

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	2
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Alcances	3
2. Antecedentes	4
2.1. Aterosclerosis y estenosis	4
2.1.1. Morfología de la enfermedad	6
2.2. Estenosis de la arteria carótida	7
2.2.1. Arteria Carótida	7
2.2.2. Estenosis en la arteria carótida	8
2.2.3. Grado de estenosis carótida y riesgo de ACV	9
2.2.4. Velocidad sistólica máxima (PSV) y grado de estenosis	10
2.2.5. Discusiones sobre la evaluación del riesgo y severidad de la enfermedad	10
2.3. Flujo sanguíneo en la arteria carótida con estenosis	12
2.3.1. Reología	12
2.3.2. Ecuaciones de Navier-Stokes	12
2.3.3. Caracterización Laminar	13
2.4. Simulaciones CFD de arterias carótidas	13
2.4.1. Simulaciones CFD	13
2.4.2. Obtención de modelos anatómicos adecuados	14
2.4.3. Condiciones de Borde	18
2.4.4. Presión pulsátil en la salida	21
2.5. Estudios Previos	23
2.6. Discusiones del capítulo	27
3. Metodología	28
3.1. Aspectos Generales	28
3.2. Simulaciones en Ansys Fluent	28
3.3. Procedimiento General	29
3.4. Reconstrucción de Geometrías	30
3.4.1. Caso sano e interpolación de curvas fundamentales	30
3.4.2. Definiciones para arterias enfermas	33
3.4.3. Reconstrucción de curvas $\mathbf{r}_{ica}(x, \varepsilon)$ originales	34

3.4.4.	Redes Neuronales para encontrar $\mathbf{r}_{ica}(x, \varepsilon)$	35
3.4.5.	Curvas $r_{ica}(x, \varepsilon)$ finales	37
3.4.6.	Reconstrucción 2D de geometrías axisimétricas	38
3.4.7.	Reconstrucción 2D de geometrías excéntricas	39
3.4.8.	Modelos 3D de arterias enfermas	45
3.5.	Condiciones de Borde	47
3.5.1.	Flujo másico pulsátil en la entrada	48
3.5.2.	Presión pulsátil en la salida	50
3.6.	Consideraciones físicas del flujo	52
3.7.	Mallado e Independencia de mallado	53
3.8.	Validación del modelo numérico	55
3.9.	Parámetros hemodinámicos y morfológicos	56
3.9.1.	Parámetros morfológicos	56
3.9.2.	Parámetros hemodinámicos	56
4.	Resultados y Análisis	59
4.1.	Flujo de sangre en la salida	59
4.2.	Velocidad sistólica máxima	61
4.3.	Gráficas de velocidad y distorsión del flujo	63
4.3.1.	Líneas de corriente	64
4.3.2.	Vectores de velocidad	66
4.3.3.	Perfiles de velocidad	66
4.4.	Efectos de la estenosis en la presión	69
4.4.1.	Gradiente de presión	70
4.4.2.	Coefficiente de Pérdida de Presión	73
4.4.3.	Esfuerzo de Corte en la pared	75
4.4.4.	Relación entre Δp , CDP_e y PSV	77
4.4.5.	Relaciones entre Flujo, Δp y PSV	79
4.4.6.	Relaciones entre WSS_{max} , Δp y PSV	80
4.5.	Discusiones del capítulo	81
5.	Conclusiones	83
	Bibliografía	84
	Anexos	89
A.	Metodología	90
A.1.	Esquema reconstrucción ECA	90
A.2.	Curvas originales de Smith	91
A.3.	Implementación de Red Neuronal	91
A.4.	Geometrías 3D	92
A.5.	UDF condiciones de borde	93
B.	Resultados	96
B.1.	Contornos de velocidad media	96
B.2.	Vectores de velocidad	97
B.3.	Contornos de presión sistólica	98

B.4. Contornos de Esfuerzo de Corte Espacio Temporal	99
--	----

Índice de Tablas

2.1. Pruebas clínicas y comparación entre endarterectomía y tratamiento médico en pacientes con estenosis	9
2.2. Comparación de accidentes cerebrovasculares entre estenosis concéntricas y excéntricas	11
2.3. Coeficiente de correlación de Pearson entre severidad de la estenosis (CSA) y gradiente de presión (PG)	25
3.1. Grado de estenosis ε en Smith et al. y en curvas reconstruidas	34
3.2. Ejemplo matriz de atributos y etiquetas utilizados por la red neuronal	35
3.3. Coeficientes de Fourier para el ajuste de \dot{m}_{cca}	49
3.4. Coeficientes de Fourier para el ajuste de $p(t)$	51
3.5. Detalle mallas estudiadas	54
3.6. Resultados y diferencias de los mallados respecto de la malla más fina	54

Índice de Ilustraciones

2.1. Aterosclerosis	4
2.2. Trombosis en la arteria con estenosis	5
2.3. Morfologías de estenosis	6
2.4. Excentricidad	7
2.5. Arteria carótida	7
2.6. Geometría 3D de arteria carótida sana	8
2.7. Criterios NASCET y ECST	9
2.8. Medición de <i>PSV</i> mediante ultrasonido y correlación con grado de estenosis	10
2.9. Problemas relativos a la medición de la <i>PSV</i>	11
2.10. Modelos de viscosidad	12
2.11. Geometría 3D por medio de funciones analíticas	14
2.12. Diagrama esquemático de la geometría de la arteria carótida	15
2.13. Ajuste de angiografía real a plantilla 2D de caso sano	15
2.14. Obtención de curva $r_{ica}(x)$	16
2.15. Curva $r_{eca}(x)$	16
2.16. Curva $r_{ica}(x)$ promedio	17
2.17. Geometrías 3D construidas a partir de características reales	17
2.18. Geometría 3D reconstruida a partir de imágenes médicas	18
2.19. Caudal y Velocidad en la entrada de la arteria carótida	19
2.20. Geometría 3D reconstruida a partir de imágenes médicas	19
2.21. Perfil de velocidad de Womersley	20
2.22. Presión constante en la salida	21
2.23. Circuito RCR de Windkessel	22
2.24. Presión pulsátil en la salida	22
2.25. Geometrías en Steinman y Tambasco	23
2.26. Resultados del trabajo de Steinman et al.	24
2.27. Intensidad de turbulencia en estenosis excéntricas y concéntricas	24
2.28. Trabajo de Chen et al.	26
3.1. Esquema Metodología	29
3.2. Interpolación curvas de Smith et al.	31
3.3. Diagrama esquemático de reconstrucción de la ICA para el caso sano	31
3.4. Geometría 2D de arteria carótida sana	33
3.5. Proceso de obtención curva $r_{ica}(x, 0.3)$ original	34
3.6. Resultados Red Neuronal	36
3.7. Curvas $r_{ica}(x, 0.4)$ y $r_{ica}(x, 0.7)$	37

3.8. Esbozo 3D radio perpendicular a la ICA	37
3.9. Geometrías 2D enfermedades axisimétricas	38
3.10. Curvas constantes en modelos de geometrías excéntricas	40
3.11. Reconstrucción de geometrías excéntricas a partir de línea central	41
3.12. Obtención de la línea central (\bar{x}, \bar{y}) en geometrías excéntricas	41
3.13. Curva radio perpendicular original y aproximada $r_{ica}(x, \varepsilon)$, primera iteración	43
3.14. Curva original y aproximada $r_{ica}(x, \varepsilon)$, tercera iteración)	44
3.15. Perfiles 2D Geometrías excéntricas	44
3.16. Esquema reconstrucción modelos 3D	45
3.17. Modelo 3D geometría concéntrica $\varepsilon = 0.4$	46
3.18. Modelo 3D geometría excéntrica $\varepsilon = 0.4$	47
3.19. Condiciones de borde de entrada y salida	47
3.20. Flujo volumétrico en arteria carótida común	48
3.21. Flujo másico en la entrada y su ajuste de Fourier	49
3.22. Pulso de presión obtenido con modelo RCR de Windkessel y ajuste de Fourier	51
3.23. Mallado geometría excéntrica con $\varepsilon = 0.75$ (general)	53
3.24. Mallado geometría excéntrica con $\varepsilon = 0.75$ (detalle)	53
3.25. Validación	55
4.1. Flujo de sangre en ambas ramificaciones	60
4.2. Flujo promedio ICA	60
4.3. Flujo promedio ICA (ajuste)	61
4.4. Velocidad sistólica máxima	61
4.5. Velocidad sistólica máxima (Ajuste lineal)	62
4.6. Contornos de velocidad media en el ciclo	63
4.7. Puntos Ciclo	63
4.8. Líneas de corriente	64
4.9. Líneas de corriente	64
4.10. Líneas de corriente	65
4.11. Líneas de corriente	65
4.12. Vectores de velocidad	66
4.13. Líneas perpendiculares al flujo	66
4.14. Perfiles de velocidad axial en \mathcal{L}_1	67
4.15. Perfiles de velocidad axial en \mathcal{L}_2	67
4.16. Perfiles de velocidad axial en \mathcal{L}_3	68
4.17. Perfiles de velocidad axial en \mathcal{L}_4	68
4.18. Contornos de presión sistólica $\varepsilon = 0.5$	69
4.19. Presión en línea centra ICA	70
4.20. Gradiente de presión en ciclo sanguíneo	70
4.21. Gradiente de presión	71
4.22. Presión distal en sístole	72
4.23. Coeficiente de Pérdida de Presión	73
4.24. Coeficiente de Pérdida de Presión	73
4.25. Correlación CDP_e y reducción de flujo promedio	74
4.26. Esfuerzo de corte promedio $\varepsilon = 0.5$	75
4.27. Esfuerzo de corte en línea superior	76
4.28. Esfuerzo de corte promedio	76

4.29. WSS_{max} según grado de estenosis	77
4.30. Coeficientes de basados en Δp respecto de la PSV	77
4.31. Correlación CDP_e y aumento de PSV	78
4.32. Relación entre flujo promedio en ICA y otros parámetros hemodinámicos . .	79
4.33. Relación entre WSS_{max} y otros parámetros hemodinámicos	80
A.1. Diagrama esquemático de reconstrucción de la ECA para el caso sano	90
A.2. Curvas promediadas para grados de estenosis $\varepsilon = 0.215, 0.43$ y 0.75	91
A.3. Concéntrica	92
A.4. Concéntrica	92
A.5. Concéntrica	93
B.1. Contornos de velocidad media en el ciclo $\varepsilon = 0.3$	96
B.2. Contornos de velocidad media en el ciclo $\varepsilon = 0.7$	96
B.3. Vectores de velocidad $\varepsilon = 0.3$	97
B.4. Vectores de velocidad $\varepsilon = 0.7$	97
B.5. Contornos de presión sistólica $\varepsilon = 0.3$	98
B.6. Contornos de presión sistólica $\varepsilon = 0.7$	98
B.7. Esfuerzo de corte promedio $\varepsilon = 0.3$	99
B.8. Esfuerzo de corte promedio $\varepsilon = 0.7$	99