

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	2
1.2. Estado del Arte	3
1.3. Hipótesis y Objetivos	6
1.4. Estructura de la Tesis	7
2. Fundamentos de Cálculo y Control Fraccionario	8
2.1. Conceptos Básicos de Cálculo Fraccionario	8
2.1.1. Definiciones Fundamentales	9
2.1.2. Transformada de Laplace en Cálculo Fraccionario	13
2.2. Control PID	14
2.2.1. PID de Orden Entero	15
2.2.2. PID de Orden Fraccionario	17
2.3. Métodos de Sintonización de Controladores	18
2.3.1. Lugar Geométrico de las Raíces	18
2.3.2. Método Ziegler-Nichols para PID	20
2.3.3. Método tipo Ziegler-Nichols para PIDOF	22
2.3.4. Optimización por Enjambre de Partículas	25
2.4. Desempeño de Controladores	28
2.4.1. Especificaciones de Respuesta Transitoria	29
2.4.2. Índices de Desempeño Global	31
2.5. Linealización de Sistemas No Lineales	32
3. Modelación Fenomenológica Sistema de Estanques	35
3.1. Descripción del Sistema	35
3.2. Subsistema de Nivel	38
3.2.1. Caracterización del volumen V	39
3.2.2. Flujo de entrada F_{in}	40
3.2.3. Flujo de salida F_{out}	41
3.2.4. Modelo Fenomenológico de Nivel	42
3.3. Subsistema de Temperatura	43
3.3.1. Modelo Fenomenológico de Temperatura	43
3.3.2. Transferencia de Calor	45
3.3.3. Variables del Subsistema de Temperatura	47
3.3.4. Modelación de Temperaturas	51
3.3.5. Parámetros del Modelo	53

3.4.	Implementación de Modelo de Sistema de Estanques	56
3.4.1.	Resumen del Modelo	56
3.4.2.	Plantilla de Simulink	58
3.4.3.	Resultados de Implementación	62
3.5.	Linealización del Modelo	67
4.	Control de Nivel (SISO)	72
4.1.	Sintonización LGR	72
4.2.	Sintonización Ziegler & Nichols	76
4.2.1.	Curva de Reacción	76
4.2.2.	Límite de Estabilidad	79
4.3.	Sintonización PSO	81
4.4.	Resultados Experimentales	85
5.	Control de Nivel y Temperatura (MIMO)	88
5.1.	Consideraciones Preliminares	88
5.1.1.	Intervalo de Operación	89
5.1.2.	Esquemas de Control MIMO	90
5.2.	Modulación q_{in}	91
5.2.1.	Modulación On/Off	93
5.2.2.	Modulación PWM	94
5.3.	Sintonización en Frecuencia	95
5.4.	Sintonización PSO	103
5.5.	Resultados Experimentales	115
6.	Conclusiones y Trabajo Futuro	121
6.1.	Conclusiones	121
6.2.	Publicaciones Generadas	124
6.3.	Trabajo Futuro	124
	Bibliografía	126
A.	Descripción de Instalaciones	133
B.	Experimentos para modelación de Sistema de Estanques	135
B.1.	Resultado de experimentos Modelación Subsistema de Nivel	135
B.2.	Procedimiento de Ajuste de Subsistema de Temperatura	137
C.	Control SISO	141
C.1.	Sintonización mediante LGR	141
C.2.	Sintonización mediante Z&N	143
C.3.	Sintonización mediante optimización PSO	144
C.4.	Resultados experimentales	146
D.	Control MIMO	149
D.1.	Intervalo de Operación	149
D.2.	Modulación q_{in}	150
D.3.	Sintonización en Frecuencia	152

D.4. Sintonización mediante optimización PSO	156
D.5. Resultados experimentales	160

Índice de figuras

2.1.	Representación gráfica de Derivada Fraccionaria según Riemman-Liouville.	11
2.2.	Representación gráfica de Derivada Fraccionaria según Caputo.	11
2.3.	Lazo de realimentación en un esquema de control.	14
2.4.	Esquema gráfico de aportes de PID de orden entero y PID de orden fraccionario [28].	17
2.5.	Diagrama de sistema de control.	18
2.6.	Curva de Reacción de un sistema FOPDT para método ZN.	21
2.7.	Lazo cerrado con control proporcional para Límite de Estabilidad.	22
2.8.	Límite de Estabilidad de un sistema para método ZN.	22
2.9.	Especificaciones de respuesta transitoria frente a entrada escalón.	29
3.1.	Diagrama ilustrativo sistema de estanques.	36
3.2.	Simbología de instrumentación del sistema de estanques.	36
3.3.	Variables generales del sistema de estanques.	37
3.4.	Variables generlaes del Subsistema de Nivel.	38
3.5.	Curva de volumen V como función del nivel de agua h_c	39
3.6.	Ajuste de parámetros α_1 y α_2 según datos experimentales.	41
3.7.	Esquema genérico para modelación de temperatura.	44
3.8.	Proceso de transferencia de calor por conducción.	45
3.9.	Proceso de transferencia de calor por convección.	47
3.10.	Variables asociadas al estanque cónico.	48
3.11.	Variables asociadas al estanque de recirculación.	49
3.12.	Resultados de ajuste paramétrico en pruebas de enfriamiento.	55
3.13.	Máscara de implementación de modelo en Simulink	58
3.14.	Implementación general de sistema de estanques.	59
3.15.	Implementación de ajuste de volumen V de modelo de sistema de estanques. . .	60
3.16.	Implementación de subsistema de nivel de sistema de estanques.	60
3.17.	Implementación de modelo de temperatura de estanque cónico de sistema de estanques.	61
3.18.	Implementación de modelo de temperatura de estanque de recirculación de sistema de estanques.	62
3.19.	Resultados de simulación de modelo de sistema de estanques - Prueba 1.	63
3.20.	Resultados de simulación de modelo de sistema de estanques - Prueba 2.	64
3.21.	Resultados de simulación de modelo de sistema de estanques - Prueba 3.	65
3.22.	Resultados de simulación de modelo de sistema de estanques - Prueba 4.	66

4.1. Resultados en simulación de controladores sintonizados con LGR.	75
4.2. Curva de Reacción para método Z&N.	77
4.3. Resultados en simulación de controladores sintonizados con Curva de Reacción Z&N.	78
4.4. Límite de Estabilidad para método Z&N.	79
4.5. Resultados en simulación de controladores sintonizados con Límite de Estabilidad Z&N.	80
4.6. Lazo de control SISO para optimización PSO.	81
4.7. Referencia de h_c para optimización PSO.	82
4.8. Resultados en simulación de controladores sintonizados con PSO.	83
4.9. Resultados experimentales de controladores sintonizados con PSO.	86
5.1. Lazo de control MIMO centralizado.	91
5.2. Sección de lazo de control T_c	92
5.3. Resultados en simulación de modulación SM.	92
5.4. Resultados en simulación de modulación On/Off.	93
5.5. Resultados en simulación de modulación PWM.	94
5.6. Resultados en simulación de control MIMO h_c sintonizado en frecuencia - Prueba 1.	99
5.7. Resultados en simulación de control MIMO T_c sintonizado en frecuencia - Prueba 1.	100
5.8. Resultados en simulación de control MIMO h_c sintonizado en frecuencia - Prueba 2.	101
5.9. Resultados en simulación de control MIMO T_c sintonizado en frecuencia - Prueba 2.	102
5.10. Referencia de h_c y T_c para optimización PSO MIMO.	104
5.11. Resultados en simulación de control MIMO h_c sintonizado con PSO descentralizado - Prueba 1.	107
5.12. Resultados en simulación de control MIMO T_c sintonizado con PSO descentralizado - Prueba 1.	107
5.13. Resultados en simulación de control MIMO h_c sintonizado con PSO centralizado - Prueba 1.	108
5.14. Resultados en simulación de control MIMO T_c sintonizado con PSO centralizado - Prueba 1.	108
5.15. Resultados en simulación de control MIMO h_c sintonizado con PSO descentralizado - Prueba 2.	111
5.16. Resultados en simulación de control MIMO T_c sintonizado con PSO descentralizado - Prueba 2.	111
5.17. Resultados en simulación de control MIMO h_c sintonizado con PSO centralizado - Prueba 2.	112
5.18. Resultados en simulación de control MIMO T_c sintonizado con PSO centralizado - Prueba 2.	112
5.19. Resultados experimentales de control MIMO h_c sintonizado con PSO descentralizado - Prueba 1.	116
5.20. Resultados experimentales de control MIMO T_c sintonizado con PSO descentralizado - Prueba 1.	116

5.21. Resultados experimentales de control MIMO h_c sintonizado con PSO centralizado	
- Prueba 1.	117
5.22. Resultados experimentales de control MIMO T_c sintonizado con PSO centralizado	
- Prueba 1.	117
A.1. Sistema de Estanques Laboratorio de Automática.	133
A.2. Bomba y Variador de Frecuencia.	134
A.3. Válvula manual y Sensor de presión.	134
A.4. Controlador Opto 22 e interfaz computacional.	134
B.1. Pruebas experimentales de llenado para ajuste de F_{in}	138
B.2. Pruebas experimentales de vaciado para ajuste de F_{out}	139
B.3. Datos de pruebas de enfriamiento para ajuste de parámetros de subsistema de temperatura.	139
B.4. Convergencia paramétrica de subsistema de temperatura en optimización PSO.	140
C.1. Lugar Geométrico de las Raíces.	142
C.2. Ampliaciones de resultados en simulación de controladores sintonizados con PSO.	145
C.3. Ampliaciones de resultados en simulación de controladores sintonizados con PSO.	147
D.1. Modulaciones On/Off de q_{in}	150
D.2. Ejemplo de modulación PWM q_{in}	151
D.3. Modulaciones PWM de q_{in} con muestreo $T = 2$ [s].	152
D.4. Convergencia de algoritmo PSO MIMO en sintonización de controladores descentralizados.	156
D.5. Convergencia de algoritmo PSO MIMO en sintonización de controladores centralizados.	157

Índice de tablas

2.1.	Reglas de sintonización ZN para Curva de Reacción.	21
2.2.	Reglas de sintonización ZN para Límite de Estabilidad.	22
2.3.	Especificaciones para método Curva de Reacción de sintonización PIDOF.	24
2.4.	Parámetros PIDOF para método Curva de Reacción para $0,1 \leq T \leq 5$	24
2.5.	Parámetros PIDOF para método Curva de Reacción para $5 \leq T \leq 50$	25
2.6.	Parámetros PIDOF para método Límite de Estabilidad para $K_c P_c \leq 64$	25
2.7.	Parámetros PIDOF para método Límite de Estabilidad para $64 \leq K_c P_c \leq 640$	25
3.1.	Ajuste de β para cada prueba de vaciado.	42
3.2.	Resumen de parámetros para modelo fenomenológico del subsistema de nivel.	43
3.3.	Parámetros del líquido para modelo fenomenológico del subsistema de temperatura.	53
3.4.	Parámetros dimensionales de estanques para modelo fenomenológico del subsistema de temperatura.	53
3.5.	Condiciones de pruebas de enfriamiento para ajuste paramétrico.	55
3.6.	Parámetros de flujos calóricos por conducción y convección.	56
3.7.	Resumen de parámetros de modelo de sistema de estanques.	57
4.1.	Puntos de operación y parámetros de linealización del modelo de h_c	73
4.2.	Especificaciones de respuesta transitoria para sintonización LGR.	73
4.3.	Parámetros de controladores sintonizados con LGR.	74
4.4.	Señal de referencia para pruebas de Control SISO h_c	74
4.5.	Índices de desempeño para controladores sintonizados con LGR.	75
4.6.	Parámetros de Curva de Reacción Z&N.	77
4.7.	Parámetros de controladores sintonizados con Curva de Reacción Z&N.	77
4.8.	Índices de desempeño para controladores sintonizados con Curva de Reacción Z&N.	78
4.9.	Parámetros de Límite de Estabilidad Z&N.	79
4.10.	Parámetros de controladores sintonizados con Límite de Estabilidad Z&N.	79
4.11.	Índices de desempeño para controladores sintonizados con Límite de Estabilidad Z&N.	80
4.12.	Configuración de parámetros de algoritmo PSO.	82
4.13.	Parámetros de controladores sintonizados con PSO e índice IAE.	82
4.14.	Índices de desempeño para controladores sintonizados con PSO.	84
4.15.	Índices de desempeño para controladores sintonizados con PSO en prueba experimental.	85
4.16.	Índice de desempeño propuesto para resultados experimentales SISO.	87
5.1.	Intervalo de operación de salidas del sistema MIMO.	90

5.2.	Controlador descentralizado para pruebas de modulación q_{in} .	91
5.3.	Índices de desempeño para esquemas de modulación q_{in} .	95
5.4.	Punto de operación para linealización de modelo MIMO.	97
5.5.	Especificaciones para sintonización de controladores en frecuencia.	98
5.6.	Parámetros de controladores sintonizados en frecuencia.	98
5.7.	Señal de referencia Control MIMO - Prueba 1.	99
5.8.	Señal de referencia Control MIMO - Prueba 2.	99
5.9.	Índices de desempeño global para controladores sintonizados en Frecuencia - Prueba 1.	100
5.10.	Índices de desempeño de respuesta transitoria para controladores sintonizados en Frecuencia - Prueba 1.	101
5.11.	Índices de desempeño global para controladores sintonizados en Frecuencia - Prueba 2.	102
5.12.	Índices de desempeño de respuesta transitoria para controladores sintonizados en Frecuencia - Prueba 2.	103
5.13.	Configuración de parámetros de algoritmo PSO MIMO.	103
5.14.	Parámetros de controladores descentralizados sintonizados con PSO.	105
5.15.	Parámetros de controladores centralizados sintonizados con PSO.	105
5.16.	Índices de desempeño resultantes de optimización PSO MIMO.	106
5.17.	Índices de desempeño global para controladores sintonizados con PSO MIMO - Prueba 1.	109
5.18.	Índices de desempeño de respuesta transitoria para controladores sintonizados con PSO MIMO - Prueba 1.	110
5.19.	Índices de desempeño global para controladores sintonizados con PSO MIMO - Prueba 2.	113
5.20.	Índices de desempeño de respuesta transitoria para controladores sintonizados con PSO MIMO - Prueba 2.	114
5.21.	Índices de desempeño propuestos para controladores sintonizados con PSO MIMO.	115
5.22.	Índices de desempeño global para controladores sintonizados con PSO MIMO - Prueba 1 Experimental.	118
5.23.	Índices de desempeño de respuesta transitoria para controladores sintonizados con PSO MIMO - Prueba 1 Experimental.	119
5.24.	Índices de desempeño propuestos para controladores sintonizados con PSO MIMO.	120
B.1.	Resultados experimentales de volumen V en función de nivel de agua h_c en estanque cónico.	136
B.2.	Datos de pruebas experimentales de llenado para ajuste de F_{in} .	137
B.3.	Datos de pruebas experimentales de vaciado para ajuste de F_{out} .	137
C.1.	Especificaciones de respuesta transitoria para controladores sintonizados con LGR.	143
C.2.	Especificaciones de respuesta transitoria para controlador sintonizados con Curva de Reacción Z&N.	144
C.3.	Especificaciones de respuesta transitoria para controlador sintonizados con Límite de Estabilidad Z&N.	144
C.4.	Señal de referencia para optimización PSO SISO.	145
C.5.	Especificaciones de respuesta transitoria para controladores sintonizados con PSO.	146

C.6. Especificaciones de respuesta transitoria para controladores sintonizados con PSO en prueba experimental.	148
D.1. Cumplimiento de función objetivo y restricciones de controladores sintonizados en frecuencia.	154
D.2. Especificaciones de respuesta transitoria para controladores sintonizados en frecuencia - Prueba 1.	155
D.3. Especificaciones de respuesta transitoria para controladores descentralizados sintonizados con PSO MIMO - Prueba 1.	158
D.4. Especificaciones de respuesta transitoria para controladores centralizados sintonizados con PSO MIMO - Prueba 1.	159
D.5. Especificaciones de respuesta transitoria de resultados experimentales con PSO descentralizados - Prueba 1.	160
D.6. Especificaciones de respuesta transitoria de resultados experimentales con PSO centralizados - Prueba 1.	161