

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes Generales	1
1.2. Motivación	2
1.3. Objetivo general	3
1.4. Objetivos específicos	3
1.5. Alcances	3
2. Metodología	5
3. Antecedentes	7
3.1. Antecedentes biológicos	7
3.1.1. Aneurisma	7
3.1.2. Patogénesis de aneurisma arterial	9
3.1.3. Crecimiento de aneurisma	11
3.1.4. Ruptura de aneurisma	12
3.2. Modelo hemodinámico	13
3.2.1. Ecuaciones de Navier-Stokes	13
3.2.2. Caracterización de Flujo Incompresible	13

3.2.3.	Caracterización de Flujo Laminar	14
3.2.4.	Modelo de viscosidad de la sangre	14
3.3.	Condiciones de borde	16
3.3.1.	Entrada	16
3.3.2.	Salida	20
3.4.	Modelo CAD del aneurisma	25
4.	Resultados	27
4.1.	Parámetro simulación	27
4.2.	Implementación de condiciones de entrada	28
4.2.1.	Perfil parabólico	28
4.2.2.	Implementación de la teoría de Womersley	29
4.3.	Implementación de condiciones de salida	30
4.3.1.	Implementación de la presión en función del tiempo	31
4.3.2.	Implementación de la teoría de Windkessel	31
4.4.	Simulaciones iniciales	34
4.5.	Prueba de malla	38
4.5.1.	Parámetros ANSYS	38
4.5.2.	Resultados prueba de malla	40
4.6.	Caso Base	53
4.6.1.	Velocidad	54
4.6.2.	Presión	62
4.6.3.	WSS	68
4.6.4.	OSI	76

4.7. Comparación de casos	77
4.7.1. Tiempos de simulación	78
4.7.2. Velocidad	79
4.7.3. Presión	98
4.7.4. WSS	110
4.7.5. OSI	127
5. Discusión y Conclusión	133
5.1. Discusión	133
5.1.1. Caso Base	133
5.1.2. Comparación de casos	135
5.2. Conclusión	141
Bibliografía	143
A. Perfiles de Velocidad y Presión de salida en MATLAB	149
B. User Defined Function	159
C. Configuración ANSYS	174
D. Parámetros de calidad de malla	188

Índice de tablas

3.1. Modelos de viscosidad de la sangre*	15
3.2. Coeficientes y frecuencia del ajuste para valores discretos del pulso promedio*.	17
3.3. Coeficientes de Fourier para valores discretos de la presión*.	21
3.4. Valores caraterísticos de la geometría del aneurisma.	26
4.1. Tiempos de simulación y diferencia porcentual.	51
4.2. Cantidad y porcentaje de nodos con WSS menor a 1.5 Pa.	75
4.3. Tiempo de simulación e iteraciones totales.	79
4.4. Distribución de diferencias según su valor, respecto del total de nodos (14711).	87
4.5. Distribución de diferencias según su valor respecto del total de nodos (10022).	92
4.6. Distribución de diferencias según su valor con respecto del total de nodos (26532).	97
4.7. Distribución de diferencias con respecto del total de nodos (14031) en Diástole.	114
4.8. Distribución de diferencias con respecto al total de nodos (14031) en Diástole.	118
4.9. Distribución de diferencias con respecto al total de nodos (17732) en Diástole.	122
4.10. Distribución de diferencias con respecto al total de nodos (17732) en Sístole.	126
4.11. Distribución de diferencias con respecto al total de nodos (17732).	132
5.1. Diferencias porcentual del tiempo de simulación e iteraciones.	136

5.2. Viscosidad dinámica en diástole y sístole en el caso base	139
D.1. Parámetros de calidad para las mallas con comportamiento Hard del Body Sizing.	189
D.2. Parámetros de calidad para las mallas con comportamiento Soft del Body Sizing.	190

Índice de figuras

3.1. Círculo de Willis en el interior del cerebro [17].	8
3.2. Tipos de aneurisma sacular según su ubicación: (a) Lateral, (b) Bifurcación y (c) Terminal [18].	8
3.3. Esquema de forma típica de aneurisma fusiforme [18].	9
3.4. Esquema de forma típica de aneurisma disecante [18].	9
3.5. Estructura básica de los vasos sanguíneos [19].	10
3.6. Pulso de Velocidad Promedio.	17
3.7. Gráfico de presión obtenido por Perktold [31].	21
3.8. Modelos de Windkessel: 2 elementos, 3 elementos y 4 elementos [29].	23
3.9. Esquema del circuito para el modelo de Windkessel de tres elementos [32].	23
3.10. Modelo CAD reconstruido del aneurisma.	26
4.1. Perfil parabólico de referencia calculado en MATLAB para distintos tiempos.	29
4.2. Perfil parabólico de referencia calculado en MATLAB para distintos tiempos.	30
4.3. Función de presión para un ciclo cardíaco.	31
4.4. Valor de c_v en función del número de Womersley [36].	32
4.5. Presión de salida obtenida con el modelo de Windkessel de 3 elementos para la salida con radio mayor (azul) y la salida con radio menor (rojo).	34

4.6. Geometría y mallado para las simulaciones iniciales.	35
4.7. Perfil de velocidad de entrada parabólico calculado en MATLAB y ANSYS-Fluent para 0.1 y 2.0 s.	36
4.8. Perfil de velocidad de entrada de Womersley calculado en MATLAB y ANSYS-Fluent para 0.1 y 2.0 s.	37
4.10. Presión de salida (Windkessel) calculada en MATLAB y ANSYS-Fluent para la salida con radio mayor (izquierda) y salida con radio menor (derecha). . .	37
4.9. Presión de salida en función del tiempo obtenida con MATLAB y con ANSYS-Fluent para la salida con radio mayor.	38
4.11. Iteraciones para la convergencia para todos los tamaños de elementos.	41
4.12. Flujo másico en la entrada.	43
4.13. Flujo másico en la salida de área mayor: (a) Valor y (b) Diferencia porcentual.	43
4.14. Flujo másico en la salida de área menor: (a) Valor y (b) Diferencia porcentual.	44
4.15. Máxima presión en wall2: (a) Valor y (b) Diferencia porcentual.	45
4.16. Presión promedio en wall2: (a) Valor y (b) Diferencia porcentual.	45
4.17. Presión según el tamaño de elemento para wall2: (a) Máximo y (b) Promedio.	46
4.18. WSS promedio en wall2: (a) Valor y (b) Diferencia porcentual.	47
4.19. WSS promedio en función del tamaño de elemento para wall2.	47
4.20. Reynolds máximo en wall2: (a) Valor y (b) Diferencia porcentual.	48
4.21. Reynolds promedio en wall2: (a) Valor y (b) Diferencia porcentual.	48
4.22. Diferencia porcentual malla de elemento 0.0002 m: (a) Máximo y (b) Promedio.	49
4.23. Número de Reynolds según el tamaño de elemento para wall2: (a) Máximo y (b) Promedio.	49
4.24. OSI promedio en función del tamaño de elemento para wall2.	50

4.25. Tiempo de simulación (a) y cantidad de elementos (b) en función del tamaño de elemento.	51
4.26. Mallado de la geometría.	52
4.27. Mallado en el cuello del aneurisma.	53
4.28. Planos al interior del aneurisma.	54
4.29. Campo de velocidad y streamline para el fluido: (a) Diástole y (b) Sístole. . .	56
4.30. Campo de velocidad y streamline en aneurisma: (a) Diástole y (b) Sístole. . .	57
4.31. Campo de velocidad y streamline en aneurisma: (a) Diástole y (b) Sístole. . .	58
4.32. Campo de velocidad y contornos en plano medio: (a) Diástole y (b) Sístole. .	59
4.33. Magnitud de velocidad [m/s] en los nodos: (a) Entrada y (b) P. Medio y (c) P. Superior en diástole.	60
4.34. Velocidad [m/s] en los nodos: (a) Entrada y (b) P. Medio y (c) P. Superior en sístole.	61
4.35. Flujo másico [kg/s] en entrada de aneurisma: (a) Diástole y (b) Sístole. . . .	62
4.36. Campo de velocidad y streamline para el fluido: (a) Diástole y (b) Sístole. . .	64
4.37. Presión en la pared del aneurisma: (a) Diástole y (b) Sístole.	65
4.38. Contornos de presión y velocidad en plano medio: (a) Diástole y (b) Sístole.	66
4.39. Presión [Pa] en los nodos: (a) Entrada y (b) P. Medio y (c) P. Superior en diástole.	67
4.40. Presión [Pa] en los nodos: (a) Entrada y (b) P. Medio y (c) P. Superior en sístole.	68
4.41. WSS en la pared arterial y aneurisma: (a) Diástole y (b) Sístole.	70
4.42. WSS en aneurisma mayor: (a) Diástole y (b) Sístole.	71
4.43. WSS en aneurisma menor: (a) Diástole y (b) Sístole.	72
4.44. WSS en diástole: (a) Wall1, (b) Wall2 y (c) Wall4.	73
4.45. WSS en sístole: (a) Wall1, (b) Wall2 y (c) Wall4.	74

4.46. OSI en la pared de aneurisma mayor: (a) Iso., (b) XY, (c) XZ y (d) YZ.	76
4.47. Número de iteraciones para cada paso de tiempo: (a) Parabólicos y (b) Womersley.	78
4.48. Diferencia relativa de la velocidad en Entada aneurisma: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3 y (d) Caso 4 (Diástole).	80
4.49. Diferencia relativa de la velocidad en Entada aneurisma: (a) Caso 5, (b) Caso 6, (c) Caso 7 y (d) Caso 8 (Diástole).	81
4.50. Diferencia relativa de la velocidad en Entada aneurisma: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3 y (d) Caso 4 (Sístole).	82
4.51. Diferencia relativa de la velocidad en Entada aneurisma: (a) Caso 5, (b) Caso 6, (c) Caso 7 y (d) Caso 8 (Sístole).	83
4.52. Diferencia relativa de la velocidad en Plano transversal medio: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3 y (d) Caso 4 (Diástole).	84
4.53. Diferencia relativa de la velocidad en plano transversal medio: (a) Caso 5, (b) Caso 6, (c) Caso 7 y (d) Caso 8 (Diástole).	85
4.54. Diferencia relativa de la velocidad en plano transversal medio: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3 y (d) Caso 4 (Sístole).	86
4.55. Diferencia relativa de la velocidad en plano transversal medio: (a) Caso 5, (b) Caso 6, (c) Caso 7 y (d) Caso 8 (Sístole).	87
4.56. Diferencia relativa de la velocidad en Plano transversal superior: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3 y (d) Caso 4 (Diástole).	89
4.57. Diferencia relativa de la velocidad en plano transversal superior: (a) Caso 5, (b) Caso 6, (c) Caso 7 y (d) Caso 8 (Diástole).	90
4.58. Diferencia relativa de la velocidad en plano transversal superior: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3 y (d) Caso 4 (Sístole).	91
4.59. Diferencia relativa de la velocidad en plano transversal superior: (a) Caso 5, (b) Caso 6, (c) Caso 7 y (d) Caso 8 (Sístole).	92
4.60. Diferencia relativa de la velocidad en Plano medio: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3 y (d) Caso 4 (Diástole).	94

4.61. Diferencia relativa de la velocidad en plano medio: (a) Caso 5, (b) Caso 6, (c) Caso 7 y (d) Caso 8 (Diástole).	95
4.62. Diferencia relativa de la velocidad en plano medio: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3 y (d) Caso 4 (Sístole).	96
4.63. Diferencia relativa de la velocidad en plano medio: (a) Caso 5, (b) Caso 6, (c) Caso 7 y (d) Caso 8 (Sístole).	97
4.64. Diferencia relativa de la presión en Plano medio: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3 y (d) Caso 4 (Diástole).	99
4.65. Diferencia relativa de la presión en plano medio: (a) Caso 5, (b) Caso 6, (c) Caso 7 y (d) Caso 8 (Diástole).	100
4.66. Diferencia relativa de la presión en plano medio: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3 y (d) Caso 4 (Sístole).	101
4.67. Diferencia relativa de la presión en plano medio: (a) Caso 5, (b) Caso 6, (c) Caso 7 y (d) Caso 8 (Sístole).	102
4.68. Diferencia relativa de la presión en Wall1: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3 y (d) Caso 4 (Diástole).	103
4.69. Diferencia relativa de la presión en wall1: (a) Caso 5, (b) Caso 6, (c) Caso 7 y (d) Caso 8 (Diástole).	104
4.70. Diferencia relativa de la presión en plano wall1: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3 y (d) Caso 4 (Sístole).	105
4.71. Diferencia relativa de la presión en wall1: (a) Caso 5, (b) Caso 6, (c) Caso 7 y (d) Caso 8 (Sístole).	106
4.72. Diferencia relativa de la presión en Wall2: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3 y (d) Caso 4 (Diástole).	107
4.73. Diferencia relativa de la presión en wall2: (a) Caso 5, (b) Caso 6, (c) Caso 7 y (d) Caso 8 (Diástole).	108
4.74. Diferencia relativa de la presión en plano wall2: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3 y (d) Caso 4 (Sístole).	109

4.75. Diferencia relativa de la presión en wall2: (a) Caso 5, (b) Caso 6, (c) Caso 7 y (d) Caso 8 (Sístole).	110
4.76. Diferencia relativa de WSS en wall1 Caso 1 (Diástole): (a) Iso. y (b) XY. . .	111
4.77. Diferencia relativa de WSS en wall1 Caso 2 (Diástole): (a) Iso. y (b) XY. . .	112
4.78. Diferencia relativa de WSS en wall1 Caso 3 (Diástole): (a) Iso. y (b) XY. . .	112
4.79. Diferencia relativa de WSS en wall1 Caso 4 (Diástole): (a) Iso. y (b) XY. . .	112
4.80. Diferencia relativa de WSS en wall1 Caso 5 (Diástole): (a) Iso. y (b) XY. . .	113
4.81. Diferencia relativa de WSS en wall1 Caso 6 (Diástole): (a) Iso. y (b) XY. . .	113
4.82. Diferencia relativa de WSS en wall1 Caso 7 (Diástole): (a) Iso. y (b) XY. . .	113
4.83. Diferencia relativa de WSS en wall1 Caso 8 (Diástole): (a) Iso. y (b) XY. . .	114
4.84. Diferencia relativa de WSS en wall1 Caso 1 (Sístole): (a) Iso. y (b) XY. . . .	115
4.85. Diferencia relativa de WSS en wall1 Caso 2 (Sístole): (a) Iso. y (b) XY. . . .	116
4.86. Diferencia relativa de WSS en wall1 Caso 3 (Sístole): (a) Iso. y (b) XY. . . .	116
4.87. Diferencia relativa de WSS en wall1 Caso 4 (Sístole): (a) Iso. y (b) XY. . . .	116
4.88. Diferencia relativa de WSS en wall1 Caso 5 (Sístole): (a) Iso. y (b) XY. . . .	117
4.89. Diferencia relativa de WSS en wall1 Caso 6 (Sístole): (a) Iso. y (b) XY. . . .	117
4.90. Diferencia relativa de WSS en wall1 Caso 7 (Sístole): (a) Iso. y (b) XY. . . .	117
4.91. Diferencia relativa de WSS en wall1 Caso 8 (Sístole): (a) Iso. y (b) XY. . . .	118
4.92. Diferencia relativa de WSS en wall2 Caso 1 (Diástole): (a) Iso. y (b) XY. . .	120
4.93. Diferencia relativa de WSS en wall2 Caso 2 (Diástole): (a) Iso. y (b) XY. . .	120
4.94. Diferencia relativa de WSS en wall2 Caso 3 (Diástole): (a) Iso. y (b) XY. . .	120
4.95. Diferencia relativa de WSS en wall2 Caso 4 (Diástole): (a) Iso. y (b) XY. . .	121
4.96. Diferencia relativa de WSS en wall2 Caso 5 (Diástole): (a) Iso. y (b) XY. . .	121

4.97. Diferencia relativa de WSS en wall2 Caso 6 (Diástole): (a) Iso. y (b) XY.	121
4.98. Diferencia relativa de WSS en wall2 Caso 7 (Diástole): (a) Iso. y (b) XY.	122
4.99. Diferencia relativa de WSS en wall2 Caso 8 (Diástole): (a) Iso. y (b) XY.	122
4.100 Diferencia relativa de WSS en wall2 Caso 1 (Sístole): (a) Iso. y (b) XY.	124
4.101 Diferencia relativa de WSS en wall2 Caso 2 (Sístole): (a) Iso. y (b) XY.	124
4.102 Diferencia relativa de WSS en wall2 Caso 3 (Sístole): (a) Iso. y (b) XY.	124
4.103 Diferencia relativa de WSS en wall2 Caso 4 (Sístole): (a) Iso. y (b) XY.	125
4.104 Diferencia relativa de WSS en wall2 Caso 5 (Sístole): (a) Iso. y (b) XY.	125
4.105 Diferencia relativa de WSS en wall2 Caso 6 (Sístole): (a) Iso. y (b) XY.	125
4.106 Diferencia relativa de WSS en wall2 Caso 7 (Sístole): (a) Iso. y (b) XY.	126
4.107 Diferencia relativa de WSS en wall2 Caso 8 (Sístole): (a) Iso. y (b) XY.	126
4.108 OSI en wall2: (a) Caso 1, (b) Caso 2, (c) Caso 3 y (d) Caso 4.	128
4.109 OSI en wall2: (a) Caso 5, (b) Caso 6, (c) Caso 7 y (d) Caso 8.	129
4.110 Diferencia relativa de OSI en wall2 Caso 1: (a) Iso. y (b) XY.	129
4.111 Diferencia relativa de OSI en wall2 Caso 2: (a) Iso. y (b) XY.	130
4.112 Diferencia relativa de OSI en wall2 Caso 3: (a) Iso. y (b) XY.	130
4.113 Diferencia relativa de OSI en wall2 Caso 4: (a) Iso. y (b) XY.	130
4.114 Diferencia relativa de OSI en wall2: (a) Caso 5, (b) Caso 6 y (c) Caso 7.	131
4.115 Diferencia relativa de OSI en wall2 Caso 8: (a) Iso. y (b) XY.	131
C.1. Módulo Fluid Flow (Fluent) en Workbench.	174
C.2. Importación de geometría CAD en Geometry del módulo de Fluent.	175
C.3. Insertar Virtual Topology para el mallado.	175
C.4. Menu de selección de cara.	175

C.5. Insertar Virtual Cell:(a) Menu y (b) Virtual Cell.	176
C.6. Insertar Virtual Cell:(a) Menu y (b) Virtual Cell.	176
C.7. Named Selections: (a) Wall1 y (b) Wall2.	176
C.8. Named Selections: (a) Wall3 y (b) Wall4.	177
C.9. Named Selections: Wall5.	177
C.10.Named Selections: inlet.	177
C.11.Named Selections: (a) Outlet menor y (b) Outlet mayor.	178
C.12.Menu de selección de cara.	178
C.13.Named Selection: Fluid Zone (toda la geometría).	178
C.14.Selección de la operación Sizing en el menu.	179
C.15.Selección de geometría: (a) Selección y (b) Selección Sizing.	179
C.16.Detalle de operación Body Sizing y casilla de tamaño de elemento.	179
C.17.Detalle de operación Body Sizing y casilla de comportamiento del elemento.	180
C.18.Sección Sizing de Mesh y parámetros a ingresar.	180
C.19.Sección Advanced de Mesh y parámetros a ingresar.	180
C.20.Botón Update para generar la malla en la geometría.	181
C.21.Parámetros para inicializar Fluent.	181
C.22.Menu para los parámetros del fluido.	182
C.23.Menu para los parámetros del modelo de Carreau.	182
C.24.Menu para cargar UDF: (a) Menu User Defined y (b) Selección de archivo .c.	182
C.25.Métodos para la solución de la simulación.	183
C.26.Módulo Results en Workbench.	184
C.27.Menú para carga de resultados.	184

C.28.Carga de resultados.	184
C.29.Menú para Timestep Selector.	185
C.30.Menú para generar punto, superficie y volumen.	185
C.31.Menú para exportación de resultados.	186
C.32.Ventana para exportación de resultados.	186