se llegó en el presente estudio y del trabajo mismo, se puede realizar las siguientes sugerencias o recomendaciones:

- Tener la información estadística del comportamiento de los principales parámetros de control del sistema de generación de Coline es recomendable, para evaluar el progreso obtenido con la regulación automática de velocidad.
- Es necesario validar los datos de consumo de energía y proyectar la demanda eléctrica a largo plazo (vida útil de la central), con una serie histórica de mayor longitud temporal, como 20 años o más.
- Efectuar los aforos del río Yanacancha, para contar con registro de medición de caudales de varios años, que no se tiene, debido a que éste es un río pequeño, y luego proyectar estos datos para tener la curva de caudales.
- Se debe tener un plan de mantenimiento preventivo y correctivo periódico, identificando los equipos más sensibles y asesorándose por profesionales para elaborar estos procedimientos, ya que que ningún elemento o pieza es eterno, y todas las partes son indispensables.
- Realizar el estudio de tendencias del comportamiento de las cargas en distintas épocas del año, para poder predecir la demanda, con el fin de satisfacerla completamente y así evitar que se produzcan diferencias que provoquen variaciones de frecuencia.
- Finalmente, tener el catálogo del equipo de regulación adquirido a la vista, y considerar los ajustes, modo de operación, recambio de repuestos y condiciones de la garantía que indica el fabricante para afrontar cualquier contingencia.
- Es recomendable elaborar un manual de operación para mantener dentro de un estándar los protocolos para las distintas maniobras que se requieren ejecutar, esto debido a que mientras no se cuente con un regulador de velocidad, se tendrá que disponer de operadores para la central.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS**Referencias.**

- Álvarez**, Gonzalo. (2010) Perú: Tesis, *Estudio de Reguladores de Carga en P.C.H. y Análisis de su Desempeño*. U. Nacional San Agustín, Arequipa.
- Biella**, Darío. (1994). Perú: *Maquinas Eléctricas II*. Edición, de la Universidad Nacional de Ingeniería (U.N.I.) Lima.
- Caicedo**, Gladys. (1993) Colombia: Artículo, *Obtención de Parámetros de los Reguladores de Velocidad de Turbinas*. Publicado en *Energía y Computación*. Vol. II, Edición N° 5.
- Campos**, Juan. & Lora, Edgar. (2011) Colombia: Monografía, *Calidad de la Energía Eléctrica*. Universidad del Atlántico.
- Castelfranchi**, Giuseppe. (1991). España: *Centrales Eléctricas*. Parte I, ed. Gustavo Gili. S.A. 2da. Edición.
- Castro**, Adriana. (2004). España: *Mini Centrales Hidroeléctricas*, Parte 6. ed. del (I.D.A.E.) Instituto Para la Diversificación de Ahorro de Energía.
- Castro**, Felipe. (2013). Chile: Tesis de licenciamiento, *Impacto de la Generación Distribuida en la Estabilidad de Sistemas de Potencia*. U.N. de Chile.
- Cevallos**, Benigno. (2014). Ecuador: Artículo, *Análisis de Pequeña Señal de Sistemas de Regulación, con DIGSILENT*. Publicado por, Escuela Politécnica Nacional de Quito.
- Condori**, Teófilo. (2011). Perú: *Expediente Técnico de Replanteo de Obra, de la M.C.H. de Coline*. Vol. 1
- Coz**, Federico & Carrasco, Alonso. (1996). Perú: *Manual de Mini y Micro Centrales Hidráulicas, Soluciones Prácticas*. ed. del ITDG.
- De Juana**, José. (2001). España: Libro, *Energías Renovables*. ed. Paraninfo, Thomson Learning.
- Delgado**, Ibeth. (1997) México: Tesis, *Estudio de Sistemas de Regulación de Velocidad y Turbinas, y su Influencia en la Estabilidad Transitoria*. Escuela Politécnica Nacional de México.
- González**, Francisco. (2009) Venezuela: Texto, *Introducción al Control de Frecuencia – Potencia*. 1ra. Edición.
- Grupo de Energías Renovables**. (2009) Cuba: Proyecto de, *Automatización con Fuentes de Energía Renovables*. Facultad de Ing. Mecánica. Publicado por la Universidad del Oriente en Cuba (UO).
- Hidrored**. (2009). Perú; Revista, *Energías Renovables*. Edición Febrero. Publicada por Soluciones Prácticas ITDG.

- Huaroto**, Carlota & Núñez, Máximo. (1989). Perú: Ponencia, *La Problemática Energética Global*. Seminario de Hidrogenaría y Desarrollo Rural. Publicado por ITDG.
- Instituto** de Manejo de Agua y Medio Ambiente. (2007) Perú: Texto, *Quispicanchis, Identificación y Evaluación de Potencialidades*. Publicado por el IMA.
- Játiva**, Fabián (2010). Ecuador: Monografía, *Diseño y Construcción de un Banco para el Control Automático de Velocidad para Plantas Hidroeléctricas*. Publicado por la E.S.P.E.
- Kundur**, Prabha. (1994). U.S.A.: Texto, *Power System Stability and Control*. ed. Neal J. Balu, McGraw-Hill, Inc.
- Kurtz**, Víctor & Anocibar, Héctor (2004) Argentina: Artículo, *Sistema Mixto para el Control de la Generación en Micro Centrales*. Universidad Nacional de Misiones.
- Meneses**, José. (2006) Colombia: Tesis, *Control de Velocidad de Motores para Bombeo de Sist. Hidráulicos*. U. Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Ministerio** de Economía y Finanzas, Electrificación Rural (2011) Perú: *Guía para la Formulación de Proyectos de Inversión*. 1ra. Edición publicada por el M.E.F.
- Ministerio** de Energía y Minas, D.G.E. (2004) Perú: Norma, *Calificación Eléctrica para la Elaboración de Proyectos de Subsistemas de Distribución Secundaria*. de acuerdo a la R.D. N°015-2004-EM/DGE.
- Mora**, Diego. & Hurtado, Jorge. (2004) Colombia: *Guía para Estudios de Pre-Factibilidad de P.C.H. como Parte de Sistemas Híbridos*. de la Pontificia Universidad Javeriana.
- Muguerza**, Daniel. (1992), Argentina: Texto, *Micro Centrales Hidroeléctricas*. ed. EUDEBA, Univ. N. de Misiones.
- OLADE**. (1981). Ecuador: Texto, *Mini Centrales Hidroeléctricas*. Editorial de la Organización latinoamericana para la energía (OLADE).
- OLADE**. (1999) España: Texto, *Manual de Diseño, Estandarización y Fabricación de Equipos para PCH*. ed. OLADE.
- Osinergmin**. (2013) Perú: Texto, *Guía Para el Cálculo de Consumos de Energía Eléctrica*. publicado por el Osinergmin.
- Reivax**. (2007) Brasil: Texto, *Manual, Control Automático de Regulación*. Publicado por la compañía Reivax.
- Rosales**, José. (2016). Chile: Tesis, *Determinación de Parámetros de Regulador de Tensión, Regulador de Velocidad y PSS. de la Central de Carena*. U. de Chile.

- Sarasúa, José.** (2009) España: Tesis de doctorado. *Control de Mini Centrales Hidroeléctricas Fluyentes, Modelado y Estabilidad*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Suárez, Luis.** (1980) Ecuador: Boletín, *Regulador de Velocidad Eléctrico Electrónico de Turbinas Hidráulicas Para Pequeñas Centrales*. Publicado por OLADE.
- Suescún, Ismael.** (2006) Colombia: Artículo, *Centrales Hidráulicas y Reguladores de Velocidad*. Publicado por la Universidad de Antioquia.
- Zenteno, Víctor.** (2000). Perú: Artículo, *Sistema de Control Automático de Velocidad de Generadores Eléctricos de Potencia*. U.N.M.S.M. Ing. Electrónica.
- Zoppetti, Gaudencio.** (1982) México: *Centrales Hidroeléctricas*. ed. G. Gili, S.A. 5ta. Edición.

Bibliografía.

- Caballero, Alejandro.** (2009). Perú: Texto, *Guías Metodológicas para los Planes de Tesis*. ed. Inst. Metodológico Alen Caro.
- Dorf, Richard & Bishop, Robert.** (2005). España: Texto, *Sistemas de Control Moderno*. ed. Pearson Prentise Hall, 10ma. Edición.
- Duncan, J. & Mulukutla, Sarma.** (2004). México: Texto, *Sistemas de Potencia, Análisis y Diseño*. ed. Thomson, 3ra. Edición.
- Chapman, Stephen.** (2012). Colombia: Texto, *Maquinas Eléctricas*. ed. Mc GRAW HILL. 5ta. Edición.
- Gutiérrez, Fidel.** (2004). Colombia: Texto, *El Trabajo de Grado una Oportunidad para Seguir Aprendiendo*. Ed. Fondo de la Universidad Francisco José de Caldas.
- IEEE,** (2017) U.S.A.: Página Web, *Modelos de Reguladores de Velocidad*. del Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Ogata, Katsuhiko.** (2010). España: Texto, *Ingeniería de Control Moderna*. ed. Pearson Prentise Hall, 5ta. Edición.
- Ortiz, Ramiro.** (2001), Colombia: Texto, *Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, Construcción Paso a Paso*. ed. Nomos S.A.
- Paredes, Julio.** (2007). Perú: Texto, *Manual para la Formulación del Proyecto de Tesis*. ed. Universidad Católica de Santa María.
- Salinas, Miguel.** (2008). Perú: Texto, *Elaboración de Expedientes Técnicos*. ed. de la I.C.G. Instituto de la Construcción y Gerencia.
- Villanueva, Reynaldo.** (2010). Perú: Texto, *Centrales Hidroeléctricas*. ed. EDUNI, 1ra. Edición.

ANEXOS

Lista de Anexos:

- A. Glosario de términos.
- B. Ficha de encuesta.
- C. Cuadro de consumo, potencia y usos.
- D. Fabricantes de reguladores de velocidad.
- E. Catálogo de reguladores de velocidad.
- F. Planos de la central de Coline.

ANEXO A: Glosario de Términos.

- a) *Álabe*.- Se refiere a una paleta combada que forma parte de una turbina o bomba, la cual es utilizada para canalizar el fluido en la máquina rotatoria y obtener de éste la energía cinética necesaria para obtener potencia mecánica.
- b) *Álabe Directriz*.- Sirve para regular el caudal de agua que entra en el rodete. El álabe directriz puede orientarse dentro de ciertos límites, al girar su eje respectivo, pasando de la posición de cerrado total, cuando está solapado, a la de máxima apertura que corresponde al desplazamiento extremo.
- c) *Automatismo*.- Dispositivo que se encarga de controlar el funcionamiento de un proceso, capaz de reaccionar ante las situaciones que se presenten, y cuya finalidad es la sustitución del operador humano por un operador artificial en la ejecución de una tarea.
- d) *Carga Instalada*.- Como consumidor, la cantidad de energía que el usuario requiere como lámparas, electrodomésticos, calefacción, refrigeración, motores, etc., no necesariamente todos están encendidos al mismo tiempo. Como productor, es la cantidad de energía máxima, que se puede otorgar a los consumidores, la unidad de la carga o potencia es el vatio.
- e) *Caudal*.- Es el volumen de agua (líquido), que atraviesa el área de una sección en la unidad de tiempo; se mide en litros por segundo (l/s) o también en metros cúbicos por segundo (m³/s).
- f) *Control*.- Regulación, manual o automática, sobre cualquier sistema en general; pueden ser desde sistemas manuales simples, hasta complejos sistemas digitales con mando a distancia.
- g) *Falla*.- Imposibilidad de una unidad, equipo auxiliar u otra obra civil de una central de generación eléctrica, para desempeñar su función, que conlleva al estado de imposibilidad para su operación y puede o no afectar el suministro.

- h) Frecuencia Eléctrica.**- La frecuencia que suministran los generadores de las centrales eléctricas es 50 ó 60 Hertz o ciclos por segundo, y es directamente proporcional a la velocidad de giro del rotor del alternador. Se puede obtener 60 Hz. de frecuencia con una velocidad de giro del generador de 3,600 rpm, ($3,600 \text{ min}^{-1} / 60 \text{ seg} = 60 \text{ ciclos o Hertz.}$).
- i) Golpe de Ariete.**- Fenómeno transitorio de variación de presión y de caudal que ocurre a lo largo de un conducto forzado, ocasionado por la acción de una válvula u otro elemento de control del sistema hidráulico.
- j) Momento de Inercia.**- Es una medida de la resistencia que un cuerpo ofrece a un cambio en su movimiento de rotación en torno de un eje dado. Depende del eje en el cual está girando, de la forma del cuerpo, como de la distribución de su masa. La unidad del momento de inercia “J” es $\text{kg}\cdot\text{m}^2$.
- k) Rechazo de Carga.**- Es cuando se presenta una pérdida súbita e importante de carga, es decir se trata de un comportamiento diferente al que tiene la turbina en condiciones normales; y se debe disminuir la apertura de la válvula de agua.
- l) Regulador de Velocidad.**- Dispositivo que se compone esencialmente de un órgano sensible a las variaciones de velocidad de la turbina, el cual pone en movimiento a un servomotor que hace girar los alabes directrices del distribuidor. El regulador es el mecanismo encargado de equilibrar el par resistente, a fin de que la máquina gire a velocidad constante.
- m) Servomotor.**- El servo consta de un pistón y embolo, accionado por aceite a presión según señales recibidas del regulador, desplaza una biela o bieleta, y en sentido inverso una respecto de la otra, a modo de brazos de un par de fuerzas, proporcionando un movimiento de giro alternativo a un volante de distribución concéntrico con el eje.
- n) Sistema.**- Cualquier entidad compleja constituida por un conjunto de elementos que guardan entre sí una relación de influencia, formando un entramado que asocia unos elementos con otros.

- o) Sistema Automático.**- Proceso dotado de elementos o dispositivos que se encargan de controlar el funcionamiento del mismo, de forma que pueda operar en cierta medida de forma autónoma, sin intervención humana. (*Sistema Automático = Proceso + Automatismo*).
- p) Sistema Oleo-mecánico.**- Este sistema tiene variantes, pero el principio utilizado es el regulador con presión de aceite, el cual consiste en un péndulo centrífugo, que mueve en un sentido o en otro una válvula de distribución que dirige el aceite a presión hacia una cara u otra del embolo del servomotor, abriendo o cerrando el distribuidor de la turbina.
- q) Unidad de Control.**- En la U.C. existirá algún “algoritmo” o “principio de control” que, en función del estado del proceso, calcula acciones de control u órdenes tendentes a llevar dicho proceso al estado deseado de funcionamiento.
- r) Válvula Tipo Mariposa.**- Dispositivo mecánico de accionamiento manual, permite abrir, cerrar, conectar, desconectar o regular el agua y tiene un giro de cuarto de vuelta que controla el flujo por medio de un disco circular, cuyo eje de lumbrera se encuentra en ángulo recto con respecto a la dirección del flujo.
- s) Velocidad de Embalamiento.**- Se presenta cuando el grupo hidroeléctrico está funcionando y ocurre una interrupción brusca, debido a problemas en la red, el fenómeno que se observa es la interrupción brusca del consumo de energía de plena carga a cero, esto admite que la potencia desarrollada decrezca linealmente, desde máxima a cero.
- t) Velocidad de Sincronismo.**- El funcionamiento a la velocidad de sincronismo del generador, en régimen permanente, está definido por la frecuencia de las corrientes del estator en Herz y el número de pares polos de la máquina, una variación en la velocidad de giro, se traduce en una variación en la frecuencia del sistema.

ANEXO B: Ficha de Encuesta.

Modelo de encuesta para la demanda de energía y otros, en los sectores muestreados.

ENCUESTA

Fecha: / /

Información para determinar el consumo promedio de energía por vivienda (uso residencial), de los pobladores beneficiarios de la electrificación de la central de Coline.

1. UBICACIÓN:

- Sectores, Coline y Fause.
- Comunidad de Puyca.
- Distrito de Marcapata.

2. INFORMACIÓN SOCIO ECONOMICA:

a) Datos del encuestado:

Nombre:

Apellidos:

b) Centro poblado donde está su vivienda:

Coline O Fause O otros O

c) Número de miembros de la familia (que viven por lo menos más de la mitad del año)

2 O 3 O 4 O Más de 4 O

d) Actividad económica a la que se dedican principalmente:

Agricultura O Ganadería O Comercio O Otras O

e) Actividad complementaria que realiza y en que horario:

.....

f) Material del que está construida su vivienda (paredes y techo)

Adobe y teja O Adobe y calamina O Piedra, barro, calamina O Otros O

g) Numero de cuartos de la vivienda.

2 O 3 O 4 O más de 4 O

3. INFORMACIÓN DE LA ENERGIA ELÉCTRICA:

a) Generalmente cuantos días al mes NO tiene energía eléctrica:

uno O dos O tres O más de 3 O

b) En los últimos 12 meses, en cuantos NO ha tenido el servicio eléctrico.

en uno O en dos O más de dos O no sabe O

c) Algún artefacto eléctrico, no funciona adecuadamente o se malogra continuamente.

Si, uno O Si, dos O No, ninguno O

d) En el último mes, con qué frecuencia disminuyó la intensidad de la luz en su hogar.

frecuentemente O algunas veces O nunca O

e) Artefactos o equipos que tiene en casa, y el tiempo aproximado que los utiliza al día.

ARTEFAC / EQUIPO	TIENE	CANTIDAD	Hrs/día Encendido
Foco incandescente (100 W)	<input type="radio"/>	1 2 3 4	3 4 5 6 7 más
Foco ahorrador (20 W)	<input type="radio"/>	1 2 3 4	3 4 5 6 7 más
Radio/Grabadora	<input type="radio"/>	1 2	½ 1 2 3 más
Televisión	<input type="radio"/>	1 2	½ 1 2 3 más
Equipo de sonido	<input type="radio"/>	1 2	½ 1 2 3 más
Reproductor de CD/DVD	<input type="radio"/>	1 2	½ 1 2 3 más
Cocina eléctrica	<input type="radio"/>	1	½ 1 2 3 más
Ducha eléctrica	<input type="radio"/>	1	½ 1 2 3 más
Plancha	<input type="radio"/>	1	½ 1 2 3 más
Motor(es)	<input type="radio"/>	1 2	½ 1 2 3 más
Otros:	<input type="radio"/>	1 2	½ 1 2 3 4
.....	<input type="radio"/>	1 2	½ 1 2 3 4

Observaciones:

4. PARA SER LLENADO POR EL ENCUESTADOR:

a) Estado de la vivienda:

mala regular buena

b) Número de personas en la vivienda:

dos tres cuatro más de 4

c) Nivel socioeconómico:

muy pobre pobre medio

ANEXO C: Cuadro de Potencia y Otros.Cuadro N° A-1: *Potencia nominal de equipos eléctricos.*

Equipo Eléctrico	Potencia (vatios)
Foco ahorrador	20 - 25
Foco incandescente	50 - 100
Fluorescente + reactor	50
Radio portátil	25
Radio grabadora	70
Televisor 24´	120
Televisor 32´	180
Reproductor CD/DVD	35
Plancha eléctrica	1500
Ducha eléctrica	3500
Terma eléctrica 50 Lts.	1700
Cocina eléctrica 2 horn.	3000
Hervidor de agua	1800
Refrigeradora	450
Licuada	350
Horno microondas	1200
Cafetera	800
Lavadora	900
Motor de ¼ HP.	50
Amoladora de 4 ½	800
Sierra de carpintero	500 - 1000
Soldadura de arco	5000 - 7000
Bomba de agua	1000 - 4000

Fuente: Elaboración propia.

De la información obtenida en la encuesta:

Cuadro N° A-2: *Potencia promedio instalada por vivienda.*

POTENCIA INSTALADA					
Viviendas:	menos de 700 W	700 W	800 W	más de 800 W	
Coline	3	4	7	5	
Fause	2	2	5	3	muestra
Totales:	5	6	12	8	total: 31
Porcentaje:	16.1%	19.3%	38.7%	25.8%	

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro N° A-3: *Tiempo promedio de uso de cargas por día.*

TIEMPO DE USO		
En viviendas	Alumbrado publico	Escuela primaria
Artef. eléctricos	Luminarias	Computadora
Iluminación	--	Iluminación
Motores	--	--
2 horas	12 horas	6 horas

Fuente: Elaboración propia.

- El promedio de uso de artefactos eléctricos en viviendas es de 2 horas al día.
- Las luminarias de alumbrado público están encendidas 12 horas al día (noche).
- La escuela primaria utiliza la electricidad 6 horas al día (de 7 a.m. a 1 p.m.).

ANEXO D: Fabricantes de Reguladores de Velocidad.

Regulador de la casa L&S Electric - USA..

Principales compañías o casas fabricantes de equipos de regulación de velocidad para turbinas hidráulicas a nivel mundial:

- ANDRITZ HIDRO, (Austria).
- BROWN-BOVERI, (Inglaterra).
- ESCHER-WYSS, (Suiza).
- GILBERT GILKES & GORDON, (Inglaterra).
- J.M. VOITH, (Alemania).
- MIPREG, VATECH, (Austria).
- MITSUBISHI, (Japón).
- NEYRPIC, ALSTOM (Francia).
- OSSBERGER, (Alemania).
- REIVAX, (Brasil).
- SAN GIORGIO, (Italia).
- SULZER, (Suiza).
- V.J. JAHNS, (Alemania).
- WOODWARD, (Estados Unidos).

ANEXO E: Catálogo de Reguladores de Velocidad.**REGULADOR DE VELOCIDAD****Porque un nuevo regulador de velocidad.**

El regulador de velocidad es uno de los elementos fundamental de una turbina hidroeléctrica. Debe ser un equipo robusto, confiable, estable. La necesidad de remplazar un regulador de velocidad tiene varias razones:

- Un regulador antiguo falla y tiene problema de confiabilidad
- Un material obsoleto no tiene repuestos
- Se moderniza el sistema de control
- El manteniendo del regulador antiguo es cada día más difícil.



Turbina con regulador de velocidad mecánico.

Nuestra solución:

ENCOSyst, desarrollo este nuevo tipo de regulador de velocidad basado en un PLC.



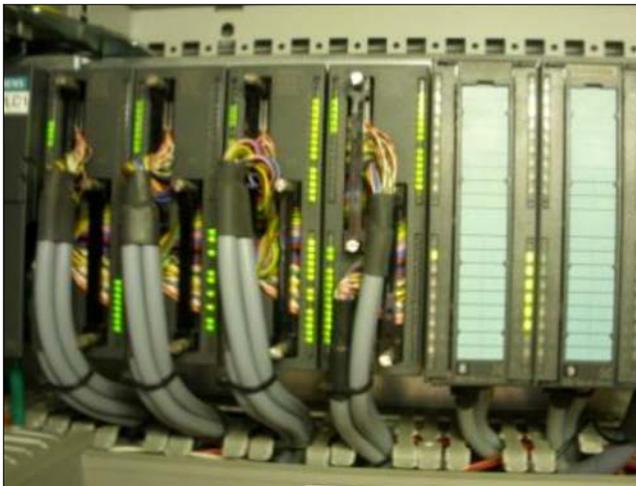
Regulador instalado en el grupo hidráulico de pilotaje de la turbina Francis 400 KW.

El regulador está constituido de diversos elementos estándares que provienen de fabricantes distribuidos mundialmente (Siemens, Bosch, etc.), lo que permite el suministro de repuestos simple y rápido. Ningún componente está fabricado específicamente por este regulador. Nuestro regulador de velocidad esta exclusivamente desarrollado para turbinas hidroeléctricas (Kaplan, Francis, Pelton) de hasta 10MW. y cumple con las normas IEC-61362 y IEC- 60308.

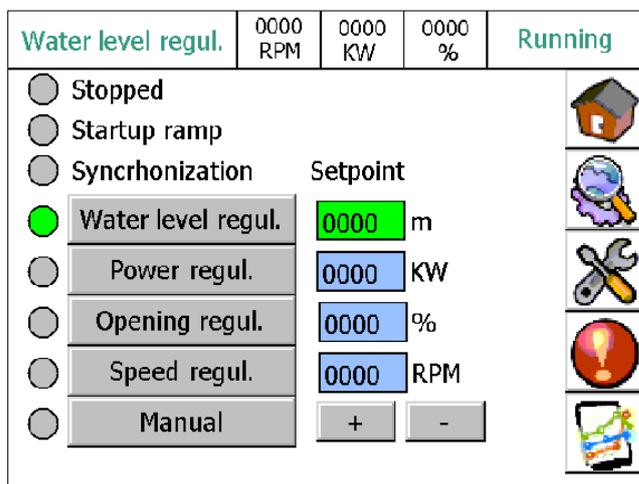
Según los casos, adaptamos nuestro regulador de velocidad al grupo hidráulico de pilotaje de la turbina, o podemos suministrar el grupo completo. Se puede incluir la función de regulación de velocidad dentro del PLC maestro, en el caso de un suministro de panel de control completo.

Beneficios:

- Un nuevo regulador de velocidad permite:
- Un costo bajo de instalación y de operación.
- Repuestos disponibles con elementos estándares que provienen de fabricantes distribuidos mundialmente.
- Mayor estabilidad, rapidez y confiabilidad vs un regulador mecánico y calidad de la energía mejorada.
- Un funcionamiento totalmente automático.
- Nuevas funcionalidades por la planta: regulación de potencia y de nivel.
- La confiabilidad y la performance global del sistema aumentada.
- Integración del regulador de velocidad en el SCADA para centralizar y facilitar la operación de la planta.



El regulador de velocidad está basado en un PLC.



Pantalla de parámetros operativos del regulador ENCOsyst.

Regulador de turbina: control de turbina flexible.

Los controladores de turbina de vanguardia deben cumplir con las demandas más estrictas en términos de seguridad, eficiencia económica y disponibilidad.

Los requisitos básicos son una plataforma de hardware adecuada para aplicaciones industriales y el uso de estándares internacionales. El funcionamiento del controlador de la turbina es fácil con las últimas interfaces gráficas de software. Además, se necesitan funciones remotas eficientes para un mantenimiento y accesos de servicio rápido y fácil.

La fiabilidad de funcionamiento debe garantizarse en todas las condiciones de servicio, incluso con las condiciones ambientales más difíciles (por ejemplo, humedad, EMC). La tecnología de sensor necesaria para detectar señales de campo debe estar diseñada para cumplir con los más altos estándares.

Los sensores de velocidad, algunos de los cuales son redundantes, y el posicionamiento sin deriva del servomotor deben garantizar un funcionamiento sin errores y sin mantenimiento. Para garantizar un mantenimiento fácil, el diseño mecánico debe presentar una estructura modular que también se pueda extender.



HIPASE-T.

El controlador de la turbina es la parte principal de una unidad utilizada para convertir la energía hidráulica existente en energía eléctrica de la manera más eficiente. Asegura una velocidad estable de la turbina en operación sin carga, así como en modo isla y garantiza la adherencia del punto de ajuste en la operación de la red.

El algoritmo central desarrollado en curso hace frente a los mayores desafíos para el controlador de la turbina con respecto a la frecuencia y los controles primarios. Los requisitos de los diferentes tipos de turbinas (Francis, Kaplan o Pelton) y los tamaños de las unidades están respaldados por un concepto de aplicación modular.

Para asegurar una interfaz fácil para los requisitos específicos del proyecto, la placa de aplicación contiene todo tipo de señales de entrada / salida.

Por lo tanto, se prevén interfaces para sensores de velocidad, así como mediciones de voltaje del generador para la medición de velocidad. Además, están disponibles entradas / salidas analógicas para la medición de posiciones e interfaces CT / VT.

Las salidas analógicas se pueden configurar como salidas de voltaje o corriente con límites variables.

Si es necesario, se puede generar una señal oscilante para soportar todo tipo de servoválvulas.

Unidad de Potencia Hidráulica (HPU).

ANDRITZ Hydro, ofrece paquetes completos de unidades de potencia hidráulica de aceite (HPU) que incluyen tanque de sumidero, bombas, válvulas de control y relés principales, filtros, dispositivos de monitoreo y acumuladores de presión. El concepto estándar tiene un diseño modular con el uso de componentes industriales confiables y una presión de diseño de hasta 250 bares.

Preferiblemente utilizamos bombas de pistón axiales autorregulables para el suministro principal de aceite, pero también se pueden usar bombas constantes (por ejemplo, tipo tornillo o engranaje) con bloques de control de bomba especiales.

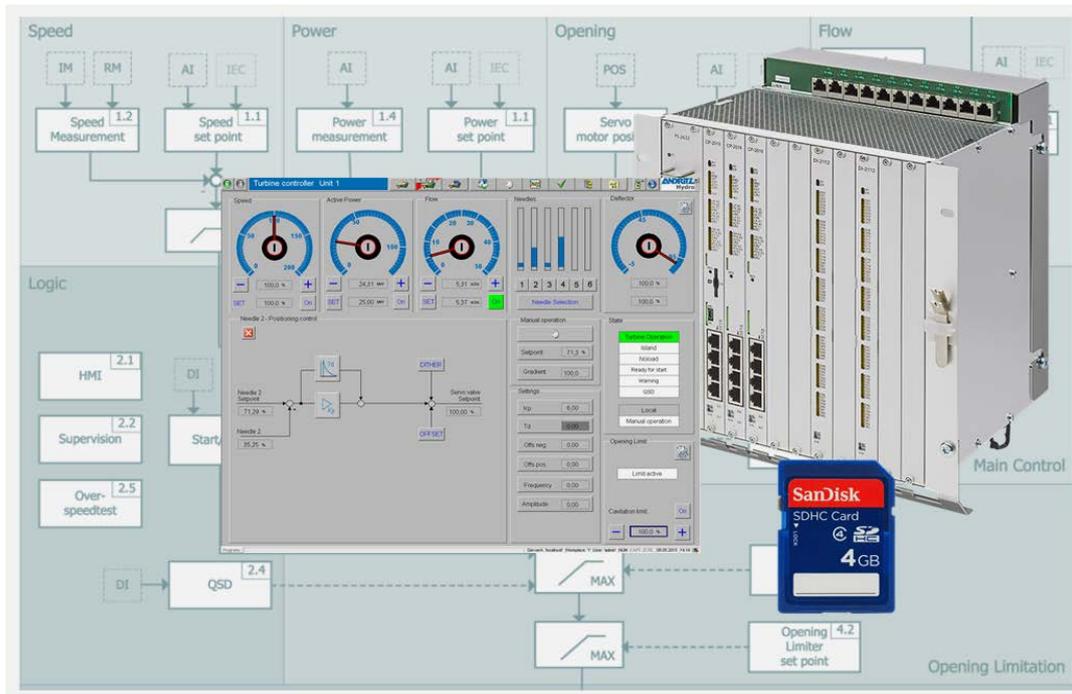
Se han desarrollado características hidráulicas especiales necesarias para el control de la turbina, como bloques de control de la bomba, función a prueba de fallas en las válvulas de relé principales, forma especial de los bordes de control en las válvulas de relé principales, etc., para garantizar la máxima confiabilidad y seguridad.

Una serie de válvulas de relé principales estándar, pero a medida, están disponibles para aplicaciones especiales en sistemas antiguos de baja presión, así como en nuevas turbinas que requieren una alta capacidad de operación.

El sistema hidráulico está diseñado junto con los elementos de accionamiento, tanto para nuevas plantas como para proyectos de rehabilitación.

Regulador de Turbina Digital.

Los gobernadores de turbina hidráulica ANDRITZ son sinónimo de control de turbina flexible y confiable. Los nuevos desafíos en la estabilidad de la red se enfrentan mediante el algoritmo de frecuencia de carga. La gran cantidad de interfaces de comunicación distingue al gobernador digital de turbina TC1703 y TC1703XL, lo que hace que la operación y la asistencia remota sean fáciles de implementar. Debido a los diversos módulos de entrada y salida, se puede utilizar una amplia gama de sensores y actuadores junto con el regulador de turbina, incluso cuando se deben tener en cuenta los componentes hidráulicos existentes.



Gobernador de la turbina

El regulador digital de turbina cumple con los requisitos funcionales del cliente gracias a una solución escalable y modular. Se puede implementar como una solución independiente o como parte integrada de la estructura existente. Las simulaciones anteriores y los estudios de estabilidad aseguran un control estable y confiable.

El gobernador realiza diferentes tareas durante la operación. Comenzando con el arranque de la turbina a pedido y estabilizando la velocidad de sincronización, asegura un control de carga estable cuando la unidad está conectada a la red. Otras tareas son soportar la frecuencia de la red durante el control primario y la reacción rápida en el rechazo de carga y la detección de la isla. Debido a los diversos requisitos de los diferentes modos de operación, la conmutación sin golpes es vital para el regulador de turbina a fin de proporcionar una operación segura y de preservación.

Existe una variedad de funciones especiales relacionadas con el tipo de turbina, p. Ej.

- Cálculo de flujo
- Optimización adaptativa CAM - turbinas
- Control de sobretensión
- Control de descarga para turbinas Kaplan

La operación integral con un panel táctil de alta resolución le brinda al operador la oportunidad de interactuar con el controlador de la turbina y ver toda la información de estado en un dispositivo central. Además, permite la operación local de la turbina dentro de los límites definidos. Los servicios integrales, las garantías de repuestos y las clases de capacitación completan nuestro alcance de entrega.

Contactenos, ANDRITZ HYDRO GmbH - Austria.
contact-hydro.acp@andritz.com



REGULADOR DE VELOCIDADE SISTEMA DE CONTROLE DE TURBINAS

RVX POWER

Os Reguladores de Velocidade RVX POWER, foram desenvolvidos para o controle de velocidade e potência de turbinas na geração de energia elétrica.

São sistemas customizáveis de acordo com cada necessidade e compatíveis com todos os tipos de turbinas, como Kaplan, Pelton, Bulbo e Francis. Podem ser oferecidos com Unidade Hidráulica nova ou podem operar com sistemas hidráulicos já existentes. Sua capacidade de vazão pode atingir até 10.000L/min.

Além da sua função principal, o RVX POWER também incorpora funcionalidades adicionais, como controle da excitação, supervisão e automação da Unidade Geradora.



HARDWARE

O sistema básico possui a seguinte arquitetura:

- Regulador de velocidade digital (CPX) com um canal Automático e Manual;
- Interfaces rápidas I/O (MultiCan) com 48 entradas digitais, 24 saídas digitais, 12 saídas analógicas, 8 entradas analógicas, 3 entradas de TP, 3 entradas de TC e entradas de pick-up;
- Unidade Hidráulica com atuador eletro-hidráulico em bloco manifold com válvulas direcionais de mercado de até 1.500 L/Min;
- Unidade Hidráulica com atuador eletro-hidráulico e válvulas distribuídas próprias de até 10.000L/Min (maiores vazões sob consulta);
- Uma IHM gráfica tipo touch-screen (PAN) totalmente amigável;

- Cada cartão de circuito impresso (PCB) é projetado e fabricado para atender os requisitos da interferência eletromagnética (EMI), conforme normas IEC.



OPÇÕES DE REDUNDÂNCIA

O RVX POWER oferece muito mais opções de redundância em relação ao disponível hoje no mercado. O sistema pode ser combinado com as seguintes opções:

- Regulador de Velocidade redundante (CPX), cada um com canal Automático e Manual. A performance do sistema é monitorada por um watchdog em cada CPX. Comutação para outra CPX é automática e sem distúrbios;
- Redundância no sistema de medição de velocidade por pick-ups e por TPs;
- Interface de I/O redundante (MultiCan), incluindo redundância dos bornes e fiação. A interface de I/O pode ser expandida também;
- Manutenção on-line nos controles poder ser executada enquanto o sistema redundante está em operação.

FUNÇÕES DE CONTROLE E PROTEÇÃO

- Regulação Automática de velocidade da turbina (Automático);
- Controle Automático de Potência ativa, com estatismo de potência;
- Ajustes de ganhos para condições on-line e oV-line;
- Controle manual de posição do servo-motor (Manual);
- Controle automático de nível;
- Controle automático de vazão;
- Transferência entre modos de controle e canais redundantes de regulação;
- Automatismo de partida e parada;

- Sincronismo automático e carregamento automático de carga até valor pré-definido;
- Partida e parada em controle manual;
- Realimentação de posição dos atuadores e servomotores;
- Seleção de controle Local / Remoto;
- Partida e parada com ajuste da taxa de variação da rotação;
- Prevenção contra potência reversa;
- Limitadores de abertura e de potência;
- Supervisão de medição de velocidade, de potência, de comunicação e de posição do servomotor e das válvulas de adução e by-pass, entre outras;
- Funções especiais para testes, como simulação on-line da operação isolada (IEC 60308 item 6.9).
Outras funções podem ser adicionadas sob pedido.

INTERFACE HOMEM-MÁQUINA

O RVX Power tem duas interfaces para operação e ajuste de parâmetros:

- IHM Alfanumérica (CPX).



- IHM Gráfica Touchscreen (PAN).



As seguintes interfaces e protocolos de comunicação estão disponíveis:

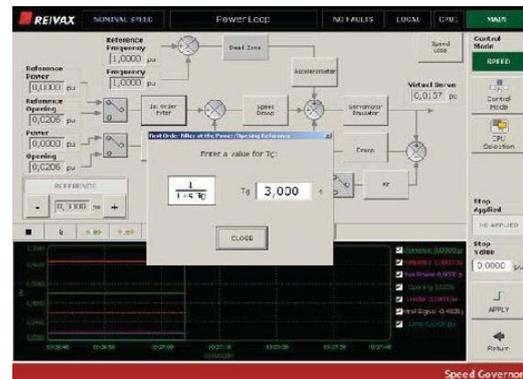
RS-232	Programação / Manutenção
RS-232	DNP3.0 ou IEC 60870-5-101
RS-485	Modbus RTU
Ethernet	Programação, DNP3.0, IEC 60870-5-104, Modbus
TCP IEC 61850	- MMS
IRIG-B	Sincronização de tempo

A IHM gráfica (PAN) possui uma tela de 15" para operação, monitoramento e diagnóstico. Ela tem sua própria CPU e vem equipada com diferentes níveis de senha para proteção. O software pode também ser carregado em um notebook PC. As seguintes telas principais estão disponíveis:

- Operação;
- Sequência de eventos (SOE);
- Data logging;
- Tendência;
- Medição;
- Simulador;
- Blocos com as Funções de transferência do regulador, onde são feitos diretamente os ajustes de parâmetros;
- Recursos para aplicação de degrau e verificação de performance on-line.

Sequência de Eventos.

Esta função permite ao usuário acessar o registro de eventos com uma estampa de 1 ms. Tem capacidade para 3.000 eventos podendo ser configurado. Assim que novos eventos são capturados, os mais antigos são liberados.



O relógio interno da MultiCan fornece a estampa de tempo. O relógio pode ser sincronizado via satélite.

Datalogging.

Esta função pode registrar 20 sinais definidos pelo usuário baseado na seleção de um sinal de trigger. A janela de registro é selecionada e pode ser pré e pós-trigger. A informação é salva e pode ser vista e tratada mais tarde em forma gráfica e em formato de tabela.

Simulador.

O software de simulação permite ao usuário verificar qualquer modificação feita para o sistema antes de carregar os parâmetros do sistema. Pode simular as operações em malha fechada com a turbina parada.

Visualização de parâmetros On-Line.

O software de visualização permite ao usuário ver os valores de cada saída e entrada de cada bloco de modo a validar mudanças de lógica no software.

Entradas Digitais.

Tensão Máxima: até 250 VCC
Corrente Máxima: menor que 10 mA @24 V
Isolação: 2500V RMS, 1 min contra terra e 2500 VRMS, 1 min entre entradas.

Saídas Digitais.

Tensão Máxima: 250 VCC Corrente Máxima: 200 mA
Tipo de Contato: Relê de estado sólido

Resistência.

Contato fechado: menor que 5 Ω Contato aberto :
Maior que 250 M Ω Potência Máxima : 40 VA
Frequência Máxima: 500 Hz
Número de operações: Virtualmente infinito,
sem degradação mecânica Isolação : 2500 V
RMS, 1 min contra terra e 2500 V RMS, 1 Min
entre saídas

Entradas Analógicas.

Faixa: 4 – 20 mA
Isolação: 2500 V RMS, 1 min contra terra.
Proteção: varistor 12 V . Resistência a tensão de
modo comum de 130 V.
Resolução: 16 bits
Precisão: melhor que 99,9% CMRR: melhor que
76 dB

Saídas Analógicas.

Faixa: 4 – 20 mA
Isolação: 2500 V RMS, 1 min contra terra.
Resolução: 16 bits
Precisão: melhor que ou igual a 99,9% Carga:
Máximo 400 Ω
Proteção: Saídas não são danificadas, se
colocadas em paralelo ou curto- circuitadas.

Entradas de TP.

Faixa: nominal 115V
Isolação : 2500V RMS, 1 min contra terra.
Resolução: 16 bits
Precisão : melhor que 99,9% Impedância: 200 k Ω

Entradas de TC.

Faixa : nominal 1 A ou 5 A
Isolação: 2500 V RMS, 1 min contra terra e 2500
V RMS, 1 Min entre entradas. Resolução: 24 bits
Precisão: melhor que 99,9% Impedância:1,62 M Ω .

OUTROS PRODUTOS RELACIONADOS LINHA FLUIDPOWER

- Unidades Hidráulicas completas e automatizadas com controle de atuadores através de Válvulas Proporcionais (4 a 20 mA);
- Normas IEEE 125-2007, IEC 61362 e IEC 60308;
- Sistema de controle pneumático para acionamento de freios e reposição de ar de emergência;

- Válvulas de adução e by-pass;
- Servomotores hidráulicos e transdutores lineares de posição;
- Atuadores eletro-hidráulicos com válvulas proporcionais de mercado de até 1.500 LPM;
- Atuadores eletro-hidráulicos com válvulas distribuidoras REIVAX até 10.000LPM;
*VDX 2500 – Válvula Distribuidora até 2.500LPM, Pressões de até 100 bar
*VDX 7500 – Válvula Distribuidora até 7.500LPM, Pressões de até 65 bar
*Válvulas Distribuidoras Reivax até 10.000 LPM, Pressões sob consulta.
- Sistema de medição de velocidade/rotação (proteção mecânica e elétrica);
- Dispositivo mecânico de proteção contra sobrevelocidade da turbina;
- Estudos e levantamentos técnicos para otimização de Unidades Hidráulicas existentes.



SOLUÇÕES TURN-KEY.

Para fornecer um projeto turn-key, a Com. REIVAX providencia todos os serviços e equipamentos envolvidos com o sistema de excitação, como transformador de excitação, barramento blindado, cabos, dutos, modificações e adaptações necessárias, entre outros.

REIVAX S/A AUTOMAÇÃO E CONTROLE

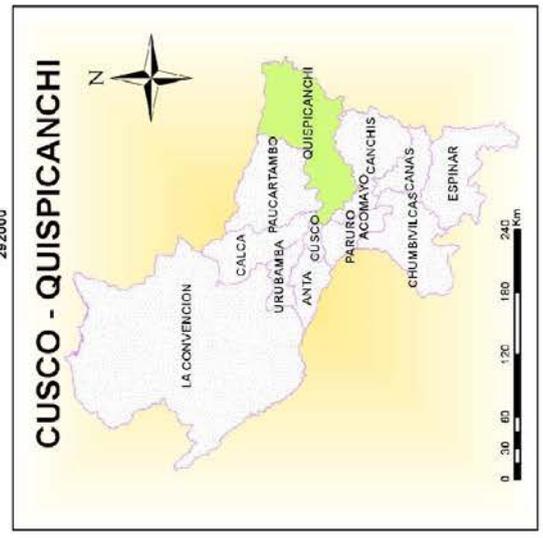
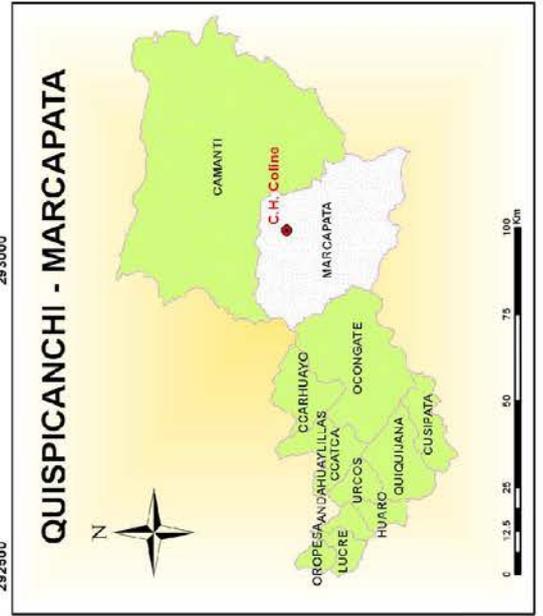
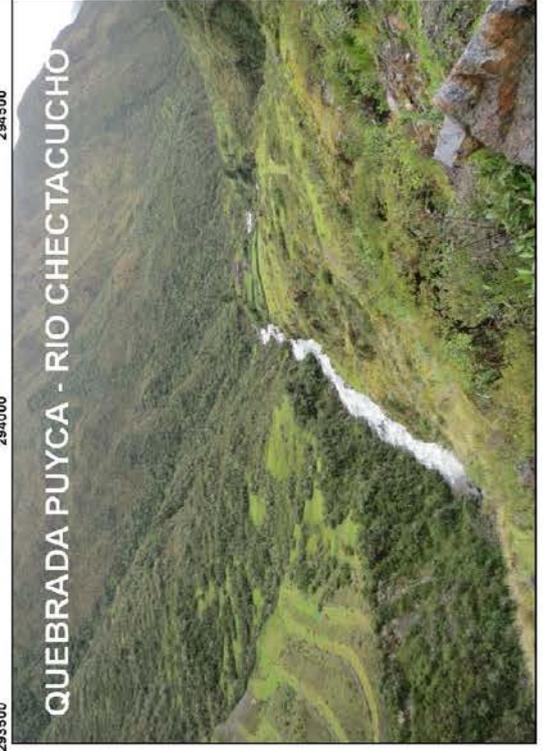
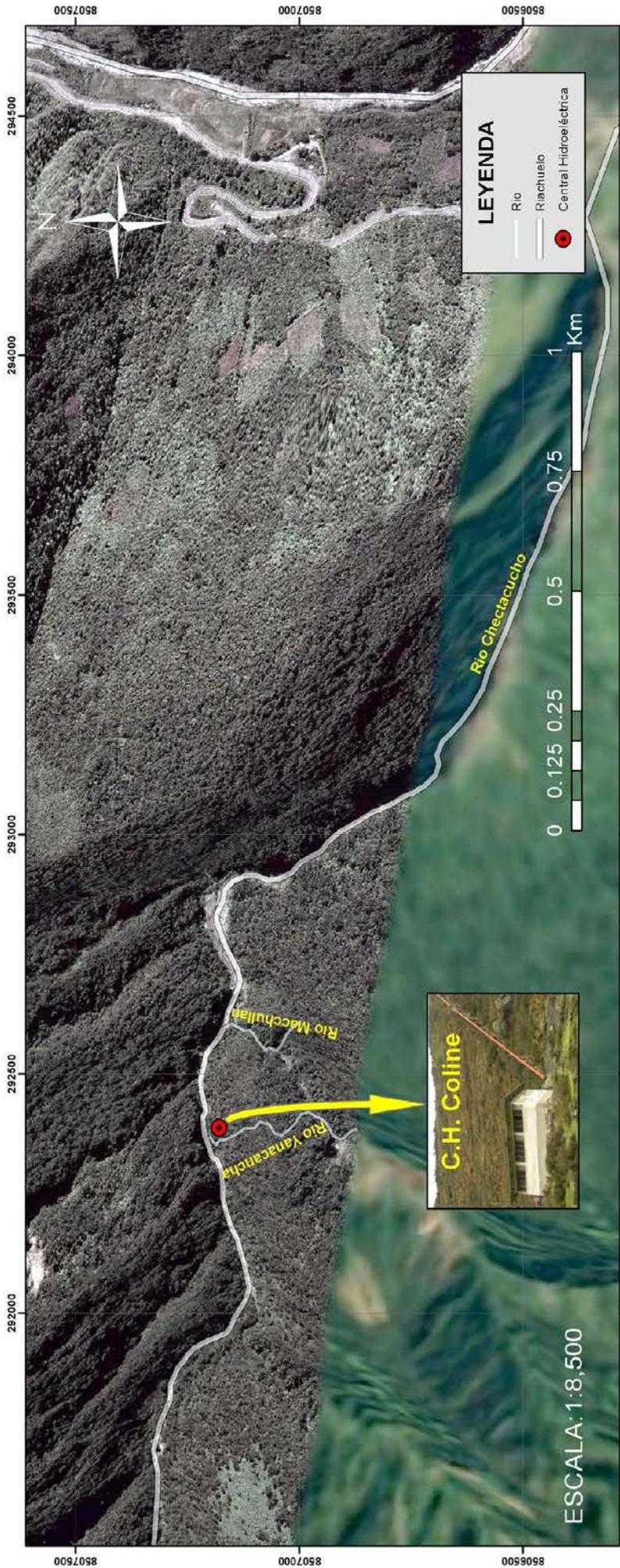
Rodovia José Carlos Daux, 600 João Paulo -
88030-904 Florianópolis - Brasil

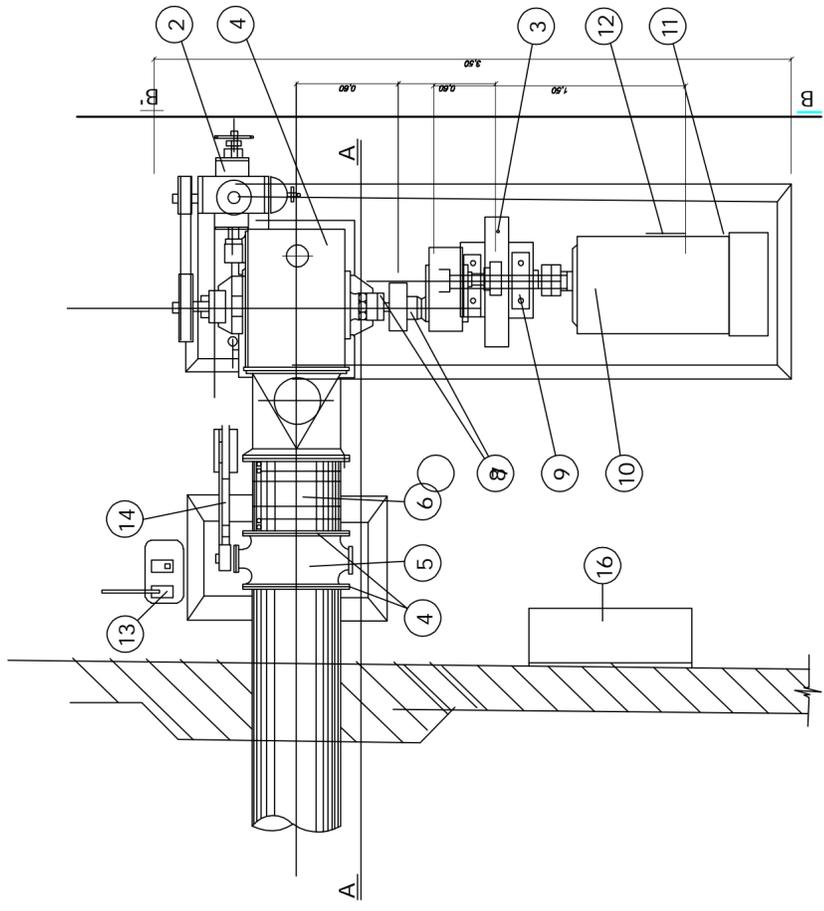
Tel.: +55 48 3027-3700
Fax: +55 48 3027-3735
COM@reivax.com.br

www.reivax.com.

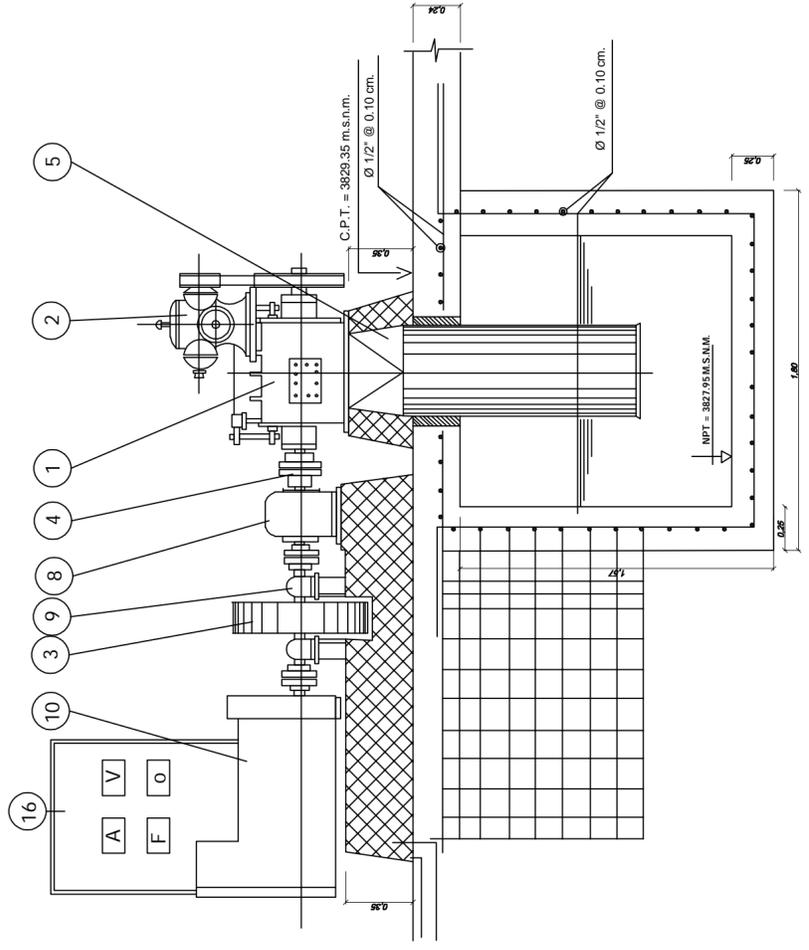
ANEXO F: Planos de la Central de Coline.

- Plano de ubicación geográfica.
- Plano de equipos hidroeléctricos.



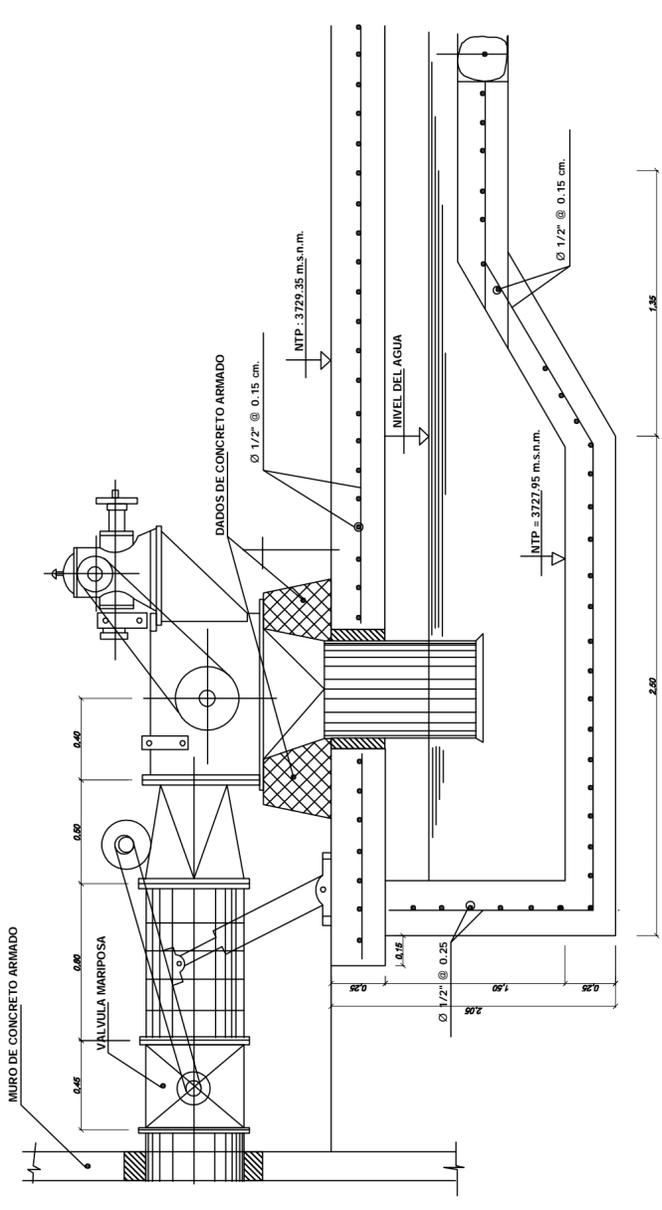


PLANTA
ESC. 1/25



CORTE B - B

VISTA FRONTAL
ESC. 1/50



CORTE A - A
VISTA DE PERFIL
ESC. 1/25

LEYENDA

- 1.- TURBINA MICHEL BANKI
- 2.- REGULADOR OLEOMECANICO
- 3.- VOLANTE DE INERCIA
- 4.- BRIDAS Y EMPAQUES DE ACOPILE
- 5.- VALVULA MARIPOSA
- 6.- JUNTA DE MONTAJE
- 7.- COPLES METALICOS
- 8.- MULTIPLICADOR DE VELOCIDAD
- 9.- CHUMASERAS CON RODAMIENTOS
- 10.- GENERADOR SINCRONO
- 11.- BORNE DE PUESTA A TIERRA
- 12.- CAJA DE BORNES
- 13.- GATA HIDRONEUMATICA
- 14.- BRAZO VALVULA MARIPOSA.
- 15.- BATERIA SERVICIOS AUXILIARES
- 16.- REGULADOR ELECTRONICO DE TENSION

Proyecto: **COMUNIDAD CAMPESINA DE PUYCA
C.P. COLINE - DISTRITO DE MARCAPATA**

LUBRICACION		ESTUDIO:	LÁMINA	
CLASIFICACION	CLASIFICACION	CLASIFICACION	AUTOMATIZACION DEL SISTEMA DE REGULACION	
CLASIFICACION	CLASIFICACION	CLASIFICACION	DE VELOCIDAD DE LA M. C. H. DE COLINE	
CLASIFICACION	CLASIFICACION	CLASIFICACION	PLANO	EQUIPAMIENTO HIDROELECTRICO
CLASIFICACION	CLASIFICACION	CLASIFICACION	DIRECCION	
CLASIFICACION	CLASIFICACION	CLASIFICACION	DESC.	INDICADA
CLASIFICACION	CLASIFICACION	CLASIFICACION	FECHA	14/10 DEL 2019

Unico