

# Tabla de Contenido

---

Resumen.....	i
Agradecimientos .....	ii
Índice de Tablas.....	v
Índice de Ilustraciones.....	vi
1 Introducción .....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.2.1 Objetivos generales.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Estructura del trabajo .....	2
1.4 Alcances .....	3
2 Estado del arte.....	5
2.1 Generador síncrono y sistema de excitación .....	5
2.1.1 Modelo matemático de un generador síncrono .....	6
2.2 Sistema de excitación y funciones de control .....	13
2.2.1 Sistema de excitación.....	13
2.3 Sistemas hidráulicos y control de velocidad.....	22
2.3.1 Sistemas hidráulicos.....	22
2.3.2 Regulación de velocidad.....	27
2.4 Criterios de Seguridad relacionado a estabilidad según NTSyCS .....	31
3 Métodos de ajuste de controladores.....	34
3.1 Método <i>Ziegler-Nichols</i> .....	34
3.2 Método de respuesta en frecuencia .....	36
3.2.1 Preliminares.....	36
3.2.2 Descripción del método .....	36
3.3 Amortiguamiento de polos críticos utilizando compensación en fase .....	39
4 Metodología .....	41
4.1 Contextualización.....	42
4.2 Modelo de una máquina.....	42
4.3 Modelo multimáquina .....	42
5 Caso de estudio.....	44

5.1	Definición de sistema a estudiar .....	44
5.1.1	El sistema y sus elementos .....	44
5.1.2	Información técnica de Central Carena .....	45
6	Implementación .....	48
6.1	Modelos de Carena.....	48
6.1.1	Elementos básicos del modelo de Carena .....	48
6.1.2	Modelo de una sola máquina.....	52
6.1.3	Modelo multimáquina .....	52
6.2	Ajuste de parámetros de controladores .....	55
6.2.1	Regulador de velocidad.....	55
6.2.2	Regulador de tensión .....	56
6.2.3	Estabilizador de potencia.....	57
7	Resultados.....	59
7.1	Ajuste de reguladores .....	59
7.1.1	Ajuste del regulador de velocidad.....	59
7.1.2	Ajuste de regulador de voltaje .....	60
7.1.3	Ajuste de PSS .....	60
7.2	Resultados de pruebas de modelo de una sola máquina en red .....	63
7.2.1	Funcionamiento del Control de velocidad.....	63
7.2.2	Funcionamiento del control de tensión .....	65
7.2.3	Funcionamiento del PSS .....	66
7.3	Resultados de pruebas de modelo de una sola máquina en isla .....	71
7.4	Resultado de pruebas de modelo multimáquina .....	74
7.4.1	Reajuste del control de velocidad.....	75
7.4.2	Reajuste de control de tensión y del PSS.....	76
7.4.3	Pruebas finales.....	77
7.5	Nuevo diagrama de operación .....	80
8	Conclusiones .....	83
9	Bibliografía.....	85

## Índice de Tablas

---

Tabla 1: Rangos típicos de modos electromecánicos. ....	18
Tabla 2: Ajuste de constantes de primer método de Ziegler-Nichols. ....	35
Tabla 3: Ajuste de constantes de primer método de Ziegler-Nichols. ....	35
Tabla 4: Compensadores de fase. ....	37
Tabla 5: Información Técnica de Turbina de Central Carena.....	45
Tabla 6: Información Técnica de Generador de Central Carena.....	46
Tabla 7: Información Técnica de Transformador de Central Carena .....	47
Tabla 8: Ajuste del regulador de velocidad. ....	59
Tabla 9: Ajuste de regulador de voltaje. ....	60
Tabla 10: Ajuste del PSS .....	61
Tabla 11: Modos de oscilación electromecánicas. ....	61
Tabla 12: Resultado de pruebas de escalón del 5%. ....	66
Tabla 13: Resultados de pruebas de escalón del 5% en vacío. ....	73
Tabla 14: Reajuste de parámetros regulador de voltaje.....	76
Tabla 15: Modos de oscilación en sistema multimáquina. ....	76

# Índice de Ilustraciones

---

Ilustración 1: Diagrama básico de control en generador. ....	5
Ilustración 2: Diagrama básico de control en generador. ....	6
Ilustración 3: Circuitos de rotor y estator en máquina síncrona.....	7
Ilustración 4: Diagrama básico de control en generador. ....	13
Ilustración 5: Funciones de control y protección de sistema de excitación [3]. ....	14
Ilustración 6: Modelo de regulador de tensión ST5B [9].....	16
Ilustración 7: Modos de oscilación electromecánica.....	18
Ilustración 8: Esquema de conexión y estructura de un PSS.....	19
Ilustración 9: Esquema de la formación de la integral de cambio de potencia acelerante. .....	20
Ilustración 10: Modelo PSS2B del tipo integral de potencia acelerante. ....	21
Ilustración 11: Diagrama básico de control en generador. ....	22
Ilustración 12: Vasos comunicantes. ....	23
Ilustración 13: Respuesta en frecuencia ante perturbación [4].....	27
Ilustración 14: Función de transferencia de respuesta inercial.....	28
Ilustración 15: Gobernador PID [13]. ....	30
Ilustración 16: Curva de respuesta en forma de S. ....	35
Ilustración 17: Función de transferencia H(s).....	39
Ilustración 18: Metodología seguida.....	41
Ilustración 19: Diagrama unilineal de Carena y S/E cercanas.....	45
Ilustración 20: Representación en Matlab de máquina síncrona.....	48
Ilustración 21: Representación en Matlab de turbina hidráulica. ....	49
Ilustración 22: Bloque de regulador de velocidad en Matlab. ....	49
Ilustración 23: Representación en Matlab de regulador de velocidad. ....	49
Ilustración 24: Bloque de regulador de tensión en Matlab.....	50
Ilustración 25: Bloque de PSS en Matlab. ....	50
Ilustración 26: Representación en Matlab de ST5B. ....	51
Ilustración 27: Representación en Matlab de PSS2B.....	51
Ilustración 28: Representación en Matlab de transformador elevador. ....	52
Ilustración 29: Representación en Matlab de modelo de una sola máquina .....	53
Ilustración 30: Representación en Matlab de modelo multimáquina. ....	54
Ilustración 31: Zoom de representación en Matlab de modelo multimáquina.....	55
Ilustración 32: Mapa de polos y ceros de sistema sin PSS. ....	62
Ilustración 33: Zoom de mapa de polos y ceros de sistema sin PSS. ....	62
Ilustración 34: Diagrama de Bode de fase de sistema sin PSS. ....	63
Ilustración 35: (a) Respuesta de Potencia Eléctrica ante variación de potencia de referencia. (b) Zoom.....	64
Ilustración 36: (a) Respuesta de frecuencia ante variación de potencia de referencia. (b) Zoom. ....	64
Ilustración 37: Respuesta del sistema ante escalón de tensión de un 5%. ....	65

Ilustración 38: (a) Respuesta de potencia eléctrica ante variación de consigna de potencia. (b) Zoom. ....	66
Ilustración 39: Respuesta de Velocidad ante variación de consigna de potencia. ....	67
Ilustración 40: Respuesta de tensión en bornes ante variación de consigna de potencia. ....	67
Ilustración 41: Respuesta de potencia eléctrica ante aumento de consigna de tensión. ....	68
Ilustración 42: Respuesta de frecuencia ante aumento de consigna de tensión. ....	68
Ilustración 43: Respuesta de tensión en bornes ante aumento de tensión de referencia. ....	69
Ilustración 44: (a) Respuesta de potencia eléctrica ante baja de consigna de tensión (b) Zoom de señal con PSS. ....	69
Ilustración 45: Respuesta de frecuencia ante disminución de consigna de tensión. ....	70
Ilustración 46: Respuesta de tensión en bornes ante disminución de consigna de tensión. ....	70
Ilustración 47: Potencia activa ante escalón de tensión, operación en isla. ....	72
Ilustración 48: Frecuencia ante escalón de tensión, operación en isla. ....	72
Ilustración 49: Respuesta de tensión en bornes ante escalón de tensión, operación en isla. ....	73
Ilustración 50: Respuesta de potencia activa ante escalón de potencia en isla. ....	74
Ilustración 51: Respuesta de frecuencia ante escalón de potencia en isla. ....	74
Ilustración 52: Tensión en bornes en sistema multimáquina, ajuste inicial. ....	75
Ilustración 53: (a) Potencia activa en sistema multimáquina, ajuste inicial. (b) Zoom. ...	75
Ilustración 54: Potencia activa de sistema multimáquina ante escalón de tensión en unidad 4. ....	78
Ilustración 55: Frecuencia de sistema multimáquina ante escalón de tensión en unidad 4. ....	78
Ilustración 56: Tensión en bornes de unidad 4 de multimáquina ante escalón de tensión. ....	79
Ilustración 57: Potencia activa de sistema multimáquina ante escalón de potencia. ....	79
Ilustración 58: Frecuencia de sistema multimáquina ante escalón de potencia. ....	80
Ilustración 59: Tensión en bornes de sistema multimáquina ante escalón de potencia. ....	80
Ilustración 60: Nuevo diagrama de operación. ....	81