

## INDICE

AGRADECIMIENTOS.....	ii
RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS.....	ix
CAPÍTULO 1.....	1
MARCO REFERENCIAL.....	1
1.1    Introducción.....	1
1.2    Motivación.....	2
1.3    Planteamiento del Problema.....	3
1.4    Objetivos.....	4
1.4.1    Objetivo General.....	4
1.4.2    Objetivos Específicos.....	4
1.5    Justificación.....	4
1.5.1    Técnica.....	4
1.5.2    Científica.....	4
1.5.3    Social.....	5
1.6    Límites y Alcances.....	5
1.6.1    Límites.....	5
1.6.2    Alcance.....	5
CAPÍTULO 2.....	7
MARCO TEÓRICO.....	7
2.1    Central Hidroeléctrica.....	7
2.2    Reservorio de Agua o Embalse.....	7
2.3    Tubería Forzada.....	8
2.4    Chimenea de Equilibrio.....	8
2.5    Turbinas Hidráulicas.....	10

2.6	Factores de pérdidas de energía a lo largo del sistema.....	15
2.7	Golpe de Ariete .....	18
2.8	Cavitación .....	19
2.9	Partes de la Turbina Hidráulica.....	20
2.10	Clasificación de turbinas por rodete.....	21
2.11	Clasificación de Turbina por la dirección de Entrada de Agua.....	22
2.12	Turbina Francis .....	23
2.13	Generadores Eléctricos.....	25
2.14	Modos de funcionamiento de un generador .....	29
2.15	Excitatriz .....	31
2.16	Teoría de Control Moderno.....	34
2.16.1	Planta.....	34
2.16.4	Linealización.....	35
2.16.6	Características de Desempeño.....	36
CAPÍTULO 3 .....		43
MODELADO MATEMÁTICO Y CONTROLADOR DEL SISTEMA DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA .....		43
3.1	Sistema Hidroeléctrico.....	43
3.2	Modelo de Turbina y Tubería Forzada.....	43
3.3	Sistema de potencia.....	53
3.3.1	Constante de Tiempo Mecánico.....	55
3.4	Servomotor de Compuerta .....	56
3.5	Modelo del Sistema de Generación Hidroeléctrico en Simulink sin control .....	56
3.6	Gobernadores de Velocidad .....	58
3.6.1	Gobernador Mecánico-Hidráulico.....	58
3.6.2	Gobernador PID .....	60
3.7	Modelo del sistema de generación hidroeléctrico en Simulink con sistema de gobernación	62
CAPÍTULO 4 .....		65
ANÁLISIS DE RESULTADOS .....		65

4.1	Cálculo de constantes del modelo .....	65
4.2	Identificación de parámetros de servomotores .....	67
4.2.1	Identificación de servomotor compuerta .....	67
4.3	Validación del Modelo .....	68
4.3.1	Validación de turbinas hidráulicas conectadas a la unidad SJA01 .....	68
4.3.2	Validación de las turbinas hidráulicas conectadas a la unidad SJA02.....	70
4.3.3	Validación del modelo dinámico de la unidad generadora SJA01 .....	71
4.3.4	Validación modelo dinámico unidad generadora SJA02.....	74
4.3.5	Respuesta del sistema SJA01 y SJA02 a disturbios en lazo abierto.....	75
4.4	Comparación entre respuestas del sistema con diferentes controladores .....	76
4.4.1	Respuesta del sistema SJA01 y SJA02 con el gobernador actualmente instalado .....	76
4.4.2	Respuesta del sistema SJA01 y SJA02 con el gobernador actual re-sintonizado.....	78
4.4.3	Respuesta del sistema SJA01 y SJA02 aplicando gobernadores PID convencionales..	80
4.4.4	Respuesta del sistema SJA01 y SJA02 con gobernador PID basado en LQR.....	82
4.4.5	Comparación general entre gobernadores para la unidad SJA01 .....	85
4.4.6	Comparación entre gobernadores para la unidad SJA02 .....	86
4.4.7	Análisis de costos .....	87
CAPÍTULO 5 .....		89
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		89
5.1	Conclusiones.....	89
5.2	Recomendaciones .....	90
5.3	Trabajos Futuros.....	90
BIBLIOGRAFÍA .....		91
ANEXO 1: MODELO EN SIMULINK SIN CONTROL.....		95
ANEXO 2: MODELO EN SIMULINK CON CONTROL CLÁSICO .....		99
ANEXO 3: MODELO EN SIMULINK CON CONTROL PID .....		103
ANEXO 4: EXTRACTO DE LAS CONDICIONES DE DESEMPEÑO MÍNIMO DEL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL BOLIVIANO.....		107