

Índice de contenidos

Índice de símbolos	iii
Índice de contenidos	vii
Índice de figuras	xi
Índice de tablas	xv
Resumen	xvii
Abstract	xix
1. Introducción	1
1.1. Clasificación de los NCL	2
1.1.1. Fases del fluido	2
1.1.2. Geometría	3
1.2. Mecanismos de inestabilidad	4
1.2.1. Formación de paquetes calientes	4
1.2.2. Oscilaciones por ondas de densidad	5
1.3. Ecuaciones gobernantes	6
1.3.1. Cantidad de movimiento	6
1.3.2. Energía	7
1.4. Parámetros adimensionales	8
1.5. Sistemas de control PID	9
1.6. Análisis de estudios previos	10
2. Instalación Experimental	13
2.1. Objetivo	13
2.2. Diseño	13
2.2.1. Circuito primario	14
2.2.2. Circuito secundario	16
2.2.3. Sistema eléctrico	17

2.3. Materiales	17
2.3.1. Fluidos	18
2.3.2. Estructurales	18
2.4. Instrumentación	19
2.4.1. Sensores	19
2.4.2. Actuadores	20
2.5. Interfaz y sistema de control	22
2.6. Calibración de instrumentos	25
2.6.1. Termocuplas	26
2.6.2. Sensor de presión	26
2.6.3. Válvula neumática	27
2.6.4. Procedimiento de arranque	28
3. Modelo Computacional	29
3.1. Esquema del modelo	29
3.1.1. Suposiciones	29
3.1.2. Configuración de nodos	31
3.2. Ecuaciones de dinámica	34
3.2.1. Nodos de simple fase	34
3.2.2. Nodo de dos fases	35
3.2.3. Caudal de convección natural	37
3.2.4. Sistema de ecuaciones	39
3.3. Ajuste del modelo	39
3.3.1. Punto de operación	40
3.3.2. Escalón en \dot{q}_c	42
3.3.3. Escalón en ω_s	43
4. Diseño del Sistema de Control	45
4.1. Estrategia de control	46
4.1.1. Retroalimentación negativa	46
4.1.2. Método RGA	46
4.1.3. Linealización del sistema	48
4.2. Diseño de los lazos de control	50
4.2.1. Proceso de diseño	51
4.2.2. Lazo de presión	52
4.2.3. Lazo de temperatura	54
4.2.4. Sistema de control a lazo cerrado	55

5. Resultados	59
5.1. Caracterización del NCL	59
5.1.1. Límites de operación	60
5.1.2. Barridos de potencia y caudal	60
5.1.3. Rango de operación	62
5.1.4. Desestabilización del NCL	62
5.1.5. Tasa de cambio límite de \dot{q}_c	63
5.2. Optimización del sistema de control	66
5.2.1. Lazo de presión	66
5.2.2. Lazo de temperatura	67
5.3. Resultados con sistema de control optimizado	68
6. Análisis y Discusión	75
6.1. Analisis adimensional	75
6.1.1. Circuito primario - G_m y Re_{ee}	75
6.1.2. Intercambiador de calor	78
6.2. Validación del sistema de control	79
7. Conclusión	81
A. Sistema de ecuaciones	83
A.1. Ecuaciones de estado	83
A.2. Ecuaciones constitutivas	84
A.3. Parámetros de control	85
A.4. Constantes	85
B. Modelado del sistema	87
C. Fotografías del Termosifón	93
D. Código de control: Programación en C	99
E. Puesta en marcha del NCL	111
F. Resultados selectos	113
G. Análisis de incerteza	121
G.1. Re_{ee}	121
G.2. G_{Tm}/N_G	123
G.3. \overline{Nu}	124
G.4. Re_s	125
G.5. Errores estimados	126

Bibliografía	127
Agradecimientos	131