

# Índice General

## 1. Introducción

1.1. Motivación .....	1
1.2. Definiciones generales .....	2
1.3. Estado del arte .....	4
1.4. Alcance y Objetivos .....	8
1.5. Organización de la tesis .....	9
1.6. Aportes y publicaciones científicas.....	10
1.7. Referencias .....	10

## 2. Modelado de sistemas complejos con componentes dimensionalmente heterogéneos

2.1. Introducción.....	15
2.2. Acoplamiento de problemas simples .....	16
2.2.1. Dos componentes 1D .....	16
2.2.2. Múltiples componentes 1D.....	24
2.3. Acoplamiento de múltiples componentes heterogéneos .....	26
2.3.1. Relación con métodos clásicos.....	34
2.3.2. Un ejemplo para aclarar la notación .....	35
2.4. Estrategia de acoplamiento en problemas lineales .....	38
2.5. Estrategia de acoplamiento en problemas no lineales .....	39
2.5.1. Solucionadores para problemas no-lineales.....	39
2.5.2. Iteraciones internas y externas.....	41
2.6. Problemas transitorios .....	42
2.6.1. Discretización temporal.....	42
2.6.2. Pasos de tiempo local y global.....	44
2.6.3. Algoritmo de Broyden considerando la evolución temporal.....	44
2.7. Resultados numéricos.....	48
2.7.1. Dos componentes dimensionalmente heterogéneos.....	48
2.7.2. Estructura del tipo satélite .....	54
2.7.3. Estructura de hélice doble .....	57
2.8. Condiciones de borde tipo Robin.....	61
2.9. Conclusiones.....	63
2.10. Referencias.....	64

### **3. Modelos unidimensionales en hemodinámica computacional**

3.1. Introducción.....	67
3.2. Ecuaciones fundamentales.....	69
3.2.1. Modelo matemático.....	69
3.2.2. Condiciones de acoplamiento.....	70
3.3. Enfoque de descomposición de caja negra.....	71
3.3.1. Problema de Interfaz.....	71
3.3.2. Discretización temporal.....	73
3.3.3. Solucionadores para problemas no lineales.....	74
3.3.4. Implementación computacional.....	75
3.3.5. Iteraciones internas y externas.....	76
3.4. Resultados Numéricos.....	77
3.4.1. Descomposición de un vaso sanguíneo 1D en dos tramos.....	77
3.4.2. Estructura tipo Árbol.....	82
3.5. Aplicación en hemodinámica.....	86
3.5.1. Red vascular.....	86
3.5.2. Descomposición jerárquica.....	86
3.5.3. Simulación numérica.....	88
3.6. Alternativas de discretización temporal.....	92
3.6.1. Diferentes pasos de tiempo para cada componente.....	93
3.6.2. Diferentes niveles de paso de tiempo.....	94
3.7. Conclusiones.....	96
3.8. Referencias.....	96

### **4. Componentes dimensionalmente heterogéneos en redes hidráulicas**

4.1. Introducción.....	99
4.2. Acoplamiento de modelos dimensionalmente heterogéneos.....	100
4.2.1. Modelado matemático.....	100
4.2.2. Imposición de condiciones de borde de caudal.....	104
4.3. Estrategia de descomposición.....	105
4.3.1. Problema de variables de interfaz.....	106
4.3.2. Tratamiento del problema con múltiples componentes.....	111
4.4. Resultados numéricos.....	112
4.4.1. Algunos aspectos de implementación.....	112
4.4.2. Condiciones de contorno en las interfaces de acoplamiento.....	112
4.4.3. Ejemplo 1: Bomba tipo jet axisimétrica.....	113
4.4.3.1. Sensibilidad respecto del algoritmo iterativo.....	115
4.4.3.2. Sensibilidad respecto de la forma de onda de la bomba.....	115
4.4.3.3. Sensibilidad respecto de los parámetros físicos.....	117
4.4.4. Ejemplo 2: Sistema hidráulico bidimensional de circuito cerrado.....	118
4.4.5. Ejemplo 3: Sistema hidráulico tridimensional cerrado.....	122

4.4.6. Ejemplo 4: Flujo de sangre en un brazo humano.....	125
4.5. Conclusiones.....	130
4.6. Referencias .....	130

## **5. Modelado del sistema cardiovascular completo**

5.1. Introducción.....	133
5.2. Modelado con componentes heterogéneos .....	135
5.2.1. Componentes del sistema cardiovascular .....	135
5.2.2. Ecuaciones de acoplamiento y datos de entrada-salida.....	137
5.2.3. Aproximación numérica .....	139
5.3. Estrategia de descomposición .....	139
5.3.1. Algoritmo iterativo de Broyden .....	139
5.3.2. Iteraciones internas y externas.....	139
5.3.3. Pasos de tiempo local y global.....	140
5.3.4. Algoritmo de Broyden considerando la evolución temporal.....	140
5.3.5. Eficiencia computacional .....	142
5.4. Resultados numéricos.....	142
5.4.1. Modelado 1D-0D del flujo sanguíneo en el sistema cardiovascular completo .....	143
5.4.2. Modelado 3D-1D-0D del flujo sanguíneo en un aneurisma cerebral .....	149
5.4.3. Modelado 3D-1D-0D del flujo sanguíneo en un brazo .....	151
5.4.4. Modelado 3D-1D-0D del flujo sanguíneo en la aorta .....	153
5.5. Comentarios adicionales.....	159
5.6. Conclusiones.....	160
5.7. Referencias .....	161

## **6. Conclusiones y Trabajos Futuros**

6.1. Conclusiones.....	165
6.2. Trabajos Futuros .....	167

## **A. Publicaciones asociadas a la tesis**

## **Agradecimientos**