

MICROBOMBA DE VACÍO: DISEÑO, MODELADO Y SIMULACIÓN

ING. MAURICIO PEDROZA TORRES

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
GRUPO DE INVESTIGACIÓN DICBOT
BUCARAMANGA**

2014

MICROBOMBA DE VACÍO: DISEÑO, MODELADO Y SIMULACIÓN

ING. MAURICIO PEDROZA TORRES

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN INGENIERÍA MECÁNICA**

DIRECTOR:

**CARLOS BORRÁS PINILLA
PH.D, INGENIERO MECÁNICO**

CODIRECTOR:

**JABID EDUARDO QUIROGA MÉNDEZ
MAGISTER, INGENIERO MECÁNICO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
GRUPO DE INVESTIGACIÓN DICBOT
BUCARAMANGA**

2014

CONTENIDO

	pág
INTRODUCCIÓN	15
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
2. ESTADO DEL ARTE	17
3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	23
3.1 OBJETIVO GENERAL	23
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
4. MARCO TEÓRICO	24
4.1 CLASIFICACIÓN DE LAS MICROBOMBAS	26
4.2 CICLO DE OPERACIÓN EN MICROBOMBAS DE DESPLAZAMIENTO	27
4.3 MICROACTUADORES	30
4.4 SOFTWARE DE SIMULACIÓN COMSOL® MULTIPHYSICS	34
4.5 MÉTODO ARBITRARIO LAGRANGIANO-EULERIANO (ALE)	35
4.6 MODELADO DE LA DINÁMICA DEL GAS	38
4.7 PRESIÓN DE VACÍO ALCANZADA	42
5. METODOLOGÍA	43
5.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ELECCIÓN DEL MODELO	43
5.2 PROTOCOLO DE SIMULACIÓN	45
5.2.1 Simulación 2D	46
5.2.2 Simulación 2D axisimétrica	48
5.2.3 Simulación 3D	49

5.2.4 Validación mediante datos experimentales	51
5.3 ANÁLISIS MECÁNICO	55
5.4 DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO	58
5.5 TIEMPO DE RESPUESTA DE LA CÁMARA DE BOMBEO	60
5.6 SIMULACIÓN MULTIFÍSICA	65
5.6.1 Física fundamental del flujo	67
5.6.2 Interacción fluido-estructura (Problema FSI)	69
5.6.3 Elementos constitutivos de malla	75
5.7 MÁXIMO ESFUERZO VON MISES EN EL DIAFRAGMA	75
5.8 ESQUEMA ELÉCTRICO EQUIVALENTE	79
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS	94
6.1 DEFLEXIÓN PROMEDIO DEL DIAFRAGMA	94
6.2 VALORES DE CAUDAL Y PRESIÓN	95
6.3 VOLUMEN BOMBEADO	101
6.4 MÁXIMO VALOR DE VACÍO	102
6.5 ANÁLISIS DE CONFIGURACIONES ALTERNATIVAS	103
7. CONCLUSIONES	114
8. APORTES	116
9. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	117
BIBLIOGRAFÍA	119
ANEXOS	128

LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Actuadores, comparativa	33
Tabla 2. Parámetros de flujo y sus analogías eléctricas	38
Tabla 3. Actuadores, ventajas y desventajas	43
Tabla 4. Parámetros estructurales	66
Tabla 5. Sistema de ecuaciones FSI	74
Tabla 6. Lista de símbolos FSI	75
Tabla 7. Valores de resistencia calculados	85
Tabla 8. Deflexión promedio del diafragma, estadísticas	95
Tabla 9. Caudal, estadísticas	96
Tabla 10. Presión, estadísticas	97

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. Microbomba para generación de vacío, vista en sección	21
Figura 2. Microbomba para generación de vacío, micromaquinado	22
Figura 3. Microbombas de vacío, vista esquemática	22
Figura 4. Esquema de un espectrómetro de masas	24
Figura 5. Entorno de funcionamiento, microbomba de desplazamiento	25
Figura 6. Clasificación de las microbombas	27
Figura 7. Microbomba con válvulas pasivas, vista esquemática	28
Figura 8. Microbomba libre de válvulas, vista esquemática	29
Figura 9. Microbomba con válvulas activas, vista esquemática	30
Figura 10. Actuador piezoeléctrico sometido a esfuerzo lateral	31
Figura 11. Actuador piezoeléctrico sometido a esfuerzo axial	31
Figura 12. Actuador termoneumático	32
Figura 13. Actuador electrostático	32
Figura 14. Actuador neumático externo	33
Figura 15. Ejemplo unidimensional de movimiento de malla y partículas	36
Figura 16. Circuito equivalente para la microbomba de H. Zhou	41
Figura 17. Actuador de electrodo curvado	44
Figura 18. Implementación en microbomba de desplazamiento	45
Figura 19. Simulación 2D, perfil de flujo	47
Figura 20. Simulación 2D, perfil de presión	48

Figura 21. Simulación 2D axisimétrica, flujo y esfuerzos	49
Figura 22. Simulación 3D, desplazamiento del diafragma	50
Figura 23. Simulación 3D, perfil de flujo	50
Figura 24. Simulación 3D, perfil de presión	50
Figura 25. Perfil de actuación	51
Figura 26. Perfil del ciclo de aplicación de carga	53
Figura 27. Gráficas de desempeño	53
Figura 28. Curvas de generación de vacío	54
Figura 29. Esquema de deflexión de placa circular	55
Figura 30. Respuesta temporal desde posición de máxima deflexión	63
Figura 31. Respuesta temporal desde posición de equilibrio	65
Figura 32. Perfil de actuación adaptado	65
Figura 33. Modelo de microbomba para simulación	66
Figura 34. Límites de las aproximaciones para el modelado de flujo	69
Figura 35. Dominio de interacción fluido-estructura	70
Figura 36. Movimiento de fluido impuesto por estructura móvil	70
Figura 37. Interacción fluido-estructura	71
Figura 38. Aproximación temporal del problema acoplado	71
Figura 39. Solución monolítica para el sistema acoplado	72
Figura 40. Solución escalonada para el sistema acoplado	72
Figura 41. Enfoque de solución problema FSI	73
Figura 42. Distribución de esfuerzos von Mises, $t = 0$ s 0.16 s 0.32 s	77
Figura 43. Efecto en el máximo esfuerzo von Mises (espesor variable)	78

Figura 44. Asiento de la válvula	80
Figura 45. Rugosidad superficial	81
Figura 46. Discretización de cámara circular	83
Figura 47. Arreglo de resistencias equivalentes	83
Figura 48. Pre-succión, circuito equivalente	85
Figura 49. Pre-succión, respuesta temporal	87
Figura 50. Succión, circuito equivalente	88
Figura 51. Succión, respuesta temporal	89
Figura 52. Post-succión	90
Figura 53. Pre-descarga, circuito equivalente	91
Figura 54. Pre-descarga, respuesta temporal	91
Figura 55. Descarga, circuito equivalente	92
Figura 56. Descarga, respuesta temporal	93
Figura 57. Post-descarga	94
Figura 58. Deflexión promedio del diafragma	95
Figura 59. Caudal	96
Figura 60. Presión	97
Figura 61. Perfiles de caudal y presión, $t = 0.02s-0.32s$	98
Figura 62. Volumen bombeado	102
Figura 63. Máximo valor de vacío	103
Figura 64. Efecto en la presión (altura de cámara variable)	104
Figura 65. Efecto en el caudal (altura de cámara variable)	106
Figura 66. Efecto en el volumen bombeado (altura de cámara variable)	107

Figura 67. Efecto en la presión (longitud de canal conector variable)	108
Figura 68. Efecto en el caudal (longitud de canal conector variable)	109
Figura 69. Efecto en el volumen (longitud de canal conector variable)	110
Figura 70. Efecto en la presión (periodo de operación variable)	111
Figura 71. Efecto en el caudal (periodo de operación variable)	112
Figura 72. Efecto en el volumen (periodo de operación variable)	113

LISTA DE ANEXOS

	pág
Anexo A. CÓDIGO MATLAB PARA ANÁLISIS MECÁNICO	129
Anexo B. CÓDIGO MATLAB PARA MÍNIMA PRESIÓN ABSOLUTA	131
Anexo C. TUTORIAL DE SIMULACIÓN COMSOL®	134

RESUMEN

TÍTULO: MICROBOMBA DE VACÍO: DISEÑO, MODELADO Y SIMULACIÓN*

AUTOR: MAURICIO PEDROZA TORRES**

PALABRAS CLAVE:

Actuador electrostático, COMSOL®, Interacción fluido-estructura, Microbomba de diafragma, Microbomba de vacío, Simulación multifísica.

DESCRIPCIÓN:

En el presente trabajo de investigación se abordó el diseño, modelado y simulación de un prototipo teórico de microbomba de vacío, teniendo como principal objetivo la obtención de valores de presión absoluta en el rango de los decatorr (10^1) por medio de una única etapa de bombeo, junto con un análisis multifísico del sistema en operación, útil como marco de referencia para investigaciones futuras.

Se llevó a cabo una revisión general del estado del arte en el campo de los dispositivos de microbombeo, específicamente aquellos enfocados en la generación de vacío, discutiendo el desempeño de las microbombas de desplazamiento, quienes se perfilan como una de las soluciones más factibles en lo que respecta a generación de vacío desde condiciones de presión atmosférica. El proceso de diseño comprendió el dimensionamiento, análisis mecánico y modelado según la metodología de analogías eléctricas, así como la integración multifísica de sus componentes en un entorno de simulación, siendo estas herramientas teóricas útiles en el establecimiento de las características operativas del microdispositivo de bombeo.

Finalmente, se estableció un ciclo de bombeo acorde a los parámetros estructurales y operativos de la versión final del prototipo, favoreciendo su implementación futura en una etapa de fabricación por medio de una cuidadosa elección de sus condiciones de diseño. Obteniendo de esta manera, un prototipo de microbomba de diafragma actuada electrostáticamente, capaz de alcanzar una presión mínima absoluta de hasta 66 torr, a una tasa de flujo de 0.016 sccm, mediante la aplicación de un valor de tensión entre electrodos de aproximadamente 100 V. Logrando el diseño de un prototipo de microbomba de vacío, capaz de alcanzar valores de presión absoluta menores a los 100 torr desde condiciones de presión atmosférica.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Carlos Borrás Pinilla. Codirector: Jabid Eduardo Quiroga Méndez.

ABSTRACT

TITLE: VACUUM MICROPUMP: DESIGN, MODELING AND SIMULATION*

AUTHOR: MAURICIO PEDROZA TORRES**

KEYWORDS:

COMSOL®, Diaphragm Micropump, Electrostatic Actuator, Fluid-Structure Interaction, Multiphysics Simulation, Vacuum Micropump.

DESCRIPTION:

In this research project was carried out the design, modeling and simulation of a vacuum micropump prototype, in order to obtain values of absolute pressure in the decatorr's range (10^1) as a main objective, by means of a single pumping stage, in addition with a multiphysics analysis for the entire system, useful as a theoretical framework for future research.

It was conducted a general review of the state of the art in the field of pumping microdevices, specifically those focused on vacuum generation, discussing the performance of the displacement micropumps, who are emerging as one of the most feasible solutions related to vacuum generation from atmospheric pressure conditions. The design process entailed the geometric dimensioning, mechanical analysis and modeling by electrical analogy methods, as well as the multiphysical integration of its components in a simulation environment, being these theoretical tools useful in establishing the operating characteristics of the pumping microdevice.

Finally, it was established a pumping cycle according to structural and operational parameters of the prototype final version, favoring its future implementation in a manufacturing process by a careful selection of design conditions. Thereby obtaining an electrostatically actuated diaphragm micropump prototype, able to achieve up to 66 torr minimum absolute pressure, with a flow rate of 0.016 sccm, by applying a voltage between electrodes of about 100 V. Achieving the design of a vacuum micropump prototype capable of reaching values of absolute pressure less than 100 torr from atmospheric pressure conditions.

* Degree Work

** Physical-Mechanical Engineering Department, School of Mechanical Engineering. Advisor: Carlos Borrás Pinilla. Co-Advisor: Jaid Eduardo Quiroga Méndez.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, los nuevos requerimientos de portabilidad, economía y capacidad de generación de vacío en el caso particular de esta investigación, marcan la pauta en el diseño e implementación de microbombas. Siendo la ingeniería mecánica la rama científica mejor versada en lo que respecta al manejo de flujos y dispositivos de bombeo; su dominio de aplicación no puede ser limitado a una escala macro, por lo que gran cantidad de técnicas y conocimientos propios de este campo del saber son aplicables luego de considerar las implicaciones de trabajar a una escala micro.

En este trabajo de investigación se expone el proceso de diseño, modelado y simulación aplicado a un modelo teórico de microbomba de vacío. Prototipo cuyo objetivo principal radica en la obtención de valores de presión absoluta iguales o menores a los 100 torr, partiendo desde condiciones de presión atmosférica por medio de una única etapa de bombeo. Detallando para este caso el proceso de análisis mecánico y simulación numérica. Analizando el desempeño de dicho modelo de microbomba en relación a otros prototipos ofertados por el actual estado del arte.

En base a esto, el presente estudio realizado en una microbomba de desplazamiento, buscó emular el ciclo de bombeo propio de dicho microdispositivo, por lo que software basado en la teoría de elementos finitos (COMSOL® Multiphysics) ha sido empleado en el proceso de simulación, debido a la difícil obtención de soluciones analíticas para fenómenos de interacción fluido-estructura (Lakshmana, 2012), siendo los resultados computacionales finalmente comparados con cálculos analíticos provenientes de la teoría de placas delgadas, en el caso de un diafragma sujeto a una carga actuante. Analizando el desempeño

de dicho modelo de microbomba en lo que respecta a valores de deflexión del diafragma, volumen bombeado, caudal y presión.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La colonización espacial, exploración de ambientes extremos y la actual lucha contra el terrorismo, contrario a lo que podría pensarse, tienen un desafío en común, el cual consiste en la “necesidad de información sobre el entorno”, ya sea que se busque determinar la composición exacta de los gases provenientes de un cuerpo celeste, un volcán activo, o la detección de un agente nocivo presente en zonas habitadas, un sistema portable, económico y de bajo consumo energético para la detección de agentes químicos y biológicos es un componente esencial para el cumplimiento de los objetivos de dichas áreas de investigación.

En la actualidad son varias las instituciones que se encuentran desarrollando los sistemas conocidos como microanalizadores de gases (MGA por sus siglas en inglés). Los elementos que ingresan en el MGA son primero ionizados, posteriormente filtrados por medio de una matriz cuadrupolar (generalmente), y finalmente detectados mediante un electrómetro. Un componente clave que permite el desarrollo de dicho proceso es la microbomba de vacío, responsable de encaminar el gas a través del MGA e incrementar el recorrido libre promedio de las partículas ionizadas, permitiendo que sean detectadas con precisión. El diseño de dicha microbomba de vacío constituye el objetivo principal del presente proyecto.

En los sistemas de análisis de gases debe garantizarse la reducción de presión para incrementar el recorrido libre de las especies ionizadas, ya que se busca reducir el número de colisiones experimentadas por los iones durante el análisis

de masas, instrumentos a escala macro especializados en este tipo de análisis operan a presiones debajo de los militorr (10^{-3}), pero en la actualidad no se cuenta con dispositivos de microbombeo que partiendo desde condiciones de presión atmosférica logren presiones de vacío dentro de esa escala, y debido a la necesidad de portabilidad en dispositivos de análisis (como en el caso de aplicaciones aeroespaciales o subterráneas), se requieren microsistemas portátiles que garanticen condiciones de vacío óptimas.

2. ESTADO DEL ARTE

En la actualidad, una de las mayores tendencias de la industria consiste en la miniaturización y repotenciación de dispositivos, para lo cual es cada vez más frecuente la necesidad de garantizar entornos especiales de operación, siendo los ambientes al vacío unos de los de mayor demanda. Microdispositivos como acelerómetros, giroscopios, conmutadores de radiofrecuencia, filtros de alta frecuencia y sensores de presión absoluta, basados en microestructuras de resonancia, requieren vacío en búsqueda de estabilidad y largos periodos de operación (Vabond, 2005; Tsuchiya, Kageyama, Funabashi, & Sakata, 2003). Diversas gamas de microconmutadores requieren vacío en un nivel cercano a los 7.5 torr, de manera similar, sensores de presión y giroscopios sofisticados requieren presiones por debajo de los $7.5E-5$ torr en su cavidad de operación, por otra parte, es posible hallar en el mercado algunos sensores de alta precisión, cuyo punto de operación óptimo se encuentra entre los $7.5E-6$ y $7.5E-7$ torr. La presencia de partículas de gas induce vibraciones en algunos microelementos como diafragmas, resortes o aletas, reduciendo su sensibilidad y variando su frecuencia de operación. Ultra alto vacío es requerido en microdispositivos como fuentes de emisión de electrones de campo, microscopios electrónicos y espectrómetros de masas (Kleps, Angelescu, Samfirescu, Gil, & Correia, 2001), en

estos dispositivos una trayectoria media libre de iones y electrones lo suficientemente larga es un parámetro crítico, por lo que se requiere una evacuación constante de gases remanentes que de otra manera alterarían las condiciones de operación del sistema.

La literatura actual cuenta con completas recopilaciones sobre tecnologías de microbombeo (Shoji, & Esashi, 1994; Woias, 2001; Nguyen, Huang, & Chuan, 2002; Laser, & Santiago, 2004; Zhang, Xing, & Li, 2007), a su vez, mientras aumenta el interés por esta rama del desarrollo tecnológico, se incrementa de igual manera el número de investigaciones y publicaciones, siendo posible apreciar entre otras cosas numerosos diseños especializados en el bombeo de gases (Zegerle, & Sandmier, 1996). Nuevos requerimientos y diversas características de operación traen consigo la necesidad de profundizar en el estudio de dispositivos a pequeñas escalas, comportamientos como la variación brusca del flujo másico en relación a cambios en la frecuencia de operación del actuador (rasgo característico en bombas de gas), son un buen ejemplo de fenómenos de interés teórico que son en sí mismos fuente de diversos temas de investigación. Son numerosos los ejemplos de desarrollos técnicos enfocados en esta área del conocimiento (Koch, Harris, Evans, White, & Brunnschweiler, 1997; Stehr, Gruhler, Straatmann, Messner, Sandmaier, & Zengerle, 1997; Wijngaart, Andersson, Enoksson, Noren, & Stemme, 2000), aun así, estudios sobre los mecanismos fundamentales que rigen los procesos de flujo a pequeñas escalas son aún muy limitados, debido a esto, se han venido desarrollando diversos modelos analíticos (Goldschmidtboing, Doll, Heinrichs, Woias, Schrag, & Hopt, 2005) que en búsqueda de simplicidad, suponen un medio incompresible, por lo que salta a la vista la necesidad de una mayor comprensión de los efectos dinámicos del flujo gaseoso en microbombas (Astle, Bernal, Washabaugh, Kim, & Najafi, 2005).

En la actualidad se ha convertido en un verdadero desafío el cumplimiento total de las especificaciones de diseño en microbombas para aplicaciones de alta tecnología, al existir un delicado balance entre las características de operación y las dimensiones del dispositivo, algunas microbombas como la reportada por Cabuz et al. (Cabuz, Herb, & Lu, 2001) por ejemplo, da prioridad a factores como el caudal suministrado, mediante un incremento en el tamaño del dispositivo.

Pese a que se han llevado a cabo numerosas investigaciones como todas las anteriormente mencionadas, al día de hoy son escasos los dispositivos de microbombeo enfocados en la generación de vacío que se han reportado, algunos de los descritos por la literatura son: microbomba de diafragma (Kamper, Dopfer, Ehrfeld, & Oberbeck, 1998; Kim, Astle, Najafi, Bernal, & Washabaugh, 2007), microbomba térmico-molecular, microbomba de difusión (Doms, & Mueller, 2007) y bomba por bombardeo iónico. En el primer tipo un diafragma vibra debido a una fuerza actuadora (electrostática, piezoeléctrica, neumática, etc.), mientras que un conjunto de válvulas determina la dirección del flujo (Kowalski, Latecki, Gniazdowski, Milczarek, & Skwara, 2010). Según algunos autores, este tipo de dispositivos debería enfocarse más en el suministro de gases externos para cromatografos que para generación de alto vacío, debido a que las presiones de vacío logradas hasta el momento no alcanzan valores menores a los 53 torr absolutos (Grzebyk, & Górecka, 2012), pero como se verá más adelante, recientes avances en la investigación y desarrollo de este tipo de dispositivos ponen en duda la validez de dicha opinión.

En la categoría de microbombas térmico-moleculares se pueden distinguir tres tipos de dispositivos: Bomba Knudsen, bomba de acomodación y bomba termo-molecular. De estas solamente la primera ha sido fabricada en tecnología MEMS (McNamara, 2005). La bomba Knudsen se apoya en el principio de transpiración térmica, donde diferentes temperaturas son aplicadas a dos microcámaras conectadas con canales estrechos, generándose un flujo neto de gas de la cámara

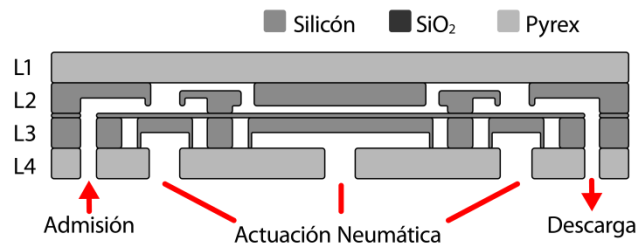
a baja temperatura hacia la cámara de temperatura mayor debido a la dependencia que la tasa de flujo molecular en canales estrechos tiene con respecto a la temperatura, la conexión en serie de microcámaras a altas y bajas temperaturas con canales amplios y estrechos puede disminuir la presión incluso aún más. Hasta el momento la menor presión base reportada para una bomba Knudsen de una etapa es 350 torr.

El tercer tipo de microbomba, es la versión miniatura de la típica bomba de difusión (Doms, & Mueller, 2005), donde un fluido de trabajo es evaporado por un calentador, obteniéndose un chorro de vapor a alta velocidad a través de boquillas, mientras que las moléculas de gas se mezclan con dicho chorro de vapor para posteriormente condensarse en las paredes laterales a baja temperatura, finalmente el fluido retorna a la unidad de calentamiento después de completar el ciclo de operación. Este modelo de microbomba puede llegar a obtener presiones de 370 torr, pero la disipación de calor puede llegar a ser un inconveniente para diversas aplicaciones. Por último, las microbombas por bombardeo iónico pueden ser utilizadas para generación de vacío desde presión atmosférica, este tipo de bomba ioniza los gases y emplea un fuerte potencial eléctrico para acelerarlos dentro de un electrodo sólido, de esta manera se evacua la cámara de vacío (Wright, & Gianchandani, 2007). La presión base alcanzada es 592 torr, con voltajes de operación de 1 - 1.5 KV.

En base a lo anterior, las microbombas de desplazamiento parecen las más prometedoras en cuanto a la capacidad de generación de vacío desde presión atmosférica. El creciente interés en esta área ha llevado a la creación de diversos programas de investigación, algunos de ellos con el patrocinio de entidades tan importantes como la agencia de investigación en proyectos avanzados de defensa (DARPA por sus siglas en inglés), incluyendo un micro analizador de gases, proyecto liderado por el MIT.

Un gran número de investigaciones se ha llevado a cabo durante los pasados 30 años en el área de los sistemas de microbombeo (Laser, & Santiago, 2004; Woias, 2005), donde sobresalen importantes aportes teóricos en el campo del diseño y análisis dinámico de microdispositivos de bombeo (Astle, Bernal, Washabaugh, Kim, & Najafi, 2005). En el año 2009 V. Sharma y M.A. Schmidt trabajaron en el desarrollo de una microbomba de desplazamiento para generación de vacío que empleaba una cámara de bombeo y válvulas activas actuadas piezoeléctricamente (Sharma, 2009); el diseño fue conceptualmente similar a la microbomba reportada por Li et al. (Li, Roberts, Steyn, Turner, Carretero, Yaglioglu, Su, Saggere, Hagood, Spearing, Schmidt, Mlcak, & Breuer, 2000), luego de varias modificaciones al diseño, en lo que se refiere a geometría y métodos de actuación un modelo de la bomba se muestra esquemáticamente en la Figura 1. Esta bomba de una etapa incluye tres puertos de actuación neumáticos para dos válvulas de sellado y un pistón de bombeo. La cámara de bombeo fue diseñada con un diámetro de 20mm y una altura de 6 μm .

Figura 1. Microbomba para generación de vacío, vista en sección



Fuente: Vikas Sharma (2009)

Una imagen de la bomba se muestra en la Figura 2 siendo las dimensiones: 30mm x 50 mm x 2 mm. La primera generación de microbombas lograba una presión de vacío de 597 torr. La geometría fue modificada en la segunda generación reduciendo dicho valor de presión a 502 torr. Los resultados de Sharma indicaron la dirección para futuras mejoras en el diseño.

Figura 2. Microbomba para generación de vacío, micromaquinado

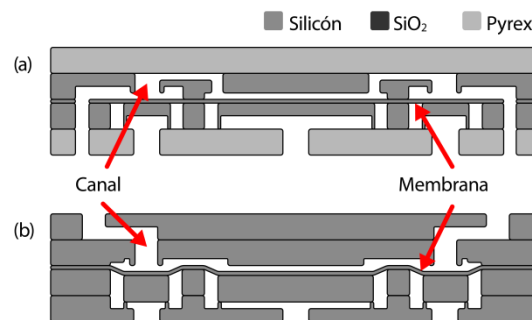


Fuente: Vikas Sharma (2009)

En el año 2011 H. Zhou (Zhou, 2011) continuando con esta línea de desarrollo y apegándose a muchos de los lineamientos establecidos por V. Sharma, llevo a cabo una reestructuración completa del dispositivo de microbombeo, como se muestra en la Figura 3 con lo cual logró el diseño, fabricación y caracterización de una microbomba de una etapa capaz de alcanzar los 164 torr de presión absoluta, lo cual es la menor presión alcanzada por una microbomba de vacío operada desde presión atmosférica reportada hasta el momento.

Figura 3. Microbombas de vacío, vista esquemática

(a) Bomba de Sharma, (b) Bomba de Zhou



Fuente: Hui Zhou (2011)

3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Diseñar y estructurar un prototipo teórico de microbomba de vacío, enfocado a la obtención de valores de presión absoluta en el rango de los decatorr (10^1) (Objetivo: Mínima presión absoluta alcanzada = 100 torr, Valor de caudal = 0.1 - 5 sccm, microbomba de una etapa).

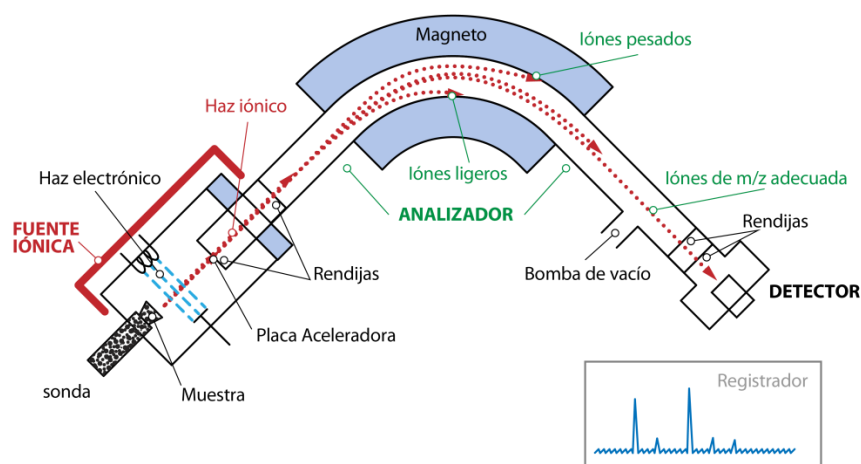
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer las dimensiones y parámetros operacionales para el dispositivo de bombeo.
- Realizar el análisis mecánico de la deflexión propia del diafragma de actuación.
- Implementar la metodología de modelado de parámetros concentrados (método de analogías eléctricas) como herramienta para el análisis de la dinámica del fluido de trabajo (gas).
- Realizar el análisis multifísico y validación numérica de interacción fluido estructura (FSI) por medio de software de simulación (COMSOL®).
- Obtener el esquema eléctrico equivalente para cada una de las etapas de bombeo, con el fin de evaluar el ciclo operativo de la microbomba en lo que respecta a su capacidad de generación de vacío, reducción de fugas e interacción con otros componentes, retroalimentando el modelo en pro de obtener una configuración óptima.

4. MARCO TEÓRICO

La microbomba de vacío es uno de los componentes clave en sistemas miniatura para análisis de naturaleza química y biológica. Por ejemplo, en espectrómetros de masas como el mostrado en la Figura 4, es importante que los iones producidos en las cámaras de ionización tengan una carrera libre a través de la maquina en ausencia de colisiones con moléculas de gas, por lo que son requeridas condiciones de alto vacío.

Figura 4. Esquema de un espectrómetro de masas

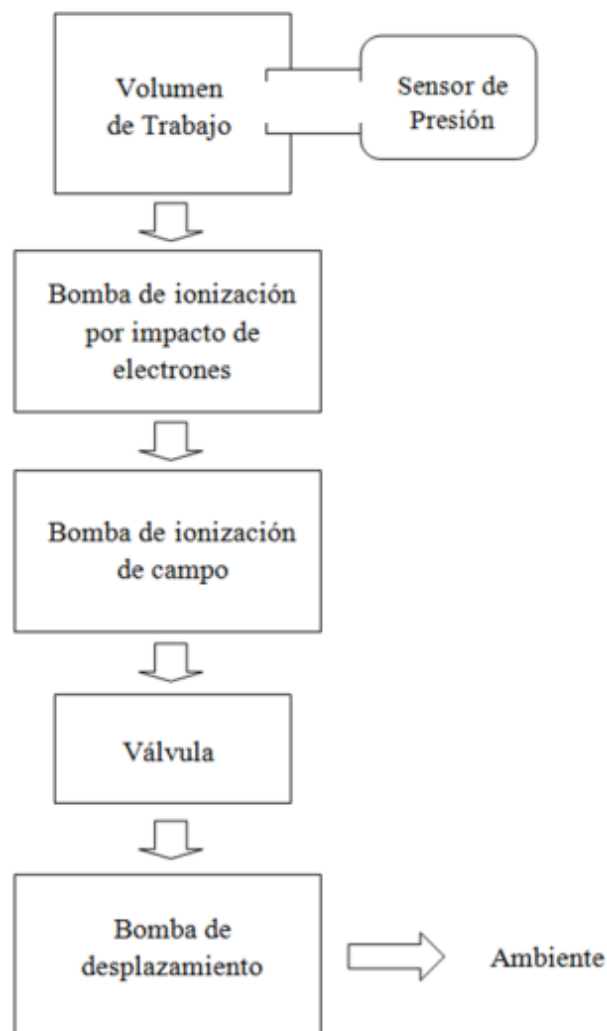


Fuente: El autor (2013)

Dispositivos de análisis portátil como es el caso de sistemas miniatura para el análisis de sustancias operan a presiones dentro del rango de los millitorr (10^{-3}) (Badman, & Cooks, 2000). Como ejemplo de aplicación se tiene el proyecto de Microanalizador de gases liderado por el MIT, donde una microbomba de desplazamiento genera un nivel de vacío en el orden de decenas de torr desde condiciones de presión atmosférica, mientras que una bomba de ionización de campo y una bomba de ionización por impacto de electrones conectadas a la

microbomba de desplazamiento continúa con la labor de bombeo desde un bajo vacío de decenas de torr hasta condiciones de alto vacío, este montaje se muestra a manera de esquema en la Figura 5. La bomba de ionización de campo reduce la presión desde los decatorr (10^1) hasta $10^{-3} \sim 10^{-4}$ torr, y la bomba de ionización por impacto de electrones continúa el bombeo desde los millitorr (10^{-3}) hasta presiones incluso inferiores a los microtorr (10^{-6}) (Zhou, 2011).

Figura 5. Entorno de funcionamiento, microbomba de desplazamiento



Fuente: Hui Zhou (2011)

4.1 CLASIFICACIÓN DE LAS MICROBOMBAS

Acorde a la naturaleza de su funcionamiento las microbombas pueden ser clasificadas en:

Microbombas mecánicas

- Usan energía mecánica para aportar cantidad de movimiento (m.v) al fluido.
- Dependiendo del principio de funcionamiento, la cantidad de movimiento aportada puede ser subsecuentemente convertida en presión por la acción de una externa resistencia al flujo.

Microbombas no-mecánicas

- Aportan cantidad de movimiento al fluido mediante la conversión de energía no-mecánica en energía cinética.

Por otra parte, los autores D.J. Laser y J.G. Santiago presentan una estructura de clasificación bajo los siguientes términos:

Microbombas de desplazamiento

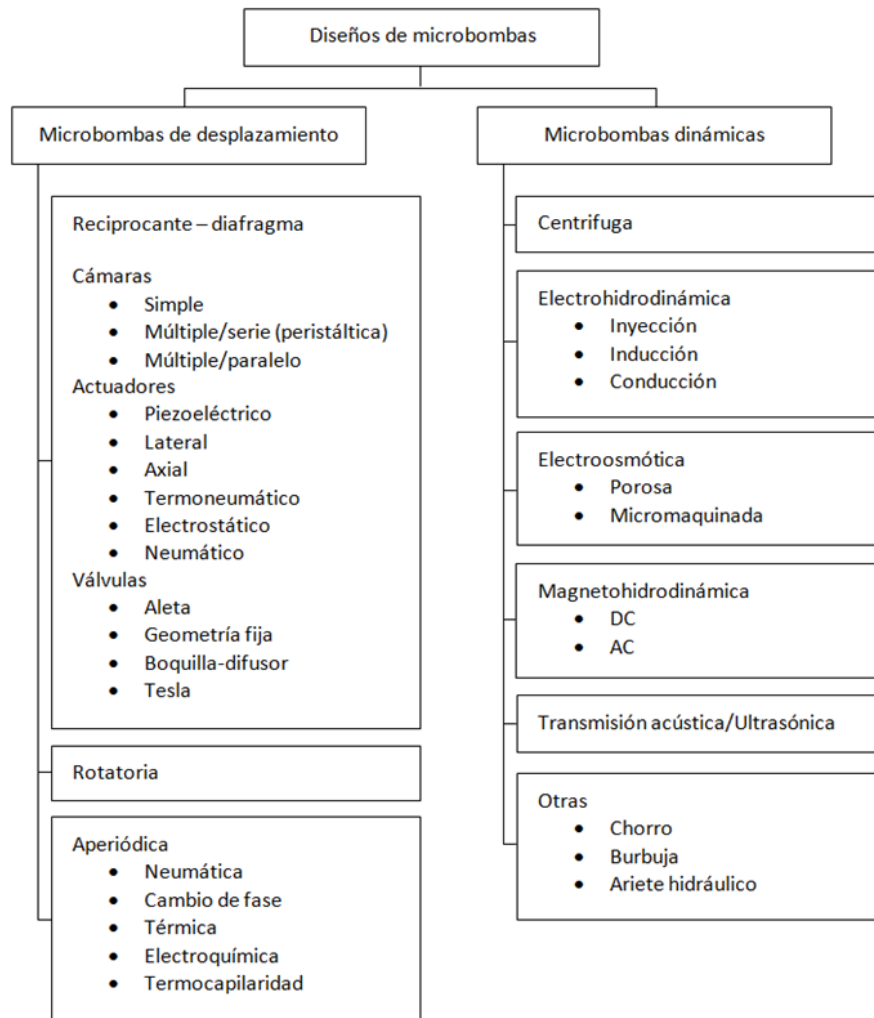
- En estos dispositivos fronteras móviles desplazan el fluido creando diferenciales de presión.

Microbombas dinámicas

- En esta categoría de bombas se aporta energía al fluido buscando incrementar su momentum (bombas centrifugas) o su presión (bombas electroosmóticas y electrohidrodinámicas).

El esquema de clasificación de D.J. Laser y J.G. Santiago puede apreciarse en la Figura 6.

Figura 6. Clasificación de las microbombas



Fuente: D.J. Laser (2004)

Debido a los requerimientos operativos de la presente investigación son de especial interés los modelos de microbombas de desplazamiento.

4.2 CICLO DE OPERACIÓN EN MICROBOMBAS DE DESPLAZAMIENTO

El ciclo de operación de las bombas de desplazamiento incluye dos pasos principales, la carrera de succión y la carrera de descarga. Estos dos pasos

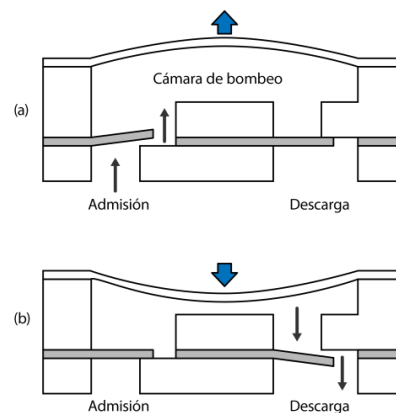
principales varían dependiendo del tipo de válvulas incorporadas a la microbomba, siendo las opciones: válvulas activas, válvulas pasivas y modelo libre de válvulas.

Microbombas con válvulas pasivas

La bomba mostrada en la Figura 7 emplea válvulas pasivas, las cuales se deflecan debido a diferenciales de presión. El gas llena automáticamente la cámara de bombeo cuando esta se expande, mientras que al contraerse dicha cámara el gas es bombeado, como ejemplos de válvulas de comportamiento pasivo se tienen: válvulas de aleta, válvulas de bola, entre otras (Zhou, 2011).

Figura 7. Microbomba con válvulas pasivas, vista esquemática

(a) Carrera de succión, (b) Carrera de descarga



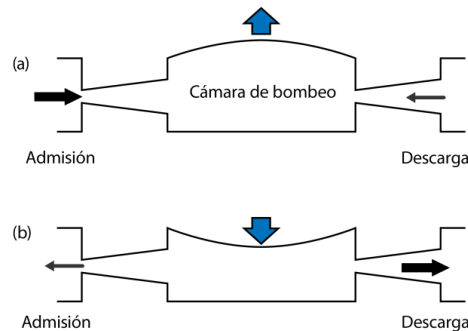
Fuente: S. Bohm (1999)

Microbombas libre de válvulas

El término “libre de válvulas” se aplica generalmente a microbombas que no cuentan con partes móviles encargadas del control de la dirección de flujo o bombas de boquilla/difusor como la mostrada en la Figura 8. El ciclo operativo de las microbombas libres de válvulas es muy similar al presentado en las microbombas de válvulas pasivas. Dos etapas de operación son conducidas de manera alternada. Las flechas solidas indican la dirección del flujo, las flechas de mayor tamaño representan mayores tasas de flujo.

Figura 8. Microbomba libre de válvulas, vista esquemática

(a) Carrera de succión, (b) Carrera de descarga



Fuente: H. Andersson (2001)

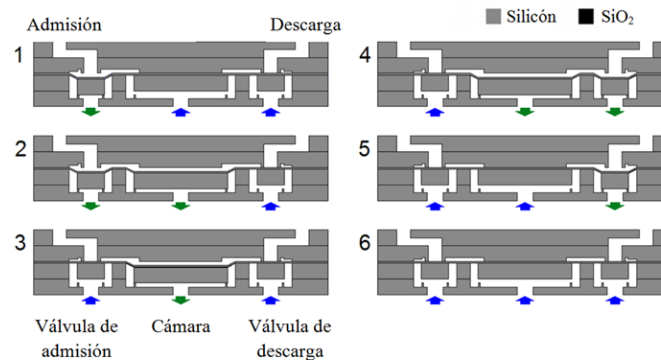
Microbombas con válvulas activas

Tanto en líquidos como en gases la relación inversamente proporcional entre el flujo de pérdidas y la viscosidad del medio es bien conocida, por lo que en el caso de bombas de vacío el flujo de pérdidas es mucho mayor que en las bombas hidráulicas debido a la baja viscosidad de los gases. Bombas libres de válvulas son simples en términos de complejidad estructural y permiten una extrema miniaturización. Sin embargo, en ausencia de válvulas el flujo de pérdidas proveniente de la boquilla/difusor evita que la bomba alcance valores de baja presión. Válvulas pasivas mejoran las características de sellado en comparación a los modelos libres de válvulas, pero dicha fuerza de cierre depende de la presión diferencial desarrollada al interior de la bomba, por lo que modelos con válvulas activas que operan por medio de actuadores independientes con fuerzas positivas de cierre, fuerzas que a la vez son mayores a las ofrecida por las válvulas pasivas, son preferidas en la generación de vacío.

Es importante resaltar que las válvulas activas cuentan con actuadores incorporados, por lo que requieren un mayor número de pasos en su ciclo de operación. La generación de vacío en una microbomba de una etapa con válvulas activas emplea generalmente un ciclo de operación que comprende 6 etapas,

como se muestra esquemáticamente en la Figura 9, en este ejemplo se presenta una microbomba actuada neumáticamente, donde flechas azules indican la acción de empuje del actuador ejercida debido a la aplicación de un alto valor de presión, mientras que las flechas verdes representan la acción de retroceso por medio de la aplicación de un vacío externo sobre el actuador (Zhou, 2011).

Figura 9. Microbomba con válvulas activas, vista esquemática



Fuente: Hui Zhou (2011)

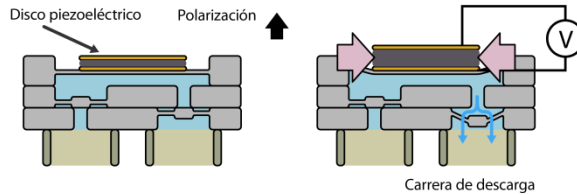
4.3 MICROACTUADORES

Las microbombas de desplazamiento cuentan con variados métodos de actuación, algunos de ellos se presentan en las Figuras (10-14), entre los cuales están:

Actuador piezoeléctrico sometido a esfuerzo lateral

La superficie inferior del disco piezoeléctrico es adherida al diafragma de la microbomba, mientras que la superficie superior se halla sin restricciones. Durante operación el diafragma de la bomba se deflecta bajo la aplicación de un momento flector producido por el esfuerzo radial en el disco piezoeléctrico, mientras que un campo eléctrico es aplicado al disco de manera axial.

Figura 10. Actuador piezoeléctrico sometido a esfuerzo lateral

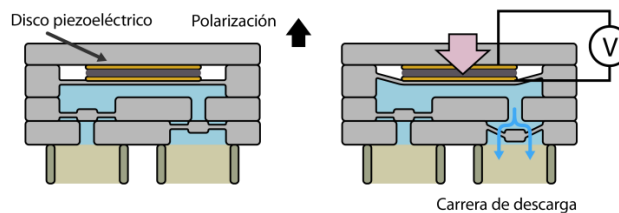


Fuente: D.J. Laser (2004)

Actuador piezoeléctrico sometido a esfuerzo axial

En esta ocasión un disco piezoeléctrico es ubicado entre el diafragma de la microbomba y un marco rígido. Durante operación, el diafragma de la bomba se deflecta principalmente como resultado de un esfuerzo axial en el disco piezoeléctrico, mientras que un campo eléctrico es aplicado al disco.

Figura 11. Actuador piezoeléctrico sometido a esfuerzo axial

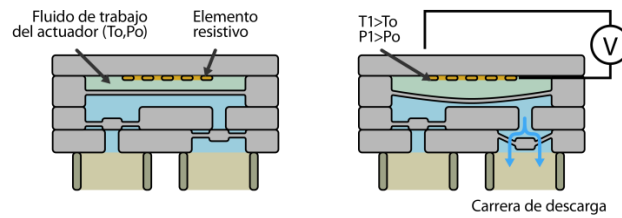


Fuente: D.J. Laser (2004)

Actuador termoneumático

En este modelo un fina película de elemento resistivo transfiere calor al fluido de trabajo del actuador en una cámara secundaria ubicada sobre la cámara de bombeo, el fluido a alta temperatura se expande ejerciendo presión sobre el diafragma de la bomba.

Figura 12. Actuador termoneumático

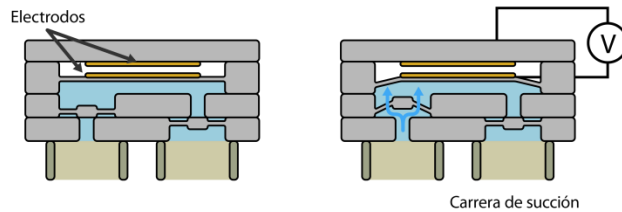


Fuente: D.J. Laser (2004)

Actuador electrostático

Modelo en el cual el diafragma de la microbomba se deflecta hacia arriba cuando una diferencia de potencial eléctrico es aplicada entre electrodos paralelos, este tipo de actuadores permiten poderosas carreras de succión pero débiles carreras de descarga. Recubrimientos dieléctricos son usados para prevenir cortocircuitos.

Figura 13. Actuador electrostático

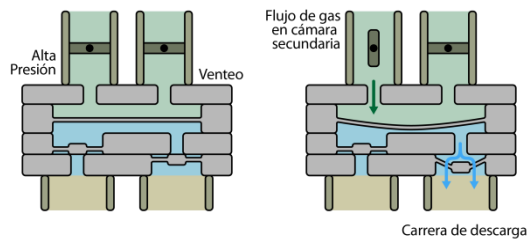


Fuente: D.J. Laser (2004)

Actuador neumático externo

Este montaje emplea válvulas activas que presurizan y despresurizan alternadamente una cámara secundaria ubicada sobre la cámara de bombeo.

Figura 14. Actuador neumático externo



Fuente: D.J. Laser (2004)

Algunos de los actuadores más importantes se muestran en la Tabla 1, donde se han excluido los mecanismos de actuación externa, como es el caso de los actuadores neumáticos, debido a la dificultad inherente a su miniaturización e incorporación a un microsistema portátil.

Tabla 1. Actuadores, comparativa (Shoji, & Esashi, 1994)

	Presión	Desplazamiento	Tiempo de respuesta
Actuador Piezoeléctrico	Baja $P < 49 \text{ KPa}$	Medio $30 \text{ um} < d < 100 \text{ um}$	Rápido $0,1 \text{ ms} < t < 1 \text{ ms}$
Actuador Termoneumático	Alta $98,1 \text{ KPa} < P < 9810 \text{ KPa}$	Medio $30 \text{ um} < d < 100 \text{ um}$	Medio $1 \text{ ms} < t < 1 \text{ s}$
Actuador Electrostático	Baja $P < 49 \text{ KPa}$	Muy pequeño $d < 10 \text{ um}$	Muy rápido $t < 0,1 \text{ ms}$

Debido a su capacidad de respuesta, los medios de actuación empleados en microbombas de diafragma han sido mayoritariamente electrostáticos y piezoeléctricos. Por otra parte, este tipo de actuadores son capaces de manejar altas frecuencias de oscilación en diafragmas, lo que se traduce en generación de altas tasas de flujo. De igual manera, los actuadores electrostáticos son compatibles con la mayoría de las técnicas de fabricación estándar empleadas en

MEMS (Borrás, 2012), perfilándose como una de las mejores opciones para propósitos de integración con dispositivos compactos, portátiles y de bajo consumo.

4.4 SOFTWARE DE SIMULACIÓN COMSOL® MULTIPHYSICS

El estudio de una microbomba de desplazamiento con actuador integrado implica el acoplamiento de ecuaciones diferenciales parciales provenientes de diferentes dominios físicos como el eléctrico y la mecánica de sólidos y fluidos. La solución analítica de dichas ecuaciones se dificulta debido a la complejidad de sus condiciones de frontera (Lakshmana, Manohar, & Babu, 2012), por lo que métodos numéricos de solución basados en la teoría de elementos finitos son empleados en la solución del problema. En el presente proyecto se empleó el software de simulación COMSOL® Multiphysics, cuyos resultados fueron contrastados con los obtenidos en las etapas de análisis mecánico y modelado de la dinámica del gas.

Algunas ventajas de emplear COMSOL® como herramienta de análisis mediante elementos finitos son:

- Software más reciente que ANSYS, NASTRAN, ABAQUS, entre otros (actualizaciones constantes, amplio soporte en línea).
- Capacidad de interacción con MATLAB (emplea la misma sintaxis), permitiendo el posprocesamiento de información.
- Enfocado al acoplamiento de diferentes dominios físicos (eléctrico, mecánica de sólidos y fluidos, etc.)
- Alta flexibilidad, permitiendo la incorporación de ecuaciones diferenciales no implementadas con anterioridad.

En lo que respecta a la secuencia de pasos para el análisis por medio de elementos finitos se puede listar de la siguiente manera (White, 2012):

- 1- Elección de la física representativa (identificación de las ecuaciones diferenciales pertinentes, Modulo de interacción fluido-estructura FSI COMSOL®).
- 2- Definición de la geometría donde se resolverá el problema.
- 3- Selección de las propiedades del material (constantes vinculadas a las ecuaciones diferenciales).
- 4- Establecimiento de las condiciones iniciales y de frontera.
- 5- Generación de la malla, tipo de elementos (triángulos, cuadrilateros, etc).
- 6- Implementación de algoritmos de solución (directos, iterativos).
- 7- Posprocesamiento de los resultados.

En el caso particular de la microbomba de diafragma, siendo esta una estructura deformable que se flexiona bajo una carga aplicada, y cuya interacción con el fluido implica un cambio de trayectoria en el flujo, la solución de las ecuaciones en la geometría fija original trae consigo resultados erróneos. El método arbitrario Lagrangiano-Euleriano (ALE por sus siglas en inglés) es la herramienta empleada por COMSOL® para la solución de este problema.

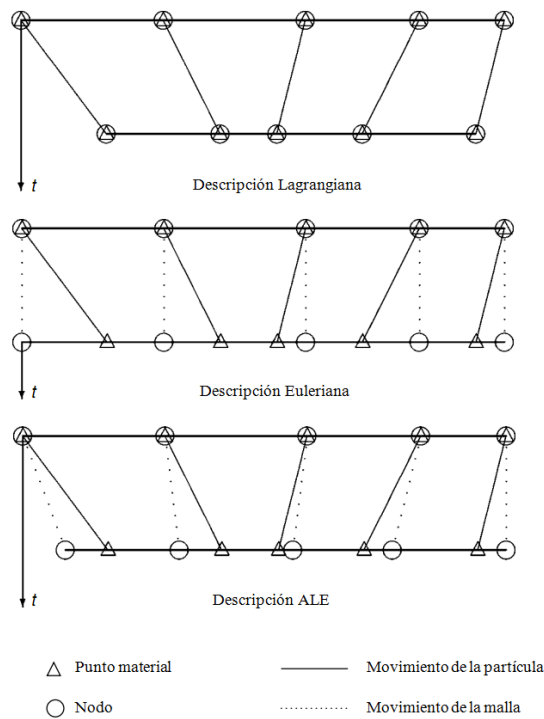
4.5 MÉTODO ARBITRARIO LAGRANGIANO-EULERIANO (ALE)

La simulación numérica de problemas relacionados con la mecánica y/o dinámica de fluidos requiere una descripción cinemática apropiada del considerado continuo. En mecánica estructural, se emplean los algoritmos Lagrangianos, donde cada nodo de la malla computacional coincide en cada momento con una partícula material. Esto permite un fácil seguimiento de las interfaces entre diferentes materiales, pero no permite el manejo de grandes desplazamientos. Por otra parte, los problemas de la dinámica de fluidos son a menudo resueltos empleando algoritmos Eulerianos, donde la malla permanece fija, mientras que las partículas materiales se mueven con respecto a ella. Estos algoritmos permiten un

tratamiento sencillo de grandes distorsiones, pero no facilitan la identificación de las interfaces y ofrecen poca información en cuanto a detalles del flujo.

El algoritmo ALE combina las ventajas y minimiza los inconvenientes de las descripciones clásicas. Por lo tanto un nodo de la malla puede moverse con la partícula material siguiendo la descripción Lagrangiana, permanecer fijo en el caso de mallas Eulerianas, o incluso moverse de modo arbitrario con el fin de mejorar la calidad del mallado. En consecuencia el enfoque ALE permite manejar mayores desplazamientos que la descripción Lagrangiana mientras ofrece mejor resolución que el método euleriano. Sin embargo el inconveniente del método ALE es, que la velocidad de la malla tiene que ser especificada cuidadosamente para el problema considerado (Nagy, 2005). La Figura 15 muestra un ejemplo de movimiento de malla y partículas bajo los diferentes enfoques.

Figura 15. Ejemplo unidimensional de movimiento de malla y partículas



Fuente: J. Donea (2004)

Dos dominios son comúnmente empleados en la mecánica del medio continuo: el dominio material $R_X \subset \mathbb{R}^n$, donde n representa las dimensiones espaciales, formadas por partículas materiales X , y el dominio espacial R_x , constituido por puntos espaciales x . En la descripción ALE no se toma como referencia ni las coordenadas espaciales ni las coordenadas materiales, por lo que se emplean las coordenadas de referencia χ , las cuales son introducidas con el fin de identificar los puntos de la malla.

La forma diferencial de las ecuaciones para masa, momentum, y energía según el método ALE es fácilmente obtenida a partir de la clásica formulación Euleriana:

$$\begin{aligned}
 \text{Masa:} \quad & \frac{dp}{dt} = \left. \frac{dp}{dt} \right|_x + v \cdot \nabla \rho = -\rho \nabla \cdot v \\
 \text{Momentum:} \quad & \rho \frac{dv}{dt} = \rho \left(\left. \frac{dv}{dt} \right|_x + (v \cdot \nabla)v \right) = \nabla \cdot \sigma + \rho b \quad (1) \\
 \text{Energía:} \quad & \rho \frac{dE}{dt} = \rho \left(\left. \frac{dE}{dt} \right|_x + v \cdot \nabla E \right) = \nabla \cdot (\sigma \cdot v) + v \cdot \rho b
 \end{aligned}$$

donde ρ es la densidad, v es el vector de velocidad material, σ denota el tensor de esfuerzo de Cauchy, b es el vector fuerza específica de cuerpo, E es la energía específica total, y $\left. \frac{d}{dt} \right|_x$ representa la derivada temporal en el dominio espacial.

Lo único que se requiere para obtener la forma ALE de las anteriores ecuaciones de conservación, es remplazar la velocidad material v con la velocidad convectiva $c = v - \hat{v}$ en los diferentes términos convectivos (al definirse \hat{v} como la velocidad de desplazamiento de la malla, c puede ser interpretada como una velocidad relativa), siendo el resultado:

$$\begin{aligned}
 \text{Masa: } & \frac{dp}{dt}\bigg|_{\chi} + c \cdot \nabla \rho = -\rho \nabla \cdot v \\
 \text{Momentum: } & \rho \left(\frac{dv}{dt}\bigg|_{\chi} + (c \cdot \nabla)v \right) = \nabla \cdot \sigma + \rho b \quad (2) \\
 \text{Energía: } & \rho \left(\frac{dE}{dt}\bigg|_{\chi} + c \cdot \nabla E \right) = \nabla \cdot (\sigma \cdot v) + v \cdot \rho b
 \end{aligned}$$

donde $\frac{d}{dt}\bigg|_{\chi}$ representa la derivada temporal en el dominio de referencia R_{χ} .

4.6 MODELADO DE LA DINÁMICA DEL GAS

El método de analogías eléctricas, también conocido como método de parámetros concentrados, ha sido ampliamente utilizado en el estudio dinámico de dispositivos MEMS (Zhou, 2011). Una representación simplificada de estos dispositivos es extraída y expresada como un circuito equivalente (Tilmans, 1996; Senturia, 2000); de igual manera, el análisis de flujo apoyado en analogías eléctricas ha sido implementado en varias ocasiones (Bourouina, & Grandchamp, 1996; Hsu, & Le, 2009). Las analogías eléctricas de los parámetros de flujo son presentadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de flujo y sus analogías eléctricas (Senturia, 2000)

Dominio Energético	Esfuerzo	Flujo	Desplazamiento
Circuitos eléctricos	Voltaje (V_{elec})	Corriente (I_{elec})	Carga (Q_{elec})
Flujo de fluidos	Presión (P)	Caudal (Q)	Volumen (V)

El método de parámetros concentrados muestra un buen desempeño en el manejo del flujo de fluidos incompresibles, así como flujo de gases a bajos diferenciales de presión (Galambos, James, Lantz, Givler, McClain, & Simonson, 2009). Es un

hecho conocido que flujos ligeramente compresibles pueden ser asumidos como incompresibles y su cambio de densidad es menor al 10% (número de Mach <0.3) (Babu, 2008), de mantenerse estas condiciones en el ciclo operativo de la microbomba, el método de parámetros concentrados será aplicable en cada una de las etapas de bombeo.

Por medio del método de analogías eléctricas es posible derivar los conceptos de resistencia y capacitancia en el dominio energético del flujo de fluidos. La resistencia al flujo R se define como el esfuerzo ΔP (diferencial de presión) dividido por el flujo Q (Caudal) como se muestra en la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\Delta P}{Q} \quad (3)$$

Un concepto no tan extendido pero de gran relevancia en el manejo del flujo compresible (donde la densidad depende de la presión) es la capacitancia de flujo gaseoso C . En circuitos eléctricos la capacitancia está definida como la corriente dividida por la derivada del voltaje con respecto al tiempo, como lo muestra la ecuación (4), asumiendo que la capacitancia es invariante con el tiempo:

$$I_{elec} = C_{elec} \cdot \frac{dV_{elec}}{dt} \quad (4)$$

De manera similar, la expresión adaptada al flujo de fluidos se define como:

$$Q = C \cdot \frac{d\Delta P}{dt} \quad (5)$$

La ecuación de conservación de masa relaciona el caudal con cambios en la densidad del flujo, la cual se expresa como:

$$Q = \frac{dV}{dt} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dm}{dt} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dV \cdot \rho}{dt} = \frac{V}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt} \quad (6)$$

donde Q corresponde al caudal, V es el volumen de gas, ΔP el diferencial de presión (caída de presión desarrollada debido a un valor R de resistencia al flujo), m es la masa del fluido, y ρ su densidad. De las ecuaciones (5) y (6) se tiene que:

$$C = \frac{Q}{\frac{d\Delta P}{dt}} = \frac{\frac{V}{\rho} \frac{d\rho}{dt}}{\frac{d\Delta P}{dt}} \quad (7)$$

Junto con la ley de los gases ideales

$$P = \rho R_g T \quad (8)$$

Remplazando y cancelando términos equivalentes se deriva la expresión para la capacitancia del gas, como se presenta a continuación:

$$C = \frac{\frac{V}{\rho} \frac{d\rho}{dt}}{\frac{d\Delta P}{dt}} = \frac{\frac{V}{\rho} \frac{d\rho}{dt}}{R_g T \cdot \frac{d\rho}{dt}} = \frac{V}{\rho R_g T} \Rightarrow C = \frac{V}{P} \quad (9)$$

De manera similar, es posible obtener una constante de tiempo en el dominio energético del flujo de fluidos, cantidad importante en el modelado de fugas y estudio de la generación de vacío (Zhou, 2011), esta constante se define como el producto entre la resistencia al flujo y la capacitancia

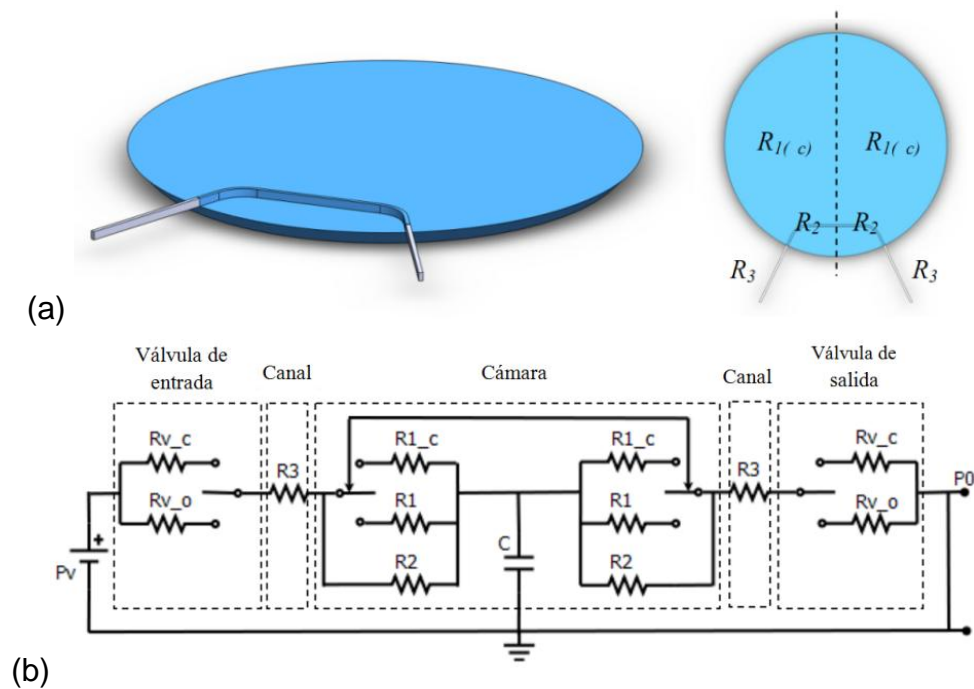
$$\tau = R \cdot C \quad (10)$$

Dadas todas las herramientas básicas de análisis, el paso restante para desarrollar un modelo cuantitativo de la dinámica del gas, consiste en determinar los valores de capacitancia y resistencia al flujo. La obtención de la capacitancia gaseosa, ecuación (9), no representa un problema si se mantienen las condiciones

anteriormente mencionadas en la deducción de las ecuaciones. En el caso de la resistencia al flujo, se pueden obtener cálculos aproximados para canales rectangulares, secciones tubulares o estructuras simples (Senturia, 2000). Sin embargo, debido a la complejidad geométrica de ciertas secciones del cuerpo de la microbomba, puede que sea necesario recurrir al uso de software de simulación.

El objetivo al aplicar esta metodología, consiste en obtener un esquema del circuito equivalente para el prototipo de microbomba de vacío, junto con el cálculo de sus correspondientes valores de resistencia y capacitancia. En la Figura 16 se presenta a manera de ejemplo el circuito obtenido por H. Zhou en su tesis de doctorado (Zhou, 2011).

Figura 16. Circuito equivalente para la microbomba de H. Zhou
 (a) Vista esquemática del volumen de bombeo, (b) Circuito equivalente



Fuente: H. Zhou (2011)

4.7 PRESIÓN DE VACÍO ALCANZADA

El desempeño en la generación de vacío de una microbomba está determinado por factores como el volumen bombeado, el volumen muerto (volumen de fluido que no se desplaza en una etapa de bombeo, sino que permanece en diferentes cavidades de la bomba), así como el flujo de pérdidas en las válvulas. Si una microbomba de desplazamiento es operada desde presión atmosférica, una expresión general para la estimación de la presión de vacío alcanzada es (Zhou, 2011):

$$P_{vacío} = \frac{P_0 \cdot V_{muerto} + P_0 \cdot Q_{fugas} \cdot T}{V_{muerto} + V_{bombeado}} \quad (11)$$

donde

$P_{vacío}$: Presión de vacío alcanzada

T : Periodo

P_0 : Presión atmosférica (~760 torr)

V_{muerto} : Volumen muerto

Q_{fugas} : Caudal de fugas

$V_{bombeado}$: Volumen bombeado

El volumen muerto de una microbomba puede comprenderse en cuatro partes: 1) volumen de fluido acumulado en los canales de interconexión; 2) volumen de fluido no bombeado debido a la curvatura del diafragma en la etapa de bombeo; 3) volumen de fluido acumulado en imperfecciones inherentes al proceso de fabricación; 4) volumen muerto virtual debido a una insuficiente carga y descarga de gas por parte de la cámara de bombeo, empleando una analogía eléctrica para el cambio de presión durante la fase de succión se verá que es equivalente a la respuesta al escalón de un circuito RC (Zhou, 2011), este volumen virtual puede expresarse como

$$V_{muerto}(virtual) = C_{vd} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (12)$$

donde

C_{vd} : Constante asociada al volumen muerto (virtual)

t : Tiempo de carga/descarga del gas

τ : Constante de tiempo de carga/descarga del gas

5. METODOLOGÍA

5.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ELECCIÓN DEL MODELO

En esta investigación, la selección del tipo de dispositivo de bombeo, se basó en los resultados obtenidos por H. Zhou (Zhou, 2011) quien demostró el buen desempeño de las microbombas de diafragma, en lo que respecta a la generación de vacío partiendo de condiciones de presión atmosférica, al alcanzar los 164 torr de presión absoluta en una única etapa de bombeo por medio de su prototipo, tal y como se presentó en el estado del arte del presente documento. En lo que respecta al método de actuación, y dado el gran número de actuadores ofertados por la actual industria, se ha elaborado un cuadro comparativo como medio de apoyo al momento de seleccionar el sistema de actuación más compatible con los objetivos del presente estudio (dispositivo de bajo consumo, compacto y portátil). Algunas de las principales ventajas y desventajas de estos tipos de dispositivos son listadas en la Tabla 3.

Tabla 3. Actuadores, ventajas y desventajas

	Ventajas	Desventajas
Actuador Piezoeléctrico	<ul style="list-style-type: none">> Bajo consumo de potencia debido a su alta impedancia eléctrica.> Obtención de fuerzas de actuación de hasta cientos de Newton (Physik Instrumente,2009).	<ul style="list-style-type: none">> Dificultad de fabricación en silicón.
Actuador Termoneumático	<ul style="list-style-type: none">> Altas fuerzas de actuación.> Tamaño reducido.> Facilidad de micro fabricación.	<ul style="list-style-type: none">> Alto consumo energético.> Respuesta temporal limitada por la tasa de transferencia de calor desde y hacia la cámara secundaria (Laser, & Santiago, 2004).
Actuador Electrostático	<ul style="list-style-type: none">> Bajo consumo de potencia.> Tamaño reducido.> Facilidad de fabricación en láminas de silicón.	<ul style="list-style-type: none">> Bajas fuerzas de actuación en modelos de placas paralelas y medias en modelos de cremallera.

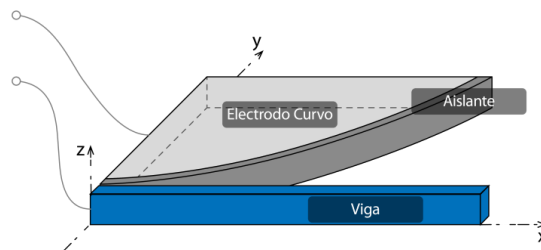
Basándose en el análisis de ventajas y desventajas es posible observar las prestaciones ofrecidas por los diferentes métodos de actuación, sin embargo, en el momento de la selección, se deben considerar igualmente las dificultades

relacionadas con el montaje y operación de dichos actuadores, por lo que las desventajas como: dificultad de microfabricación y alto consumo energético llevan a prescindir de los métodos de actuación piezoeléctricos y termoneumáticos, debido a esto, el actuador electrostático de cierre de cremallera se perfiló como la mejor opción para propósitos de esta investigación.

Actuador electrostático de cierre de cremallera

Como se muestra en la Figura 17, el espaciamiento entre electrodos de este actuador electrostático es pequeño del lado fijo y aumenta con la posición a lo largo de la longitud de la viga. Cuando un voltaje es aplicado a través del espaciamiento, se genera una fuerza electrostática que deforma la viga, ciñéndose al perfil del electrodo curvo. Para prevenir un corto circuito entre la viga y el electrodo curvado se requiere un aislamiento eléctrico (Legtenberg, Gilbert, Senturia, & Elwenspoek, 1997).

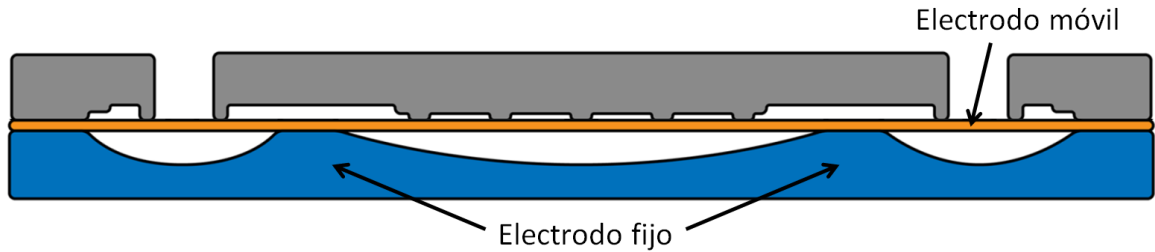
Figura 17. Actuador de electrodo curvado



Fuente: R. Legtenberg (1997)

El voltaje inicial para poner en contacto los dos electrodos es menor en comparación al modelo de placas paralelas. Y con cierta fuerza de actuación, la deflexión puede ser más que suficiente como para actuar sobre la membrana de bombeo (Zhou, 2008). Basándose en el análisis de pros y contras de los diferentes métodos de actuación, se considera que el actuador electrostático de cierre de cremallera es la mejor opción de acuerdo a los requerimientos del presente proyecto. La implementación de este actuador se ilustra en la Figura 18.

Figura 18. Implementación en microbomba de desplazamiento



Fuente: El autor (2013)

5.2 PROTOCOLO DE SIMULACIÓN

Luego de seleccionar el modelo de microbomba y la mecánica de actuación de la misma, se hace necesario evaluar el desempeño teórico que este microdispositivo de bombeo debe ofertar dadas sus condiciones geométricas, estructurales y operativas. Es en este momento donde los software de simulación se convierten en una herramienta crucial, siendo tan importante la selección del software de análisis multifísico, como la correcta implementación de los recursos que éste pueda ofrecernos.

Pese al gran volumen de documentación en lo que respecta a ejemplos de modelos y tutoriales de simulación multifísica disponibles para el software COMSOL®, ninguna de estas referencias cubría por completo el detalle de las herramientas y protocolos de simulación que debían seguirse para obtener la información numérica relacionada con los objetivos del presente estudio. Debido a esto, se hizo necesario un largo proceso de “prueba y error” para lograr una perspectiva clara de las verdaderas potencialidades y límites que el software COMSOL® tenía para ofrecer según las demandas de esta investigación. Desde cuestiones básicas como la identificación de herramientas de cálculo y graficación, hasta el establecimiento de las mejores prácticas de simulación en término de tiempos de cómputo, fueron los principales logros obtenidos en esta etapa de experimentación.

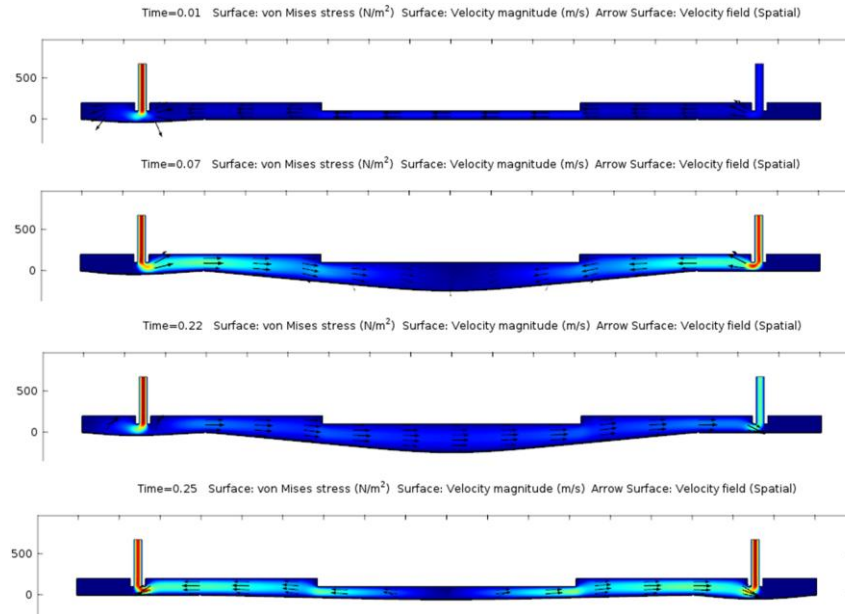
El Anexo C del presente documento trae consigo un tutorial completo del proceso de simulación realizado a una microbomba de diafragma, esperando servir como punto de referencia a futuras investigaciones en el área del análisis multifísico, mediante una amplia explicación del uso y características de las herramientas disponibles en COMSOL® para el manejo de interacciones fluido-estructura.

Un esquema general de las etapas previas a la metodología de simulación definitiva, se presenta a continuación.

5.2.1 Simulación 2D

El paso evidente al comenzar un proceso de simulación en un nuevo entorno computacional, suele ser el manejo del menor número de grados de libertad, es por esto que, los primeros modelos de simulación se construyeron en un plano bidimensional, siendo el principal objetivo determinar las funcionalidades y límites del software en el manejo de interacciones entre una frontera móvil y el fluido de trabajo. El tipo de información gráfica extraída mediante este protocolo de simulación puede apreciarse en el ejemplo presentado en la Figura 19, donde se observa la dependencia del flujo con respecto a la posición del diafragma actuador, sirviendo como indicio de una correcta configuración de parámetros en el caso de una simulación 2D.

Figura 19. Simulación 2D, perfil de flujo



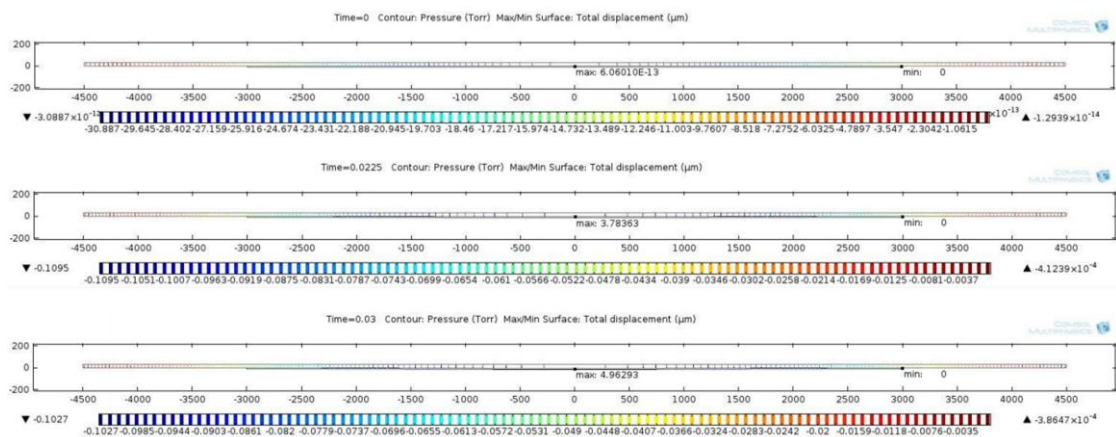
Fuente: El autor (2013)

Por otra parte, esta etapa de simulación fue la primera en resaltar uno de los principales limitantes de orden computacional para los propósitos de este proyecto, el cual consiste en el número masivo de elementos constituyentes de la malla, lo cual se traduce en tiempo y recursos de computo necesarios para la solución de todas las ecuaciones relacionadas con esta discretización. Debido a la enorme diferencias de tamaño entre el diámetro de la cámara de bombeo y el espaciado entre el diafragma y la pared interior de esta cámara, se hace necesaria la implementación de diferenciales acordes a las mínimas dimensiones estructurales, pero que de igual manera sean capaces de cubrir toda la extensión del modelo, lo cual lleva a la generación de una malla lo suficientemente densa como para dificultar o en algunos casos impedir la obtención de resultados numéricos mediante métodos computacionales.

Sin embargo, y aún si los problemas antes expuestos no se tomaran en consideración, el empleo de un enfoque 2D en el análisis de flujo y presión en un microdispositivo de bombeo, presenta limitantes al momento de visualizar la

dependencia entre el flujo y la deflexión del diafragma en el caso de una cámara de bombeo circular (modelo planteado para este proyecto), ya que una vista similar a la presentada en la Figura 20, donde puede apreciarse la distribución de presiones a lo largo de la cámara de bombeo, podría brindar una idea del comportamiento de un diafragma y cámara que se extienden perpendicularmente al plano de la gráfica, más no para un dispositivo de geometría circular.

Figura 20. Simulación 2D, perfil de presión



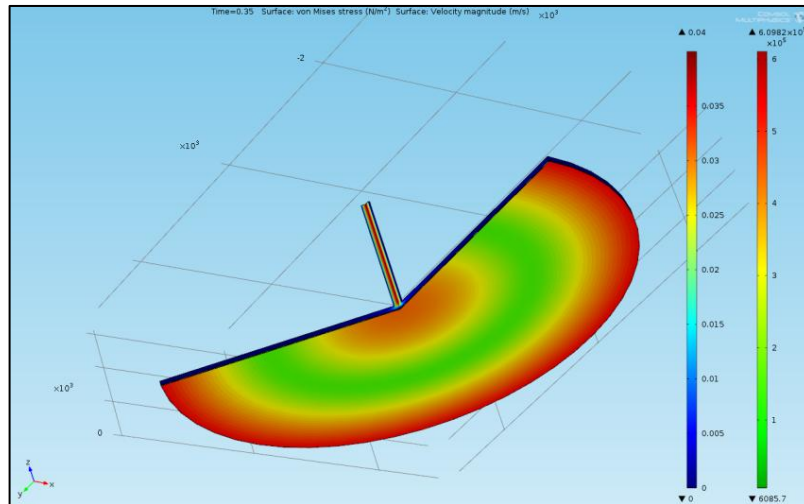
Fuente: El autor (2013)

5.2.2 Simulación 2D axisimétrica

Con el ánimo de solventar algunas de las dificultades planteadas en la etapa previa de simulación 2D, se prosiguió con la implementación de un nuevo enfoque capaz de mostrar un modelo más fiel a la geometría y dimensiones reales del prototipo, por lo que a manera de solido de revolución, una construcción de vista en corte del dispositivo, junto con la definición de un eje de simetría, bastaron para obtener un modelo mucho más cercano a los propósitos de esta investigación, como se observa en la Figura 21, donde puede apreciarse tanto la magnitud de los esfuerzos a lo largo del diafragma, como el comportamiento del flujo al interior de la cámara de bombeo. Sin embargo, debido a las condiciones de simetría establecidas en la simulación, el canal de entrada estaba posicionado de manera

tal que desembocaba en el centro de la cámara de bombeo, lo cual dista mucho de la configuración geométrica que se pretendía dar al microdispositivo, donde los canales conectores entran de manera lateral, conservando una estructura laminar para la microbomba.

Figura 21. Simulación 2D axisimétrica, flujo y esfuerzos

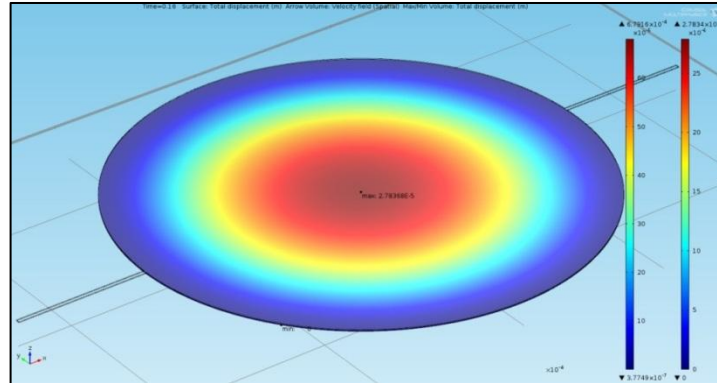


Fuente: El autor (2013)

5.2.3 Simulación 3D

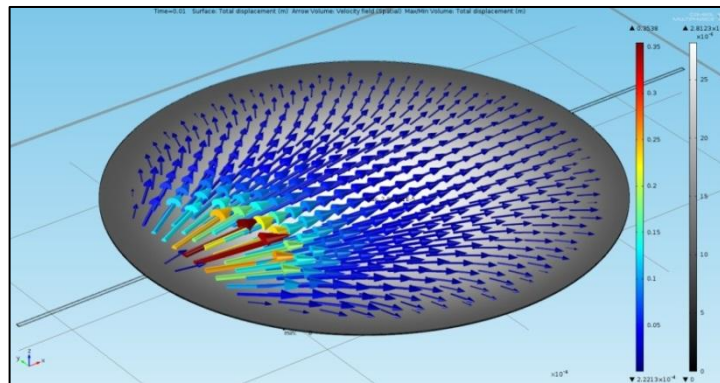
El paso final en la experimentación computacional llegó con la construcción de un modelo 3D, el cual pudiera contar con las reales dimensiones del microdispositivo propuesto, y que paralelamente, ofreciera los resultados numéricos y la información gráfica relacionada con los valores de deflexión del diafragma (Figura 22), así como del desarrollo del flujo (Figura 23) y perfiles de presión (Figura 24) al interior de la microbomba, mostrando su evolución en distintos instantes de tiempo. Sirviendo como referencia de cálculo para las características operativas del prototipo.

Figura 22. Simulación 3D, desplazamiento del diafragma



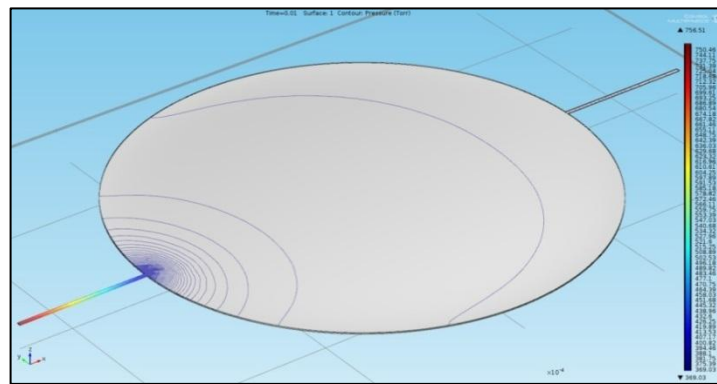
Fuente: El autor (2013)

Figura 23. Simulación 3D, perfil de flujo



Fuente: El autor (2013)

Figura 24. Simulación 3D, perfil de presión



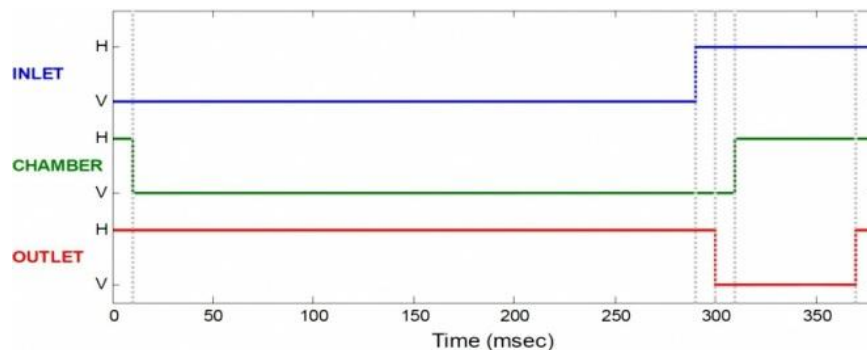
Fuente: El autor (2013)

5.2.4 Validación mediante datos experimentales

La selección de parámetros operativos de la microbomba, se ha realizado con base en los datos experimentales y de simulación presentados por Hui Zhou (Zhou, 2011). En dicha publicación se concluye que debido a dificultades de montaje e instrumentación, la caracterización del prototipo de microbomba construida por Zhou se realizó por medio de un actuador neumático externo, en lugar del sistema de actuación electrostática planteado en el diseño original. Debido a esto, el objetivo en esta etapa del proyecto, consistió en determinar los requerimientos operacionales que un medio de actuación electrostático debe satisfacer, para igualar los valores de presión de vacío presentados por Zhou. Analizando de esta manera el desempeño de dicho modelo de microbomba en lo que respecta a valores de caudal y presión, pero más importante aún, dando una cierta validez al protocolo de simulación 3D establecido en el software de simulación COMSOL® Multiphysics, al someterle a un comparativa directa con datos experimentales.

La simulación del fenómeno de bombeo se realizó con base al perfil de actuación para la cámara de bombeo de una microbomba de diafragma actuada neumáticamente presentada por Zhou, dicho perfil se puede apreciar en la siguiente figura.

Figura 25. Perfil de actuación



Fuente: H. Zhou (2011)

Para representar el fenómeno de dilatación y contracción del diafragma, se empleó la combinación matemática de funciones escalón Heaviside cuyo valor es 0 para cualquier argumento negativo, y 1 para cualquier argumento no negativo según la definición estándar:

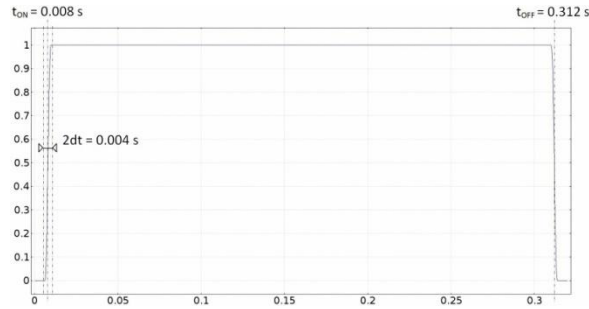
$$H(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

Sin embargo, siendo $H(x)$ una función no continua, estudios previos han revelado que es necesaria la sustitución de distribuciones matemáticas, como Heaviside, por alguna versión suavizada de dicha función si quiere abordarse el problema mediante métodos numéricos de solución (Rivera, Trujillo, Romero, López, & Berjano, 2013). De la misma manera estos estudios afirman que la familia de funciones suavizadas con segunda derivada continua sin sobrepico empleada por COMSOL® Multiphysics, provee soluciones numéricas cercanas al valor obtenido de manera analítica. Esta familia de funciones suavizadas es denotada en COMSOL® Multiphysics como $flc2hs(\theta, p)$, donde θ es la variable independiente, y p el parámetro en base al cual es evaluada dicha variable:

$$flc2hs(\theta) = \begin{cases} 0 & \text{si } \theta < p \\ 1 & \text{si } \theta \geq p \end{cases} \quad (14)$$

por lo que el perfil del ciclo de aplicación de la carga puede apreciarse en la Figura 26, obtenido a partir del producto de dos funciones escalón Heaviside suavizadas $flc2hs((t - t_{ON})/dt, 1) * flc2hs((t_{OFF} - t)/dt, 1)$, capaces de emular un proceso de aplicación gradual de la carga que busca simular el fenómeno de bombeo del diafragma.

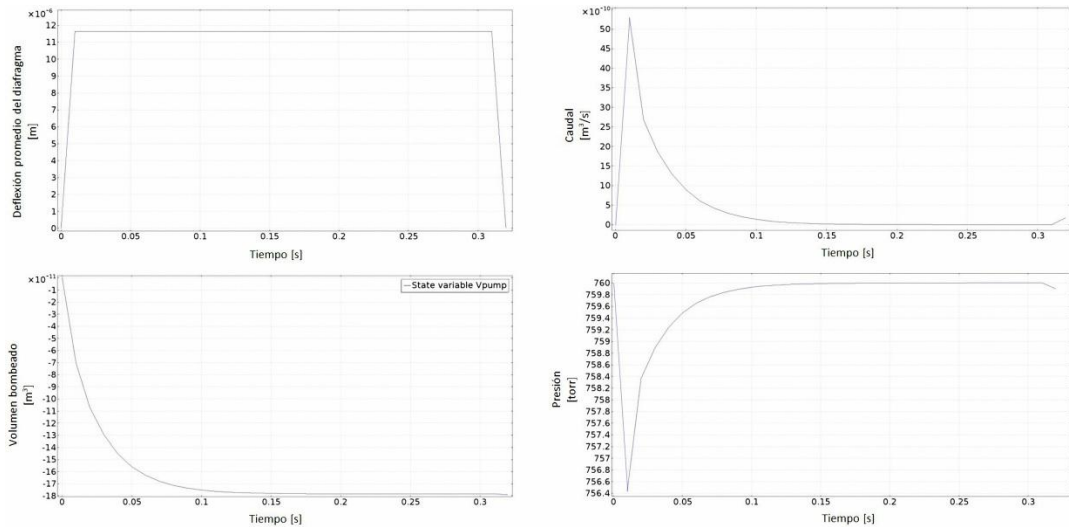
Figura 26. Perfil del ciclo de aplicación de carga



Fuente: El autor (2013)

La Figura 27 permite observar, cómo mediante este modelo de simulación es posible obtener una dinámica de bombeo realista, a lo largo de un ciclo operativo de la microbomba, como lo evidencian los valores de deflexión promedio del diafragma, el comportamiento del caudal a lo largo del tiempo, el volumen de fluido bombeado y el valor de presión medido en la entrada del canal conector.

Figura 27. Gráficas de desempeño



Fuente: El autor (2013)

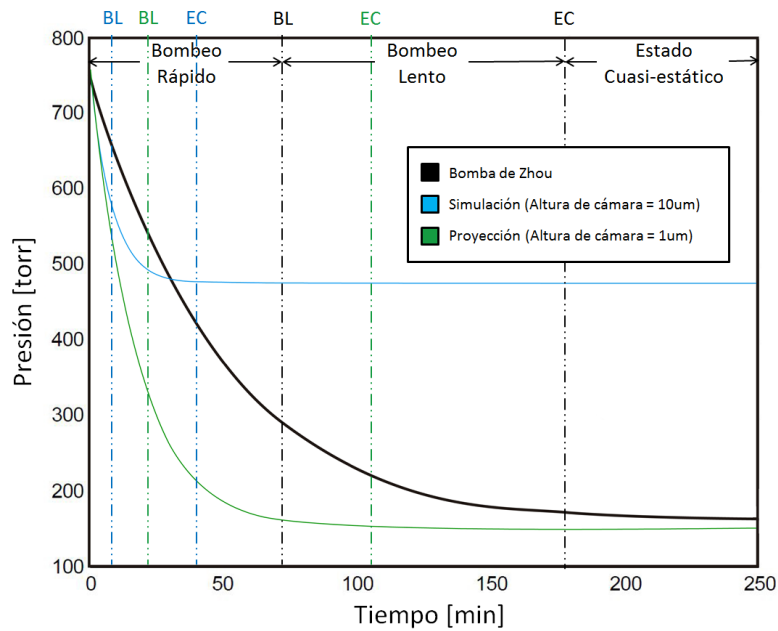
Por otra parte, con el ánimo de determinar el máximo valor de vacío alcanzado a lo largo de múltiples ciclos de bombeo mostrado en la Figura 28, se empleó la

expresión analítica para presión de vacío P_{vac} (finalizando la carrera de succión) dentro de un volumen de control propuesta por Hui Zhou (Zhou, 2011):

$$P_{vac} = \frac{P_i V_t + P_0 V_d + P_0 Q(t_1 + t_c)}{V_t + V_d + V_p}; \quad V_d = V_{dg} + V_p e^{-\frac{t_c}{\tau}} \quad (15)$$

con datos experimentales P_i (presión inicial en cada ciclo), P_0 (presión atmosférica = 760 torr) V_{dg} (volumen muerto de bombeo), V_p (volumen bombeado), τ (cte de tiempo = 93.1 ms), Q (caudal de fugas = 10E-12 m³/s), V_t (volumen total a evacuar = 6E-7 m³), t_1 (tiempo de pre-succión = 0.01 s) y t_c (tiempo de succión = 0.28 s).

Figura 28. Curvas de generación de vacío



Fuente: El autor (2013)

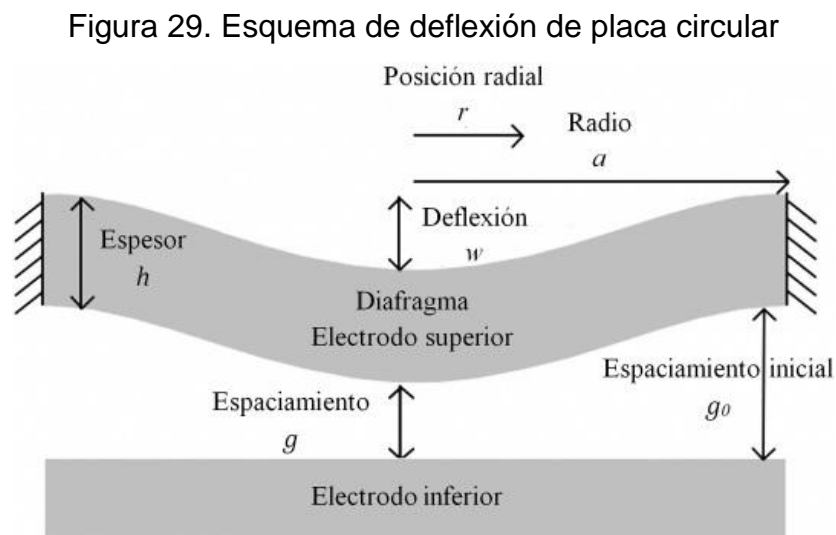
En cuanto a la presión de vacío alcanzada, el modelo simulado logró un valor de presión mínimo de 478 torr, lejano de la cifra de 164 torr ofrecida por Zhou, sin embargo, esto se debe principalmente a la magnitud del volumen muerto, difícil de reducir debido a limitaciones computacionales presentes al disminuir el valor de la

altura de cámara C_h , lo cual lleva a un incremento apreciable de los elementos de la malla, dificultando una solución razonable en tiempo y recursos de computo, por lo que una proyección realizada con el volumen muerto propio de una altura de cámara $C_h = 1 \text{ um}$, muestra la posibilidad de alcanzar presiones de vacío de hasta 146 torr.

Finalmente, y luego de contrastar los resultados de simulación con los datos experimentales suministrados por Zhou (Zhou, 2011), se puede concluir que pese a ciertas limitaciones de índole computacional, un estudio multifísico realizado en el entorno de simulación COMSOL®, es capaz de brindarnos una perspectiva aproximada de las características físicas y potencialidades operativas del prototipo teórico a desarrollar.

5.3 ANÁLISIS MECÁNICO

La estructura mecánica de la cámara de bombeo puede esquematizarse de acuerdo a la Figura 29.



Fuente: Wygant (2008)

donde un voltaje aplicado entre el electrodo fijo inferior y el electrodo móvil superior, origina la deflexión del diafragma debido a la presencia de una fuerza de atracción electrostática. Siendo el valor de voltaje conocido como “*pull-in*” quien determina el voltaje máximo aplicable, si se esperan desplazamientos estables del diafragma, ya que voltajes mayores al valor *pull-in* ocasionarían un colapso en los electrodos (espaciamiento $g = 0$), llevando a la inestabilidad del sistema. Por otra parte, la magnitud de la fuerza electrostática F_e obtenida en función del voltaje aplicado V_{elec} se expresa como:

$$F_e = \frac{\varepsilon A V_{elec}^2}{2g^2} \quad (16)$$

donde ε denota el valor de permitividad del medio ($\varepsilon_0 = 8.85E - 12 [F/m]$, permitividad del vacío), A corresponde al área del electrodo (electrodo de placas planas paralelas), y g representa el espaciamento entre electrodos (con la condición $g/g_0 > 2/3$ para deflexiones estables del diafragma (Senturia, 2001)).

En el presente análisis se considera la implementación de un actuador electrostático de placas planas paralelas, despreciando igualmente la no-uniformidad de la fuerza electrostática debido a la mayor cercanía de ciertos puntos del electrodo móvil con respecto al electrodo fijo (valor de fuerza máxima presente en el centro del diafragma) y considerando una presión uniforme P_u distribuida a lo largo de una placa circular (diafragma), donde el valor de deflexión en función de la posición radial r se expresa como (Timoshenko, & Woinowsky-Kreiger, 1964):

$$w(r) = \frac{P_u a^4}{64D} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^2 \quad (17)$$

siendo a el radio de la placa, P_u el valor de presión aplicado y D (factor de rigidez a la flexión de la placa) se define como:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (18)$$

donde E corresponde al módulo de Young, h es el espesor de la placa y ν es el coeficiente de Poisson. De similar manera, es posible demostrar que a lo largo del diafragma, un valor promedio de deflexión w_{prom} puede ser obtenido como:

$$w_{prom} = \frac{\int_0^a 2\pi r w(r) dr}{\pi a^2} = \frac{P_u a^4}{192D} \quad (19)$$

Debido a que el desplazamiento promedio de la placa varía linealmente con la fuerza aplicada F_m , este desplazamiento puede expresarse en términos de una constante lineal de resorte, k_l como:

$$w_{prom} = P_u \frac{a^4}{192D} = F_m \frac{a^2}{192\pi D} = \frac{1}{k_l} F_m \quad ; \quad k_l = \frac{192\pi D}{a^2} \quad (20)$$

En el caso de pequeñas deflexiones con relación al espesor de la placa, la fuerza aplicada y el desplazamiento asociado pueden ser considerados proporcionales. Sin embargo, para valores mayores de deflexión, la elongación del plano medio del diafragma deriva en una relación no lineal entre fuerza y desplazamiento (Wygant, & Kupnik, 2008), siendo posible capturar el efecto de estas elongaciones empleando una constante de resorte proporcional al valor cúbico del desplazamiento de la placa (Timoshenko, & Woinowsky-Kreiger, 1964) como:

$$k_{nl} = D \frac{-24\pi(-896585 - 529610\nu + 342831\nu^2)}{29645a^2h^2} \quad (21)$$

Equiparando la fuerza de actuación electrostática F_e con la fuerza de restitución mecánica, se obtiene la siguiente expresión (Wygant, & Kupnik, 2008):

$$F_e = k_l(w_{prom}) + k_{nl}(w_{prom}^3) \quad (22)$$

donde una solución numérica de la ecuación (22) permite obtener el valor promedio de deflexión del diafragma para grandes desplazamientos.

5.4 DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO

Las características estructurales y operativas de la microbomba se establecieron con base a 4 criterios de diseño:

1) Deflexiones estables del diafragma

Tal y como se estableció en la sección de análisis mecánico, el voltaje conocido como “*pull-in*” determina el valor máximo de voltaje aplicable, antes de ocasionar un colapso en los electrodos (espaciamiento $g = 0$), dado un espaciamiento inicial g_0 entre electrodo móvil y electrodo fijo, con la condición $g/g_0 > 2/3$ para deflexiones estables del diafragma (Senturia, 2001). Debido a esto, el parámetro base para el proceso de dimensionamiento radica en la selección del espaciamiento inicial g_0 . Empleando como referencia el valor máximo de deflexión del diafragma en la microbomba de Zhou (10 μm), siendo ($g = g_0$ -máxima deflexión) se estableció un valor de diseño para $g_0=30 \mu\text{m}$ el cual cumple la condición de estabilidad $g/g_0 > 2/3$.

2) Fácil microfabricación

Los requisitos para la manufactura de microcomponentes determinan que tan fácil será la transición de un prototipo teórico a una versión física del dispositivo, por lo tanto es crucial que el componente crítico en este diseño (diafragma de la microbomba) cuente con unas dimensiones dentro del rango de fabricación que cubre la ingeniería actual. Como referencia para la selección del espesor de diafragma se tiene la experiencia aportada por Vikas Sharma y Hui Zhou, quienes disponiendo de las instalaciones y recursos ofrecidos por el MIT reportaron la construcción y operación de diafragmas con valores de espesor cercanos a los 10 μm . Sin embargo, en el presente trabajo se consideró la implementación de un

mayor espesor de diafragma (20 μm), esperando aportar una mayor integridad estructural al diseño, pero ante todo tratar de mantener una condición de pequeñas deflexiones (valor máximo de deflexión $<$ Espesor del diafragma/2) (Griffel, 1968), siendo viable su proceso de manufactura, tal y como lo muestra Brooks (Brooks, 2013), donde pese a contar con instalaciones menos sofisticadas que las dispuestas por Sharma y Zhou, logró la fabricación de varios lotes de diafragmas con un espesor de 20 μm y longitudes que variaban entre los 1,3 mm y los 4,4 mm (diafragmas cuadrados). Con base en esto, el valor de espesor establecido para el modelo de microbomba en este proyecto es $h = 20 \mu\text{m}$.

3) Máxima deflexión del diafragma

Luego de establecer el valor para el espesor de diafragma $h = 20 \mu\text{m}$, junto con el espaciado inicial entre electrodos $g_0 = 30 \mu\text{m}$, es importante aclarar que el valor de deflexión máxima no deberá exceder la mitad del espesor del diafragma si se espera un comportamiento lineal del material en el régimen elástico donde la ley de Hooke aplica (Brooks, 2013). Por lo tanto, el valor máximo de desplazamiento se fija en 9 μm , manteniendo la condición $g/g_0 > 2/3$ para deflexiones estables del diafragma.

4) Valor de caudal proyectado

Aunque es claro el objetivo con respecto al valor de caudal a alcanzar con este prototipo (0.1 - 5 sccm), no es igual de claro cuál debería ser el comportamiento en el tiempo para la activación y desactivación de los electrodos, tanto en la cámara de bombeo como en las válvulas de admisión y descarga. Es por esto que se ha usado como referencia el perfil de actuación propuesto por Zhou, el cual se presentó con anterioridad en la Figura 25 (página 51), estando dicho perfil relacionado con un volumen bombeado de $2.38 \times 10^{-10} \text{ m}^3$ (Zhou, 2011), por lo que a partir de dicho valor, se extrajo el radio estimado para un diafragma cuya deflexión produciría una forma cónica capaz de albergar tal volumen, teniendo como

referencia para la altura del cono el valor máximo de deflexión del diafragma (9 μm), se obtiene:

$$2,38 * 10^{-10} [\text{m}^3] = V_{cono} = \frac{\pi a^2 w_{max}}{3} \Rightarrow a = \sqrt{\frac{3V_{cono}}{\pi w_{max}}} = 5,02 * 10^{-3} [\text{m}]$$

Con base en este cálculo, se estableció un radio de diafragma de 5 mm, esperando alcanzar un rendimiento en términos del caudal manejado, por lo menos equivalente al reportado por la microbomba de Zhou, sin un incremento desmedido en sus dimensiones, ya que la característica de portabilidad es otro de los criterios principales en esta fase de diseño, manteniendo un área superficial menor a 1 cm^2 .

5.5 TIEMPO DE RESPUESTA DE LA CÁMARA DE BOMBEO

Aunque se ha seleccionado el perfil de actuación anteriormente propuesto en la Figura 25 (página 51), se hace necesario determinar la respuesta en el tiempo de la cámara de bombeo para adaptar los tiempos de activación y desactivación propuestos por dicho perfil, al caso específico de la nueva geometría propuesta para el prototipo de microbomba que se quiere simular. A continuación se presenta la metodología de análisis aplicada:

- 1) Cálculo de la masa del diafragma (ρ = densidad del silicón):

$$m_d = \rho \cdot V = \rho \cdot \pi \cdot a^2 \cdot h = 2329 \cdot \pi \cdot (5 * 10^{-3})^2 \cdot (20 * 10^{-6}) [\text{Kg}] = 3,65 * 10^{-6} [\text{Kg}]$$

- 2) Cálculo de la constante lineal de resorte para pequeñas deflexiones con respecto al espesor del diafragma:

$$k_l = \frac{192\pi E h^3}{12a^2(1-\nu^2)} = \frac{192\pi(170 \cdot 10^9)(20 \cdot 10^{-6})^3}{12(5 \cdot 10^{-3})^2(1-(0,28)^2)} [N/m] = 2967,05 [N/m]$$

3) Cálculo de la frecuencia natural no amortiguada ω_0 :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_l}{m_d}} = \sqrt{\frac{2967,05}{3,65 \cdot 10^{-6}}} [rad/s] = 28511,23 [rad/s]$$

4) Cálculo del coeficiente de amortiguamiento b para una película de aire entre superficies circulares (Bao, & Yeng, 2007), con μ como la viscosidad del aire ($1,98 \cdot 10^{-5}$ Kg/m.s) y siendo c el espaciamiento entre placas circulares, lo cual en este caso corresponde a la altura de la cámara de bombeo $C_h = 10$ um:

$$b = \frac{3\pi\mu a^4}{2c^3} = \frac{3\pi(1,98 \cdot 10^{-5})(5 \cdot 10^{-3})^4}{2(10 \cdot 10^{-6})^3} [Kg \cdot rad/s] = 58,31 [Kg \cdot rad/s]$$

5) El cálculo de respuesta al amortiguamiento se obtiene modelando el diafragma de la cámara de bombeo como un oscilador armónico amortiguado no forzado, mediante la ecuación diferencial

$$m_d \ddot{x} + b \dot{x} + k_l x = 0 \quad (23)$$

donde $m_d > 0$, $b > 0$ y $k_l > 0$. la ecuación característica de (23)

$$m_d s^2 + bs + k_l = 0 \quad (24)$$

tiene raíces características:

$$r_{1,2} = \frac{-b \mp \sqrt{b^2 - 4m_d k_l}}{2m_d}$$

donde el signo de la expresión dentro del radical, puede indicar uno de los siguientes casos:

- i) $b^2 < 4m_d k_l$ (sistema subamortiguado),
- ii) $b^2 > 4m_d k_l$ (sistema sobreamortiguado),
- iii) $b^2 = 4m_d k_l$ (sistema críticamente amortiguado).

Así al aplicar las condiciones $b^2 = 3400,05$ y $4m_d k_l = 0,04331$ donde $b^2 > 4m_d k_l$ se obtiene un sistema sobreamortiguado. Por tal razón, las raíces características del sistema son:

$$r_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4m_d k_l}}{2m_d} = -68,49$$

$$r_2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4m_d k_l}}{2m_d} = -15975273,97$$

Por lo tanto, la solución general de (23) resulta ser

$$x(t) = c_1 e^{r_1 t} + c_2 e^{r_2 t}$$

- 6) El cálculo de los coeficientes de c_1 y c_2 , considerando un distanciamiento a la posición de equilibrio igual al máximo valor de deflexión del diafragma (9 um):

$$x(0) = 9 * 10^{-6}$$

$$\dot{x}(0) = 0$$

De esto y la solución de la ecuación diferencial dada se obtiene el sistema de ecuaciones lineales

$$c_1 + c_2 = 9 * 10^{-6}$$

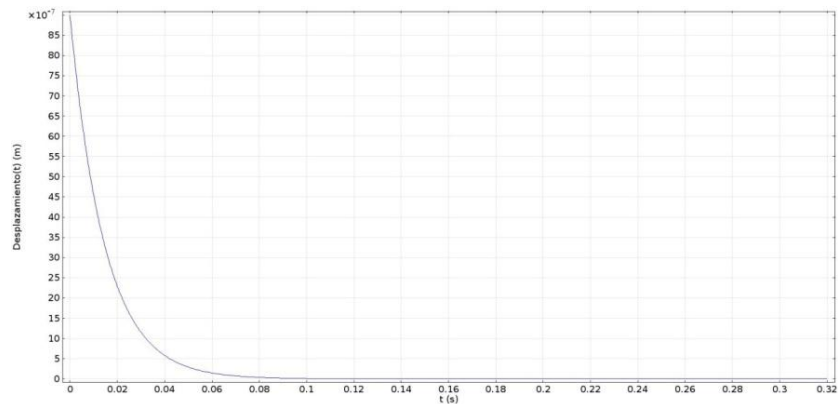
$$-68,49 c_1 - 15975273,97 c_2 = 0$$

El cual tiene como soluciones

$$c_1 = 9,0000385854191855 * 10^{-6}$$
$$c_2 = -3,8585419184229483 * 10^{-11}$$

- 7) Gráfica de la respuesta en el tiempo. En la Figura 30 se puede apreciar el comportamiento temporal que tendría el diafragma al ser liberado desde su posición de máxima deflexión al cesar la aplicación de voltaje en los electrodos.

Figura 30. Respuesta temporal desde posición de máxima deflexión



Fuente: El autor (2013)

- 8) Verificación mediante MATLAB® del tiempo de respuesta del diafragma bajo actuación electrostática, por medio del modelamiento en espacio de estado, mediante la expresión:

$$m_d \ddot{x} + b \dot{x} + k_l x = f \quad (25)$$

donde f corresponde a la fuerza de actuación electrostática, de la cual se obtiene que

$$\ddot{x} = \frac{f - b\dot{x} - k_l x}{m_d} \quad (26)$$

Expresado en notación matricial como:

$$\dot{X} = AX + BU \quad (27)$$

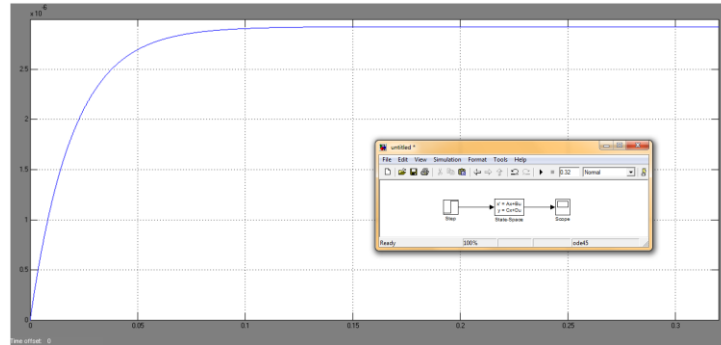
$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_l/m_d & -b/m_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/m_d \end{bmatrix} f$$

$$Y = CX + DU \quad (28)$$

$$[y] = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + [0]f$$

Mediante la gráfica de respuesta temporal desde posición de equilibrio se puede apreciar el comportamiento temporal que tendría el diafragma luego de aplicar el voltaje entre electrodos, causando su desplazamiento desde la posición de equilibrio hasta su punto de deflexión máximo. En la Figura 31 se muestra el lapso de tiempo necesario para alcanzar el valor de deflexión promedio $w_{prom} = 3 \text{ um}$, el cual equivale a un tercio del valor máximo de deflexión $w_{prom} = w_{max}/3$ (Timoshenko, & Woinowsky-Kreiger, 1964), siendo posible apreciar en las Figuras 30 y 31 tiempos similares para el establecimiento de un valor de deflexión constante.

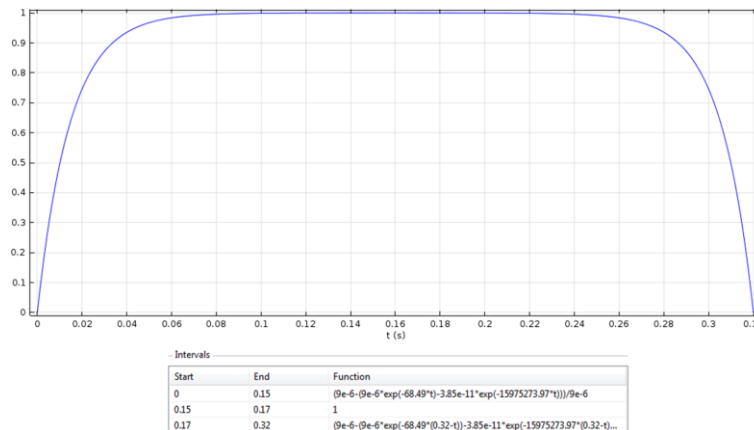
Figura 31. Respuesta temporal desde posición de equilibrio



Fuente: El autor (2013)

Gracias a esta metodología de análisis fue posible construir un perfil de actuación adaptado a las características geométricas y operativas del nuevo modelo de microbomba, mediante la construcción a tramos de una función en el software de simulación COMSOL®, como lo muestra la siguiente figura.

Figura 32. Perfil de actuación adaptado



Fuente: El autor (2013)

5.6 SIMULACIÓN MULTIFÍSICA

En esta simulación, los parámetros geométricos, las restricciones operativas de los medios de actuación electrostáticos y el comportamiento en el tiempo del diafragma actuador se integraron en el entorno de simulación COMSOL®

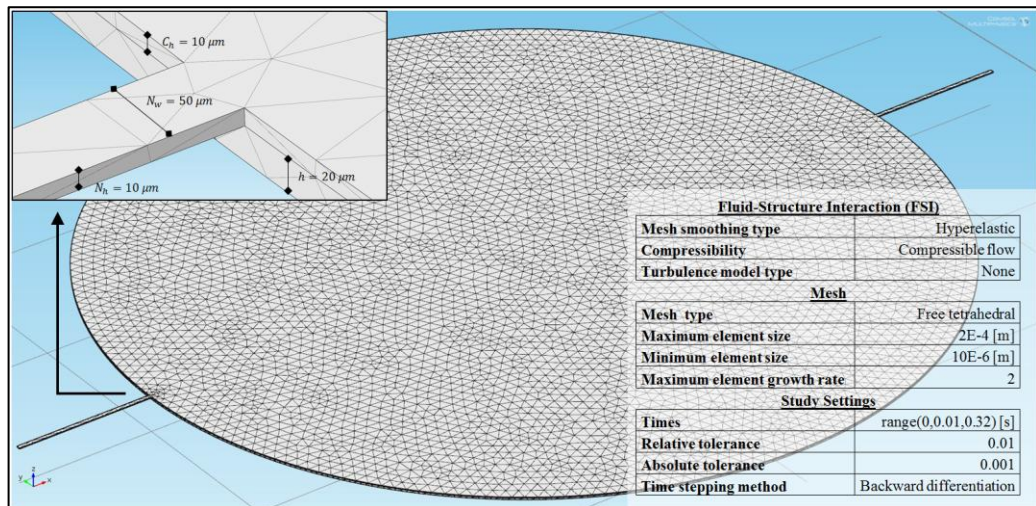
Multiphysics, un recorrido detallado de dicho proceso se presenta en el ANEXO C. Los parámetros estructurales del modelo se listan en la siguiente tabla y a partir de este punto se hará referencia a ellos como “configuración estándar” del prototipo de microbomba.

Tabla 4. Parámetros estructurales

Notación	Descripción	Valor
h	Espesor del diafragma	20 [um]
C_d	Diámetro de cámara	10 [mm]
C_b	Altura de cámara	10 [um]
M_f	Material del diafragma	Silicón
ρ	Densidad (Silicón)	2329 [Kg/m ³]
E	Módulo de Young (Silicón)	170 [GPa]
ν	Coficiente de Poisson (Silicón)	0,28
N_w	Ancho del canal conector	50 [um]
N_b	Alto del canal conector	10 [um]
N_l	Largo del canal conector	1.7 [mm]
g	Espaciamiento entre electrodos	30 [um]

El modelo de microbomba y sus parámetros de simulación se presentan en la siguiente figura.

Figura 33. Modelo de microbomba para simulación



Fuente: El autor (2013)

5.6.1 Física fundamental del flujo

Para un flujo desarrollado de gas dentro o alrededor de dispositivos en la microescala, las propiedades del gas pueden llegar a variar en el campo de flujo. De la misma manera que en los dispositivos de escala macro, estas variaciones pueden ser causadas por el tipo de fuerzas externas presentes, ya sean eléctricas, magnéticas o gravitacionales, etc. El momentum, calor e interacciones químicas entre el gas y las superficies del microdispositivo pueden tener igualmente una influencia significativa en las propiedades de flujo del gas. Debido al bajo peso molecular de los gases, el efecto gravitacional puede considerarse pequeño en el microflujo de gases, de manera similar a lo que se observa en flujos a escala macro. Los efectos de disipación o transferencia de calor entre las superficies en contacto por otra parte, se espera tengan igual o mayor importancia en el microflujo. Sin embargo, la diferencia en la escala de longitud del dispositivo a través del cual fluye el gas puede requerir consideraciones adicionales (Liou, & Fang, 2006).

Una escala de longitud intrínseca en gases “diluidos” es la trayectoria media libre λ encargada de medir la distancia promedio recorrida por las moléculas de gas antes de cada colisión. La relación entre la trayectoria media libre y la longitud característica de flujo L se define como el número de Knudsen ($Kn = \lambda/L$).

Por otra parte, un gas puede considerarse como “diluido” con base en la relación δ/ξ , donde δ corresponde al espaciamiento promedio entre moléculas y ξ se define como el diámetro de la molécula bajo una asunción de forma esferoidal. Se puede estimar un valor aproximado de $\delta/\xi = 10$, al considerar el aire como un gas monoatómico a condiciones ambientales de temperatura y presión (Wang, 2004).

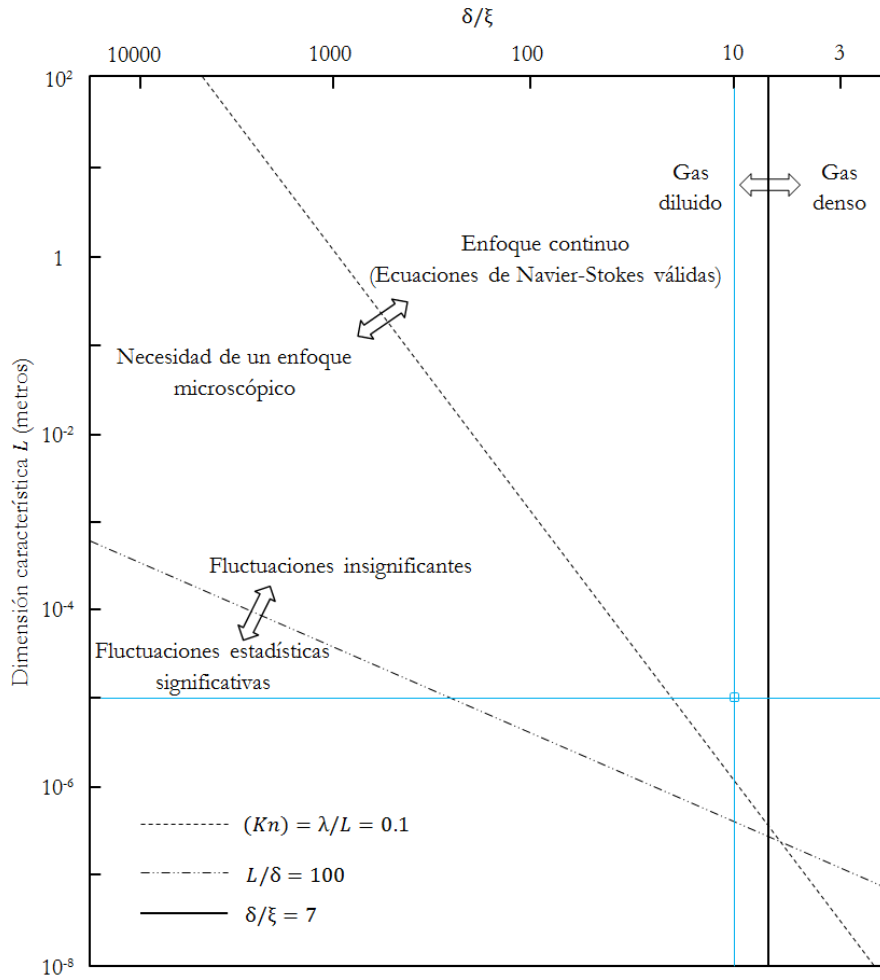
El número de Knudsen permite determinar el modelo físico más acorde según las condiciones reales de flujo. Flujo gaseoso con bajos números de Knudsen pueden tratarse como una distribución continua de materia donde las propiedades

macroscópicas locales pueden determinarse gracias a los valores promedio de las cantidades moleculares apropiadas, como en caso de la masa, velocidad y energía. Por otra parte, la aplicación de ecuaciones para la conservación de la masa, el momentum y la energía proveerá un conjunto de ecuaciones diferenciales que regulará los cambios en estas cantidades. Asumiendo una relación lineal entre esfuerzo y deformación, y entre transferencia de calor y temperatura, puede ser entonces obtenida la familia de ecuaciones de Navier-Stokes.

En el caso de flujos con alto número de Knudsen, el número de moléculas en un volumen significativo de gas decrece, pudiéndose presentar un número insuficiente de colisiones moleculares como para establecer un estado de equilibrio. Esto implica, que la naturaleza particulada de los gases debe ser incluida en el análisis. Siendo en este caso invalida la asunción del continuo empleada en flujos de bajo número de Knudsen.

En el caso particular de esta investigación, considerando una relación $\delta/\xi = 10$ (valor aproximado para el aire como gas monoatómico a condiciones ambientales de temperatura y presión), y una longitud característica de flujo $L = 10 \mu\text{m}$ (altura de cámara y mínima dimensión del canal conector de la microbomba) es posible determinar la metodología de estudio a seguir con base en la teoría cinética de gases, gracias al gráfico mostrado en la Figura 34.

Figura 34. Límites de las aproximaciones para el modelado de flujo



Fuente: G.A Bird (1994)

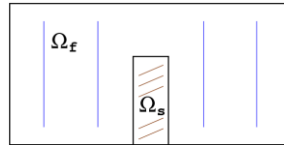
Finalmente, es posible concluir que: la asunción del continuo aplica bajo las condiciones de flujo del presente estudio, por lo que es válida la implementación de las ecuaciones de Navier-Stokes.

5.6.2 Interacción fluido-estructura (Problema FSI)

Primero, se consideró el problema típico de interacción fluido-estructura (FSI) el cual consiste de un sólido inmerso en un dominio de flujo, como en la Figura 35.

Donde el dominio total se denotará como Ω , mientras que el dominio de flujo y el dominio de la estructura corresponden respectivamente a Ω_f y Ω_s :

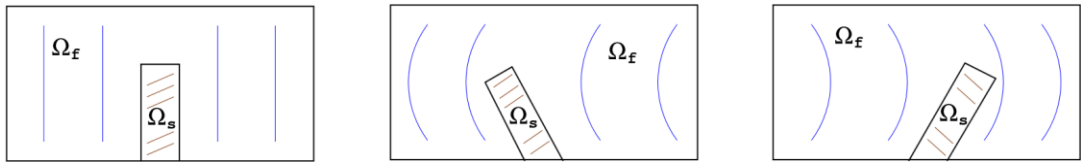
Figura 35. Dominio de interacción fluido-estructura



Fuente: T. Richter (2010)

Asumiendo que el dominio del fluido Ω_f está compuesto de aire, y Ω_s se comporta como un estructura de acero rígida. El desplazamiento de dicha estructura pondrá en movimiento el aire circundante, mientras que esta perturbación generada no causará efectos significativos en el desplazamiento de la estructura, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 36. Movimiento de fluido impuesto por estructura móvil

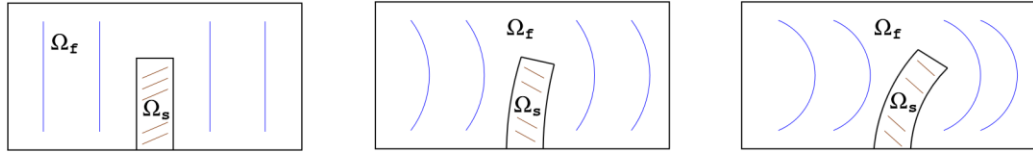


Fuente: T. Richter (2010)

El anterior caso se considera como un problema de interacción fluido-estructura “unidireccional”. Ya que el desplazamiento de la estructura controla el movimiento del fluido, pero el movimiento del fluido no afecta el desplazamiento de la estructura.

Por otra parte, si se asume una condición de flujo, con la presencia de una estructura elástica como obstáculo. El flujo circundante actuará sobre la superficie de dicha estructura originando su deformación, mientras que dicha deformación altera de igual manera el dominio de flujo, como se muestra en la Figura 37.

Figura 37. Interacción fluido-estructura



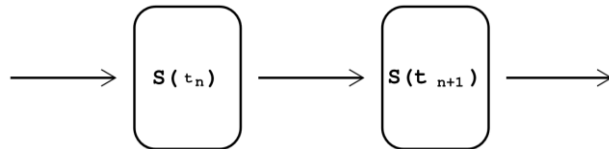
Fuente: T. Richter (2010)

Debido a la deformación del obstáculo, el dominio de flujo es alterado. En este caso, se presenta una retroalimentación real entre los dos subsistemas, resultando en un acoplamiento “bidireccional”.

Los problemas acoplados presentados en las Figuras 36 y 37 tienen en común, que ellos se encuentran en dominios móviles, donde el dominio total Ω permanece inalterado, pero los subdominios del sólido Ω_s y el fluido Ω_f varían con el tiempo: $\Omega = \Omega_s(t) \cup \Omega_f(t)$, siendo esta una de las mayores dificultades concernientes al modelado y diseño de métodos numéricos de solución para problemas FSI.

Los diferentes grados de acoplamiento e interacción son importantes en el tratamiento de problemas FSI. Sin embargo, todos los problemas FSI pueden ser considerados como dependientes del tiempo $S(t)$, donde la solución es obtenida en cada instante de tiempo t_1, t_2, \dots , como se muestra a continuación.

Figura 38. Aproximación temporal del problema acoplado

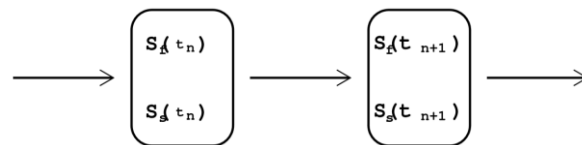


Fuente: T. Richter (2010)

En cada paso de tiempo $t_n \rightarrow t_{n+1}$ ambos problemas deben ser resueltos. La solución S_{n+1} depende del estado de ambos subproblemas en el tiempo t_n así como de la interacción entre ellos. El método directo de simulación para

problemas acoplados se conoce como “enfoque monolítico”. Donde el problema del fluido y la estructura es resuelto de manera simultánea en el mismo instante de tiempo, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 39. Solución monolítica para el sistema acoplado

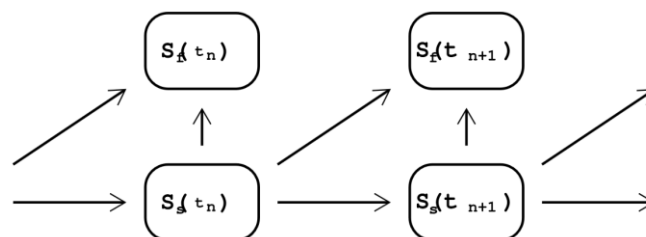


Fuente: T. Richter (2010)

El enfoque monolítico es la metodología de solución por defecto para problemas FSI en el caso de COMSOL® Multiphysics. Sin embargo, su alto costo computacional motiva la búsqueda de métodos alternos de solución.

Considerando el problema FSI presente en la interacción entre el diafragma de la microbomba y el fluido de trabajo (aire), este fenómeno puede modelarse como un problema acoplado unidireccional, siempre que se asuma un efecto despreciable del flujo sobre la deformación del diafragma, considerando como dominante la fuerza motriz proveniente del actuador electrostático. Siendo en este caso aplicable un “enfoque escalonado” de solución. En este caso, se determina en primera instancia la nueva forma de la estructura y el dominio del fluido debido a la fuerza actuante, para luego abordar la solución del campo de flujo, como se esquematiza en la Figura 40.

Figura 40. Solución escalonada para el sistema acoplado

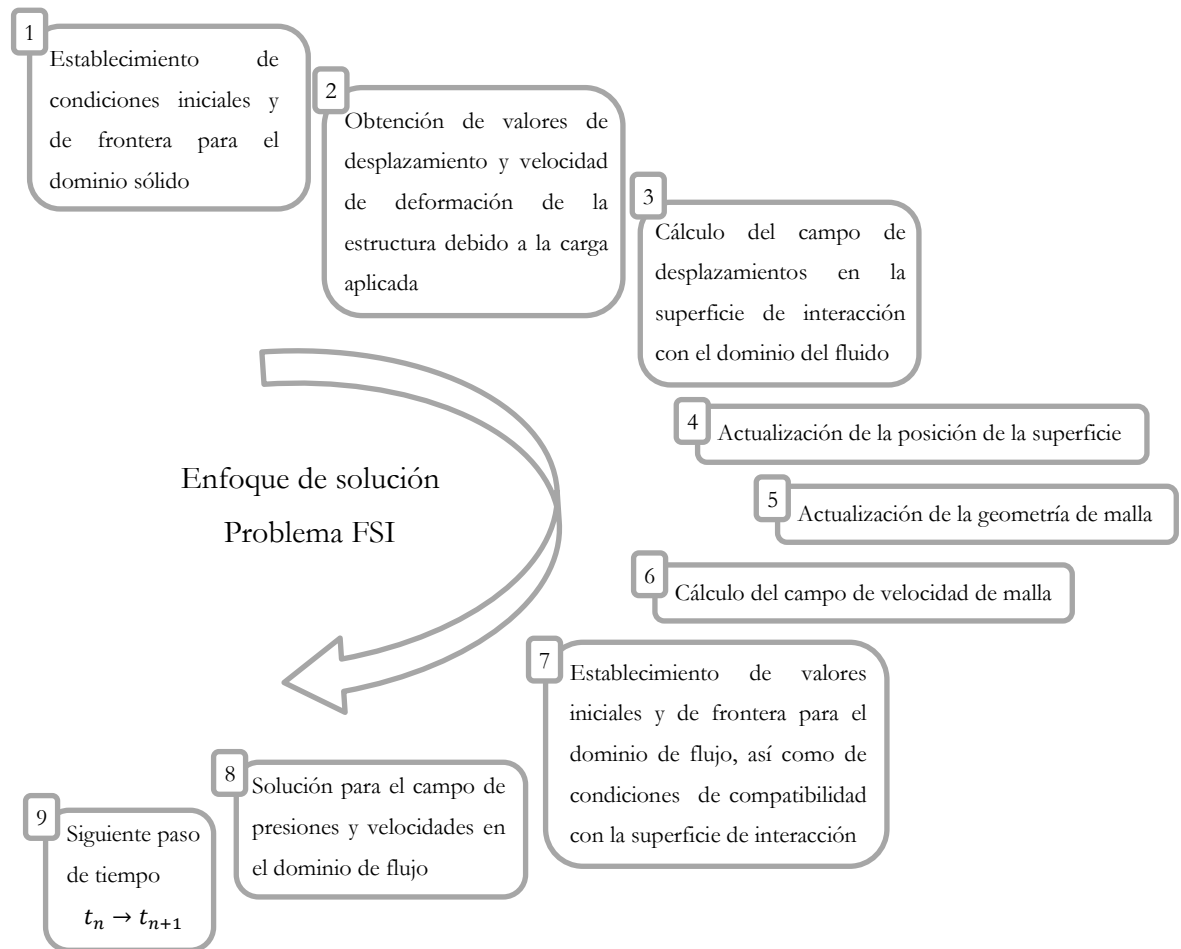


Fuente: T. Richter (2010)

La anterior configuración puede ser ahora tratada con métodos estándar: La deformación estructural es computable con solucionadores estructurales, mientras que el problema de flujo puede ser computado separadamente con un código especializado en dinámica de flujo (Richter, 2010).

La estrategia general de solución para el problema FSI presente en el ciclo de bombeo de la microbomba se esquematiza en la siguiente figura.

Figura 41. Enfoque de solución problema FSI



Fuente: D.J. Pil Lee (2013)

Con base en esto, el sistema de ecuaciones y la simbología propia del problema FSI se presentan en las Tablas 5 y 6 respectivamente.

Tabla 5. Sistema de ecuaciones FSI

Componente	Ecuación	Descripción
Material elástico lineal	$\rho_s \frac{\partial^2 u_s}{\partial t^2} - \nabla \cdot \sigma = F_V^s$	Ecuación de conservación de momentum
	$\sigma = J^{-1} F S F^T$	(σ) Tensor de esfuerzos de Cauchy
	$J = \det(F)$	(J) Jacobiano
	$F = I + \nabla u_s$	(F) Tensor de gradiente de deformación
	$S = 2\varphi\epsilon + \psi \operatorname{tr}(\epsilon)I$	(S) Segundo tensor de estrés Piola-Kirchhoff
	$\epsilon = \frac{1}{2} [(\nabla u_s)^T + \nabla u_s + (\nabla u_s)^T \nabla u_s]$	(ϵ) Tensor de deformaciones relativas
Carga en la frontera	$\sigma \cdot \hat{n} = F_S$	(F _S) Fuerza de superficie desarrollada al aplicar un valor de presión (P _A) sobre la cara externa del diafragma
	$F_S = -P_A \hat{n}$	
Restricción de movimiento	$u_s = 0$	Restricción de movimiento en los bordes externos del diafragma
Frontera de interacción fluido-estructura	$u_f = u_w$	En la interface, la velocidad del fluido y la pared móvil debe ser igual (condición de frontera)
	$u_w = \frac{\partial u_s}{\partial t}$	La tasa de cambio para el desplazamiento de la estructura actúa como frontera móvil para el fluido
	$F_S = \left[-pI + \mu (\nabla u_f + (\nabla u_f)^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot u_f) I \right] \cdot \hat{n}$	La fuerza de superficie desarrollada en el diafragma debe ser equivalente a la fuerza actuante en el fluido (condición de frontera)
Propiedades del fluido	$\rho_f \frac{\partial u_f}{\partial t} = \nabla \cdot \left[-pI + \mu (\nabla u_f + (\nabla u_f)^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot u_f) I \right] + F_V^f$	Ecuación de conservación de momentum, fluido compresible, sin considerar términos inerciales (por simplicidad computacional)
	$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f u_f) = 0$	Ecuación de conservación de la masa, fluido compresible
Frontera libre	$-f_0 \hat{n} = \left[-pI + \mu (\nabla u_f + (\nabla u_f)^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot u_f) I \right] \cdot \hat{n}$	Valor de esfuerzo normal (f ₀) correspondiente a 101325 [N/m ²] (presión atmosférica) en el puerto de admisión (condición de frontera)
Pared	$u_f = 0$	Condición de no-deslizamiento en las paredes de la cámara de bombeo

Tabla 6. Lista de símbolos FSI

Notación	Descripción
ρ_s	Densidad del sólido
ρ_f	Densidad del fluido
u_s	Velocidad del sólido
u_w	Velocidad de la pared móvil
u_f	Velocidad del fluido
F_V^s	Fuerza de volumen (sólido)
F_V^f	Fuerza de volumen (fluido)
I	Matriz identidad
φ, ψ	Parámetros del material (sólido)
\hat{n}	Vector unitario normal
p	Presión
μ	Viscosidad dinámica

5.6.3 Elementos constitutivos de malla

Las primeras recomendaciones sobre el uso de elementos tetraédricos simples en el modelado bajo la metodología de elementos finitos provienen de autores como Gallagher, Melosh y Argyris (Gallagher, Padlog, & Bijlaard, 1962; Melosh, 1963; Argyris, 1965). Sin embargo, es posible percatarse inmediatamente que el número de elementos tetraédricos simples debe ser considerable, si se requiere alcanzar un nivel de precisión dado. Lo cual se traduce en un importante número de ecuaciones simultáneas, requiriendo una mayor cantidad de memoria de cómputo (Zienkiewicz, 1977). Pese a esto, y dada la versatilidad del tetraedro para la representación de secciones complejas, donde otro tipo de elementos prismáticos (cubos, prismas triangulares, etc) no lograrían un buen ajuste, se optó por el tetraedro como elemento constitutivo de la malla.

5.7 MÁXIMO ESFUERZO VON MISES EN EL DIAFRAGMA

En mecánica estructural el esfuerzo von Mises σ_v es a menudo empleado como el “esfuerzo representativo” al evaluar las condiciones de diseño del elemento, comparándolo ya sea con el esfuerzo de fluencia para el estudio de la deformación plástica, o con esfuerzo último para la predicción de la ruptura (Hsu, 2008). Este

esfuerzo se define como la máxima energía de distorsión, siendo especialmente útil, al proporcionar una medida escalar proveniente del tensor de esfuerzos, obteniéndose mediante la expresión:

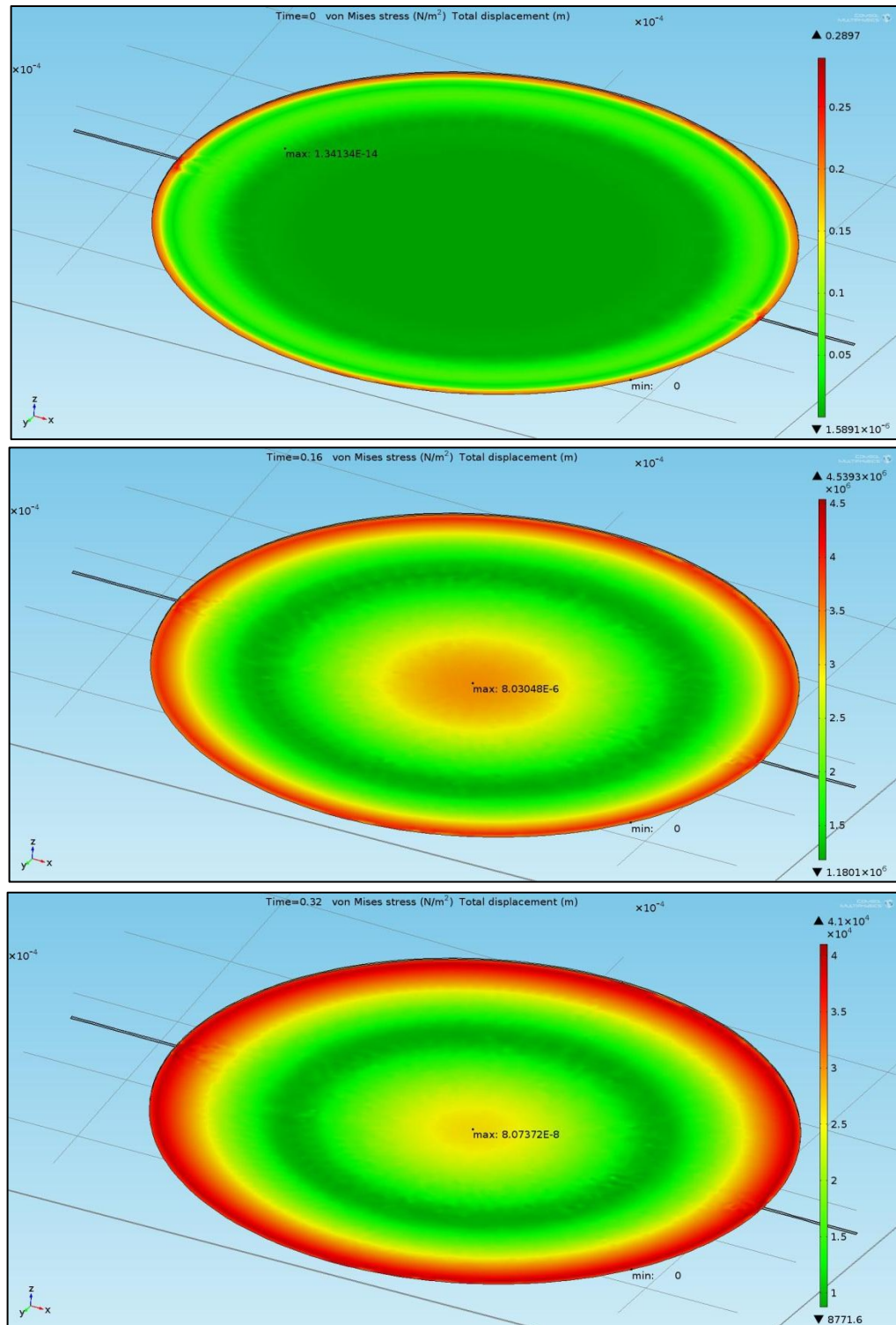
$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)]} \quad (29)$$

donde σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , σ_{xy} , σ_{yz} , σ_{zx} son los componentes del tensor esfuerzo de Cauchy σ definido como:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (30)$$

Gracias al software de simulación COMSOL® Multiphysics fue posible obtener los valores máximos del esfuerzo von Mises para la configuración estándar del diafragma de la microbomba, como se muestra en la Figura 42. Tales esfuerzos máximos se ubicaron en los bordes del diafragma, variando en su magnitud para cada instante de tiempo, y alcanzando su valor pico en la fase de máxima deflexión del diafragma.

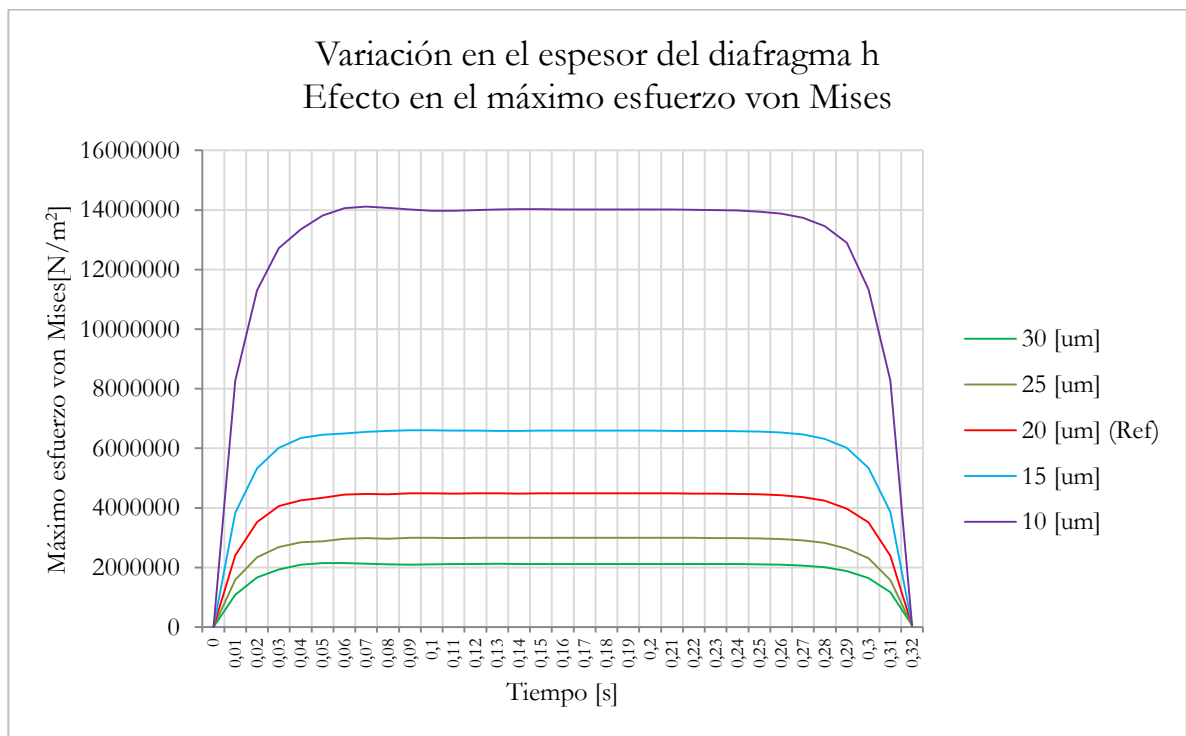
Figura 42. Distribución de esfuerzos von Mises, t = 0 s | 0.16 s | 0.32 s



Fuente: El autor (2013)

Por otra parte, se realizaron múltiples simulaciones variando el espesor del diafragma h a partir de la configuración estándar (20 μm), determinando en todos los casos que aun aplicando la misma carga (voltaje de actuación = 100 V, configuración estándar) a espesores de diafragma menores al valor de referencia, los esfuerzos máximos von Mises se ubicarán aún muy por debajo del margen de falla reportado en la literatura para el material constitutivo (silicón), tal y como se muestra a continuación.

Figura 43. Efecto en el máximo esfuerzo von Mises (espesor variable)



	10 [um]	15 [um]	20 [um]	25 [um]	30 [um]
Valor máximo	14,115 [MPa]	6,603 [MPa]	4,489 [MPa]	2,998 [MPa]	2,151 [MPa]

Fuente: El autor (2013)

Autores como Petersen (Petersen, 1982) han reportado esfuerzos de falla de 7000 MPa para el silicón. Sin embargo, estudios experimentales realizados por otros

investigadores (Roberts, 1995; Turner, 2001) estiman valores de esfuerzo crítico de aproximadamente 1000 MPa en el caso de placas delgadas de silicón. Aun tomando el criterio de 1000 MPa como referencia, los valores de esfuerzo obtenidos a lo largo del ciclo de bombeo mediante el software multifísico no alcanzaron ni siquiera el 2% del valor de esfuerzo para condición de falla.

5.8 ESQUEMA ELÉCTRICO EQUIVALENTE

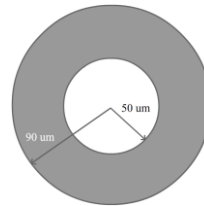
Teniendo como objetivo principal el diseño de un microdispositivo de bombeo capaz de obtener bajos valores de presión absoluta a partir de condiciones de presión atmosférica, y tal como se mostró e en el apartado: “Presión de vacío alcanzada” del marco teórico de esta investigación, la magnitud del volumen muerto en una microbomba influye drásticamente en el mínimo valor de presión absoluta que esta será capaz de alcanzar. Pese a la robustez del software multifísico empleado (COMSOL®), se presentan complicaciones al momento de reducir el valor de volumen muerto en el modelo de simulación, ya sea por la disminución en la calidad de los elementos de la malla, ya que adquieren ángulos cada vez más agudos al tratar de ceñirse a una figura cada vez más estrecha, o debido al incremento del número de elementos de malla requeridos al disminuir el valor de la altura de cámara C_h , incrementando así el costo computacional del análisis. Con base en esto, la metodología de modelado de parámetros concentrados (método de analogías eléctricas) como herramienta para el análisis de la dinámica del fluido de trabajo, se convierte en un enfoque capaz de brindar mayor detalle en cuanto al comportamiento temporal de la microbomba a través de su secuencia de operación, por medio de la asunción de un perfil de flujo incompresible a lo largo del ciclo operativo de la microbomba, permitiendo el análisis de un dispositivo de bombeo idéntico al modelo de simulación, pero sin la necesidad de incorporar el volumen muerto requerido para evitar problemas en el mallado o posibles colisiones (fuentes de error numérico) en la versión computacional.

Para el modelado según la metodología de analogías eléctricas, se hace indispensable el cálculo de los valores de resistencia asociados a la disipación de energía, fenómeno ocasionado por la resistencia al flujo que ofrecen los microcanales y secciones estrechas que dan forma a la trayectoria de gas al interior del microdispositivo de bombeo.

Resistencia de válvula

Como se muestra en la Figura 44, el asiento de válvula considerado para el cálculo del valor de resistencia se basó en el diseño de Zhou (Zhou, 2011).

Figura 44. Asiento de la válvula



Fuente: El autor (2013)

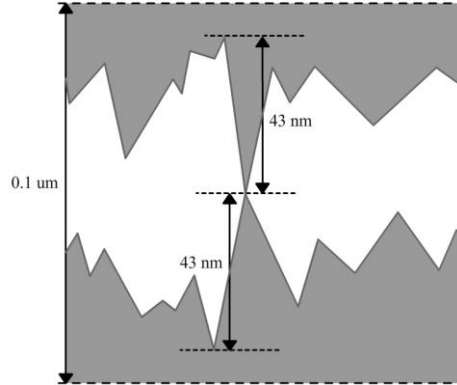
Las válvulas de admisión y descarga se consideran idénticas, donde la expresión encargada de relacionar la geometría con el valor de resistencia al flujo está dada por (Sharma, 2009):

$$R_v = \frac{6\mu}{\pi h_{Rv}^3} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right), \quad (31)$$

siendo μ la viscosidad del aire ($1.98 \cdot 10^{-5}$ Kg/m.s), r_2 y r_1 el radio exterior e interior del asiento de la válvula respectivamente, y h_{Rv} denota el espaciamiento entre la superficie de cierre y el asiento de la válvula; la variación en el valor de h_{Rv} indica en qué posición será evaluada la resistencia de la válvula. En cuanto al valor de resistencia para una válvula cerrada, se considera un espaciamiento $h_{Rv} = 0.1$ μm , basado en la rugosidad superficial medida y reportada por Zhou, luego de observaciones realizadas mediante un microscopio de fuerza atómica, donde la

distancia máxima valle-pico medida fue de 43 nm, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 45. Rugosidad superficial



Fuente: El autor (2013)

De acuerdo con (31), el valor de resistencia para válvula cerrada se calculó como:

$$R_{v_c} = \frac{6(1,98 * 10^{-5})}{\pi(1 * 10^{-7})^3} \ln \left(\frac{90 * 10^{-6}}{50 * 10^{-6}} \right) = 2,22 * 10^{16} Pa \cdot s \cdot m^{-3}$$

Por otra parte, el valor de resistencia para válvula abierta se calculó al asumir en (31) un valor $h_{Rv} = 3.1$ um, correspondiente al valor promedio de deflexión del diafragma de cierre, sumado a la rugosidad superficial, obteniéndose:

$$R_{v_o} = \frac{6(1,98 * 10^{-5})}{\pi(3,1 * 10^{-6})^3} \ln \left(\frac{90 * 10^{-6}}{50 * 10^{-6}} \right) = 7,46 * 10^{11} Pa \cdot s \cdot m^{-3}$$

Resistencia de canales conectores:

El valor de resistencia hidráulica para canales no circulares puede obtenerse gracias a la expresión (Sharma, 2009):

$$R_{ch} = \frac{8\mu L_{ch}}{r_h^2 A_{ch}} ; r_h = \frac{2A_{ch}}{P_{ch}} \quad (32)$$

donde L_{ch} representa la longitud del canal, A_{ch} el área de sección transversal y P_{ch} el perímetro que circunda dicha área.

El valor de resistencia para canales conectores se calculó de (32) como:

$$R_3 = \frac{2\mu L_{ch} P_{ch}^2}{A_{ch}^3} = \frac{2(1,98 * 10^{-5})(1,7 * 10^{-3})(120 * 10^{-6})^2}{(5 * 10^{-10})^3} = 7,75 * 10^{12} Pa \cdot s \cdot m^{-3}$$

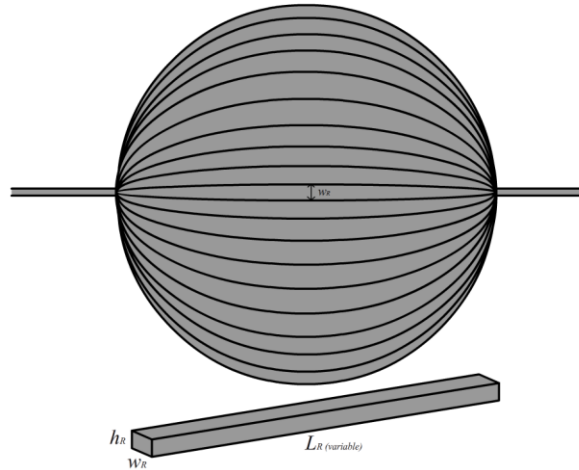
De manera similar, se calculó el valor de resistencia presente en un canal interno encargado de mantener comunicados los canales conectores aun si la cámara de bombeo permanece cerrada. Este canal tiene la final de redistribuir el volumen muerto de gas no bombeado luego de la fase de descarga. Dicho canal atraviesa el ancho de la microbomba, siendo su longitud igual al diámetro del diafragma (10 mm) mientras que sus dimensiones de ancho y alto coinciden con aquellas de los canales conectores 50 um y 10 um respectivamente. El valor de resistencia calculado fue:

$$R_2 = \frac{2\mu L_{ch} P_{ch}^2}{A_{ch}^3} = \frac{2(1,98 * 10^{-5})(10 * 10^{-3})(120 * 10^{-6})^2}{(5 * 10^{-10})^3} = 4,56 * 10^{13} Pa \cdot s \cdot m^{-3}$$

Resistencia de cámara de bombeo:

El valor de resistencia hidráulica para la cámara de bombeo, se modeló como un ensamble de resistencias dispuestas en paralelo, correspondientes a tiras rectangulares delgadas, usadas como medio de discretización para la geometría circular, tal y como se muestra en la Figura 46.

Figura 46. Discretización de cámara circular



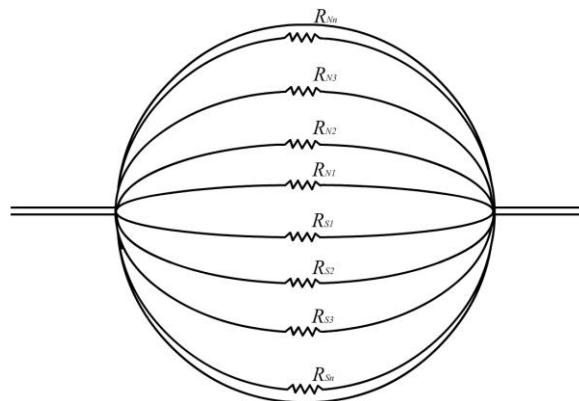
Fuente: El autor (2013)

Un esquema del arreglo de resistencias equivalente se presenta en la Figura 47, donde el valor de resistividad para cada una de las tiras rectangulares delgadas está dado por (Senturia, 2001):

$$R_{cb} = \frac{8\mu L_R}{w_R h_R^3} \quad (33)$$

donde L_R representa la longitud de la tira, w_R el ancho y h_R la altura del elemento.

Figura 47. Arreglo de resistencias equivalentes



Fuente: El autor (2013)

Gracias a esto, la expresión para el valor de resistencia total equivalente para la cámara de bombeo será (Zhou, 2011):

$$R_{Tcb} = \frac{1}{\sum \frac{8\mu L_R(\text{variable})}{w_R h_R^3}} \quad (34)$$

El cálculo de este valor de resistencia se realizó mediante la implementación de un código en MATLAB, el cual se presenta en el Anexo B. En la programación de tal código se consideró un valor constante para $w_R = 5E-7$ m, mientras que para h_R el valor asignado dependió del estado en que se quería analizar el valor de resistencia de la cámara de bombeo (abierta o cerrada), fijándose un valor de $h_R = 0.1$ um para cámara cerrada y $h_R = 3.1$ um para cámara abierta, de manera similar al cálculo anterior de resistencia hidráulica en válvulas. En lo que respecta al valor asignado para L_R , siendo esta longitud de naturaleza variable se hizo uso de una expresión matemática para el cálculo del perímetro de una elipse, conocida como la aproximación de Ramanujan:

$$P_{elipse} = \pi \left[3(a_{ep} + b_{ep}) - \sqrt{10a_{ep}b_{ep} + 3(a_{ep}^2 + b_{ep}^2)} \right] \quad (35)$$

donde a_{ep} y b_{ep} son la mitad del eje mayor y eje menor de la elipse respectivamente.

Los valores calculados para la resistencia de cámara abierta y cerrada son respectivamente:

$$R_1 = 6,43 * 10^{12} Pa \cdot s \cdot m^{-3}$$

$$R_{1_c} = 1,91 * 10^{17} Pa \cdot s \cdot m^{-3}$$

A manera de recopilación, los valores de resistencia calculados para las diferentes secciones de la microbomba se listan en la Tabla 7.

Tabla 7. Valores de resistencia calculados

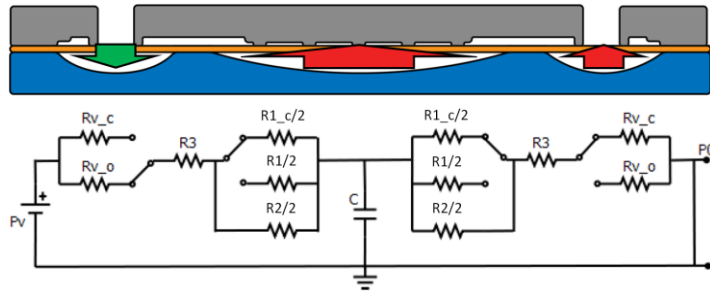
Notación	Descripción	Valor
R_{v_c}	Válvula cerrada	$2,22 * 10^{16} [Pa \cdot s / m^3]$
R_{v_o}	Válvula abierta	$7,46 * 10^{11} [Pa \cdot s / m^3]$
R_2	Canal interior	$4,56 * 10^{13} [Pa \cdot s / m^3]$
R_3	Canales conectores	$7,75 * 10^{12} [Pa \cdot s / m^3]$
R_{1_c}	Cámara cerrada	$1,91 * 10^{17} [Pa \cdot s / m^3]$
R_1	Cámara abierta	$6,43 * 10^{12} [Pa \cdot s / m^3]$

Posterior al cálculo de los valores de resistencia, se siguió un análisis paso a paso del esquema circuital equivalente, para cada una de las fases del ciclo operativo de la microbomba, para lo cual se empleó la metodología propuesta por Zhou (Zhou, 2011) presentada a continuación:

Paso 1 (Pre-succión)

Antes de la carrera de succión del diafragma, la válvula de admisión es primero activada. La cámara de bombeo y la válvula de salida se asumen totalmente cerradas. El circuito equivalente para la etapa de pre-succión se muestra en la Figura 48.

Figura 48. Pre-succión, circuito equivalente



Fuente: H. Zhou (2011)

Con base en los valores de resistencia al flujo presentados con anterioridad en la Tabla 7 y considerando $R_{v_c}, R_{1_c} \gg R_{v_o}, R_{1_o}, R_2, R_3$, el circuito puede considerarse

abierto en el extremo derecho de la malla debido al alto valor de resistividad de R_{v_c} , por lo que la resistencia total puede aproximarse como:

$$R(\text{paso } 1) \approx (R_{v_o} + R_3 + R_{1_c}/2 || R_2/2) = 3,13 * 10^{13} \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$$

Reemplazando en la ecuación (9) la capacitancia a la presión objetivo de 100 torr está dada por:

$$C(\text{paso } 1) = \frac{V(\text{canales} + \text{canal cámara})}{P_{obj}} = \frac{6,7 * 10^{-12} \text{ m}^3}{100 \text{ torr}} = 5,025 * 10^{-16} \text{ m}^3 \cdot \text{Pa}^{-1}$$

La constante de tiempo en el paso 1 será:

$$\tau(\text{paso } 1) = R(\text{paso } 1) \times C(\text{paso } 1) = 15,72 \text{ ms},$$

siendo τ el tiempo necesario para que la carga alcance el 63.2% de su valor final, sirviendo como referencia al momento de establecer la duración de cada uno de los pasos dentro del ciclo de bombeo.

Buscando un balance entre el completo desarrollo de la fase carga/descarga de gas y tiempos de operación que permitan obtener los valores de caudal más próximos al objetivo de diseño (Caudal entre 0.1 y 5 centímetros cúbicos estándar por minuto [sccm]), se llevó a cabo un símil con el proceso de carga/descarga en un capacitor dado por:

$$V(t) = V_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (36)$$

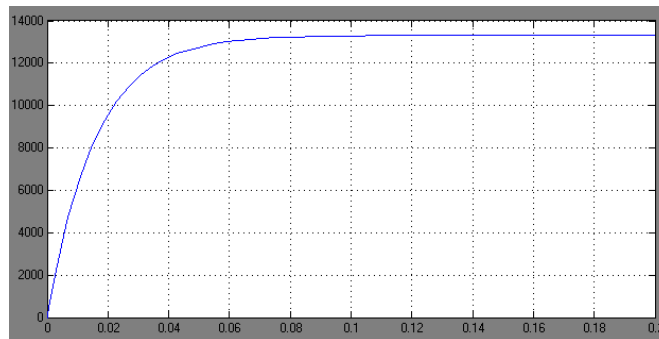
donde V_0 es el valor de voltaje inicial en un proceso de descarga o final en un proceso de carga, τ la constante de tiempo y t el valor de tiempo evaluado.

Considerando un tiempo de operación equivalente a 3τ para cada uno de los pasos de bombeo, ya que gracias a esta cifra es posible obtener un escalon que difiere en menos del 5% con respecto al valor inicial/final de voltaje, como se muestra a continuación.

$$V(3\tau) = V_0 \left(1 - e^{-\frac{3\tau}{\tau}} \right) = V_0(0.9502)$$

La simulación del circuito equivalente se realizó mediante la herramienta simulink de MATLAB, cuyo comportamiento en el tiempo se grafica en la Figura 49.

Figura 49. Pre-succión, respuesta temporal



Fuente: El autor (2013)

Durante el paso 1, el gas dentro del volumen de trabajo fluye en los canales, mientras de manera similar se filtra aire al interior de la bomba a través de la válvula de salida a un valor de presión P_0 (presión atmosférica). De la ecuación de conservación de masa para gases ideales, la presión al interior del volumen de trabajo, así como dentro de los canales conectores, P_1 está dada por (Zhou, 2011):

$$P_1(V_t + V_d) = P_i V_t + P_0 V_d + P_0 Q t_1 \quad (37)$$

donde

P_1 : Presión en el volumen de trabajo después del paso 1

V_t : Volumen de trabajo

V_d : Volumen muerto

P_i : Presión en el volumen de trabajo antes del paso 1

P_0 : Presión atmosférica (760 torr)

Q : Caudal de fugas

t_1 : Duración del paso 1 ($3\tau(\text{paso } 1) = 47,16 \text{ ms}$)

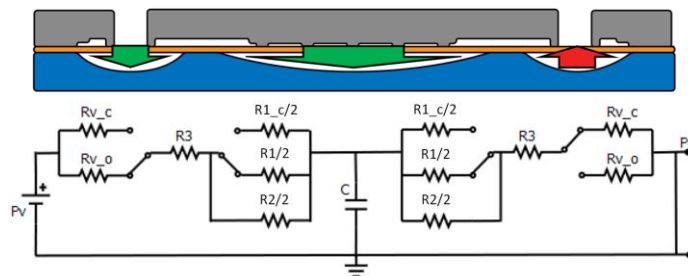
Buscando simplificar el análisis, se consideró un caudal de fugas Q constante a lo largo de los 6 pasos del ciclo de bombeo, debido al idéntico diseño de las válvulas de admisión y descarga, así como de la poca variación del diferencial de presión entre los dos extremos de la válvula cerrada durante el ciclo operativo. De la ecuación (3) el caudal de fugas se calculó como:

$$Q = \frac{P_0 - P_{obj}}{R_{v,c}} = \frac{760 - 100 \text{ torr}}{2,22 * 10^{16} \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}} = 3,96 * 10^{-12} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Paso 2 (Succión)

En este paso, el diafragma de la cámara de bombeo se deflecta generando la admisión de gas, mientras la válvula de entrada permanece abierta. El gas llena la cámara para ser expulsado en los pasos posteriores. La Figura 50 muestra el circuito equivalente para la etapa de succión.

Figura 50. Succión, circuito equivalente



Fuente: H. Zhou (2011)

La resistencia total puede aproximarse como:

$$R(\text{paso 2}) \approx (R_{v_0} + R_3 + R_1/2 || R_2/2) = 1,13 * 10^{13} \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$$

La capacitancia a la presión objetivo de 100 torr está dada por:

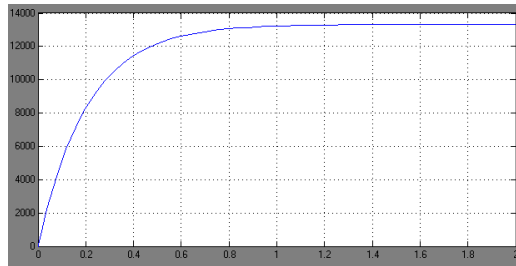
$$C(\text{paso 2}) = \frac{V(\text{canales} + \text{canal cámara} + \text{cámara abierta})}{P_{obj}} = \frac{2,42 * 10^{-10} \text{ m}^3}{100 \text{ torr}} = 1,81 * 10^{-14} \text{ m}^3 \cdot \text{Pa}^{-1}$$

La constante de tiempo en el paso 2 será:

$$\tau(\text{paso 2}) = R(\text{paso 2}) \times C(\text{paso 2}) = 204,84 \text{ ms}$$

La respuesta en el tiempo se grafica en la Figura 51.

Figura 51. Succión, respuesta temporal



Fuente: El autor (2013)

De manera similar al paso 1, es posible derivar una expresión para la presión en el volumen de trabajo luego del paso 2 como se muestra a continuación (Zhou, 2011):

$$P_2(V_t + V_d + V_p) = P_i V_t + P_0 V_d + P_0 Q(t_1 + t_2) \quad (38)$$

donde

P_2 : Presión en el volumen de trabajo después del paso 2

V_p : Volumen bombeado

t_2 : Duración del paso 2 ($3\tau(\text{paso } 2) = 614,52 \text{ ms}$)

Paso 3 (Post-succión)

Posterior a la succión, la válvula de admisión es cerrada, como se muestra en la Figura 52. Las fugas siguen contribuyendo al incremento de la presión al interior de la bomba. El aire se filtra hacia la cámara de bombeo y luego hacia el volumen de trabajo, a través de las válvulas de entrada y salida. Asumiendo una presión en la cámara de bombeo igual al valor de presión presente en el volumen de trabajo, dicha presión estará dada por (Zhou, 2011):

$$P_3(V_t + V_d + V_p) = P_2(V_t + V_d + V_p) + P_0 Q t_3 \quad (39)$$

donde

P_3 : Presión en el volumen de trabajo después del paso 3

t_3 : Duración del paso 3 (*tiempo de cierre asumido = 50 ms*)

Figura 52. Post-succión

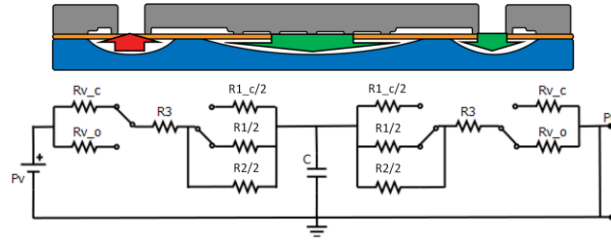


Fuente: El autor (2013)

Paso 4 (Pre-descarga)

Antes de que el gas sea expulsado de la cámara de bombeo, se requiere la apertura de la válvula de descarga, lo cual trae consigo la aparición de un contraflujo, considerando un modelo de parámetros concentrados, con la asunción de un flujo incompresible, el circuito equivalente para la etapa de pre-descarga se muestra en la Figura 53.

Figura 53. Pre-descarga, circuito equivalente



Fuente: H. Zhou (2011)

La resistencia total puede aproximarse como:

$$R(\text{paso } 4) \approx (R_1/2 || R_2/2 + R_3 + R_{v_o}) = 1,13 \cdot 10^{13} \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$$

La capacitancia a la presión atmosférica de 760 torr está dada por:

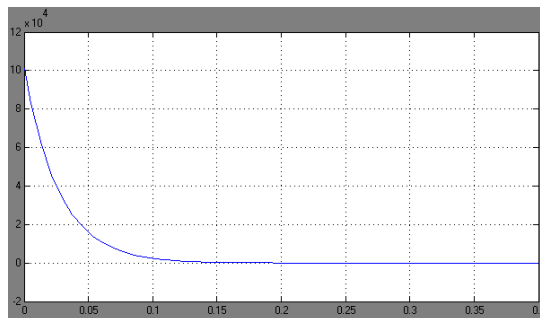
$$C(\text{paso } 4) = \frac{V(\text{canales} + \text{canal cámara} + \text{cámara abierta})}{P_{atm}} = \frac{2,42 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3}{760 \text{ torr}} = 2,38 \cdot 10^{-15} \text{ m}^3 \cdot \text{Pa}^{-1}$$

La constante de tiempo en el paso 4 será:

$$\tau(\text{paso } 4) = R(\text{paso } 4) \times C(\text{paso } 4) = 26,9 \text{ ms}$$

La respuesta en el tiempo se grafica en la Figura 54.

Figura 54. Pre-descarga, respuesta temporal



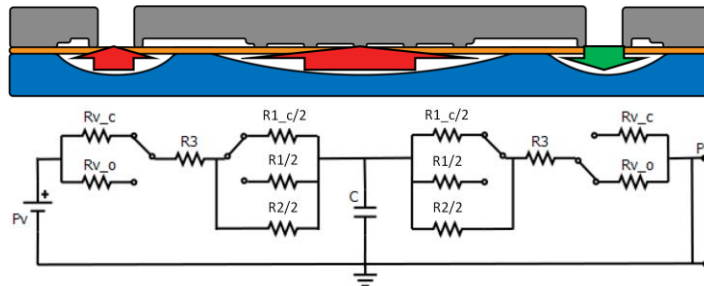
Fuente: El autor (2013)

La presión en la cámara de bombeo incrementa debido al contraflujo, lo cual permite el ingreso del gas dentro del volumen de trabajo debido a las fugas a través de la válvula de admisión. Las fugas correspondientes a este paso operativo serán consideradas junto con las correspondientes al paso 5 como se presenta más adelante.

Paso 5 (Descarga)

Se produce el cierre de la cámara de bombeo, expulsando el gas a la atmósfera. El circuito equivalente para la etapa de descarga se muestra en la Figura 55.

Figura 55. Descarga, circuito equivalente



Fuente: El autor (2013)

La resistencia total puede aproximarse como:

$$R(\text{paso } 5) \approx (R_{1_c}/2 || R_2/2 + R_3 + R_{v_o}) = 3,13 \cdot 10^{13} \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$$

La capacitancia a la presión atmosférica de 760 torr está dada por:

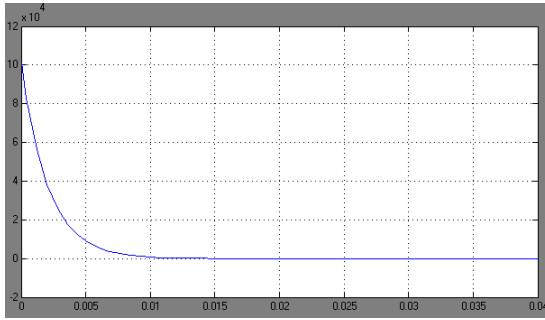
$$C(\text{paso } 5) = \frac{V(\text{canales} + \text{canal cámara})}{P_{atm}} = \frac{6,7 \cdot 10^{-12} \text{ m}^3}{760 \text{ torr}} = 6,612 \cdot 10^{-17} \text{ m}^3 \cdot \text{Pa}^{-1}$$

La constante de tiempo en el paso 5 será:

$$\tau(\text{paso } 4) = R(\text{paso } 4) \times C(\text{paso } 4) = 2,06 \text{ ms}$$

La respuesta en el tiempo se grafica en la Figura 56.

Figura 56. Descarga, respuesta temporal



Fuente: El autor (2013)

Para los pasos 4 y 5, el volumen de control sufre la filtración de gas, mientras que la presión de dicho volumen al finalizar el paso 5 está dada por (Zhou, 2011):

$$P_5 V_t \approx P_3 V_t + P_0 Q(t_4 + t_5) \quad (40)$$

donde

P_5 : Presión en el volumen de trabajo después del paso 5

t_4 : Duración del paso 4 ($3\tau(\text{paso } 4) = 80,8 \text{ ms}$)

t_5 : Duración del paso 5 ($3\tau(\text{paso } 5) = 6,2 \text{ ms}$)

Paso 6 (Post-descarga)

Luego de la carrera de descarga, la válvula de salida es cerrada nuevamente como se muestra en la Figura 57, permitiendo el inicio de un nuevo ciclo de bombeo. La presión al interior del volumen de trabajo luego del paso 6 estará dada por (Zhou, 2011):

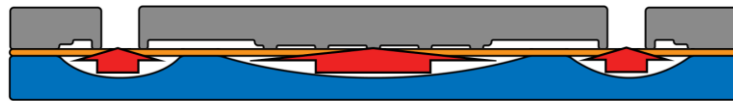
$$P_6 V_t = P_5 V_t + P_0 Q t_6 \quad (41)$$

donde

P_6 : Presión en el volumen de trabajo después del paso 6

t_6 : Duración del paso 6 (*tiempo de cierre asumido = 50 ms*)

Figura 57. Post-descarga



Fuente: El autor (2013)

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados de simulación para el modelo computacional de microbomba (especificado en la configuración estándar), así como para el diseño en base a la metodología de analogías eléctricas se detallan a continuación:

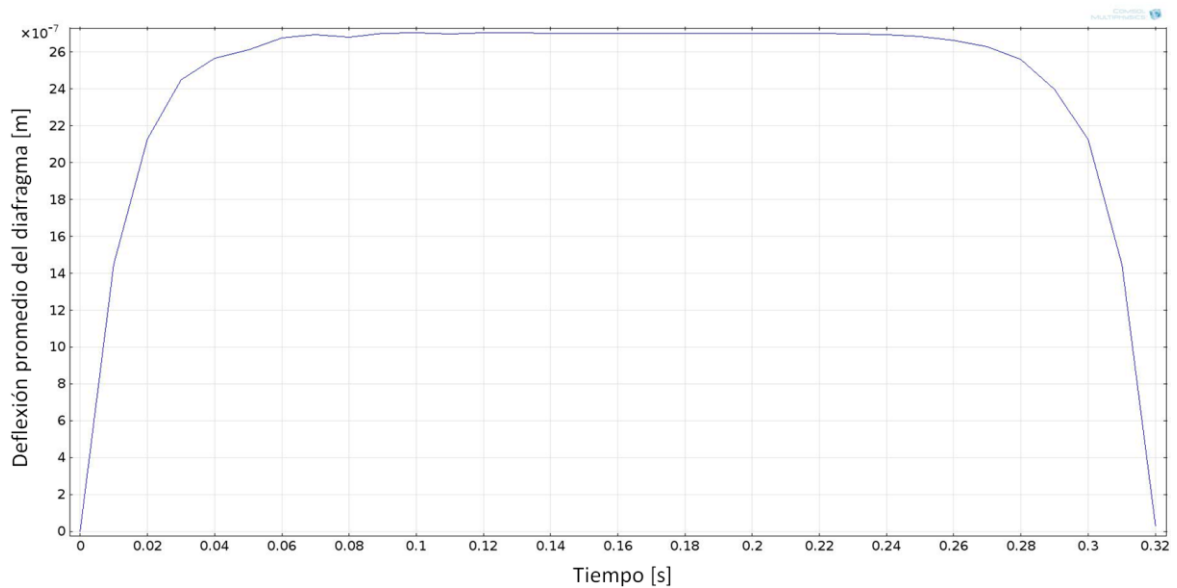
6.1 DEFLEXIÓN PROMEDIO DEL DIAFRAGMA

La Figura 58 muestra el valor de deflexión promedio del diafragma a lo largo del tiempo, obteniéndose un valor cercano a los 3 μm proyectados para w_{prom} , por otra parte, es posible apreciar como el valor de deflexión se ciñe al perfil de actuación adaptado mostrado con anterioridad en la Figura 32, coincidiendo con los tiempos de establecimiento calculados con anterioridad en el apartado “Tiempos de respuesta de la cámara de bombeo”. Información estadística sobre los valores de w_{prom} obtenidos se presenta en la Tabla 8.

Tabla 8. Deflexión promedio del diafragma, estadísticas

Valor máximo	2.70397E-6 [m]	Valor RMS	2.52820E-6 [m]
Valor promedio	2.46875E-6 [m]	Desviación estándar	5.45008E-7 [m]
Valor mínimo	1.09405E-14 [m]	Varianza	2.97034E-13 [m ²]

Figura 58. Deflexión promedio del diafragma



Fuente: El autor (2013)

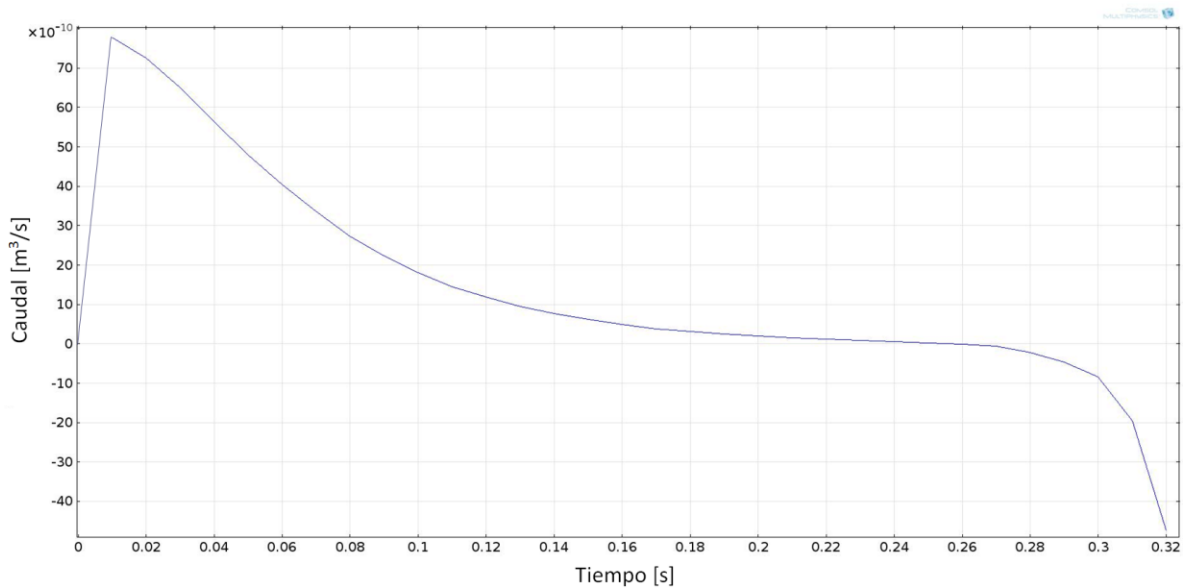
6.2 VALORES DE CAUDAL Y PRESIÓN

La Figura 59 muestra el comportamiento del caudal a lo largo del tiempo. Detalles sobre los valores de Q obtenidos se presentan en la Tabla 9. En la gráfica es posible apreciar cómo el caudal aumenta abruptamente con la deflexión del diafragma en los primeros instantes del ciclo operativo, para comenzar a descender gradualmente una vez el diafragma se aproxima a su valor de deflexión final, tomando valores negativos al final del ciclo, debido a un contraflujo causado por el retorno del diafragma a su posición inicial, ya que estos valores de caudal fueron medidos en el extremo del canal conector de admisión.

Tabla 9. Caudal, estadísticas

Valor máximo	7.77931E-9 [m ³ /s]	Valor RMS	2.81388E-9 [m ³ /s]
Valor promedio	1.39887E-9 [m ³ /s]	Desviación estándar	2.44153E-9 [m ³ /s]
Valor mínimo	-4.74153E-9 [m ³ /s]	Varianza	5.96110E-18 [m ⁶ /s ²]

Figura 59. Caudal



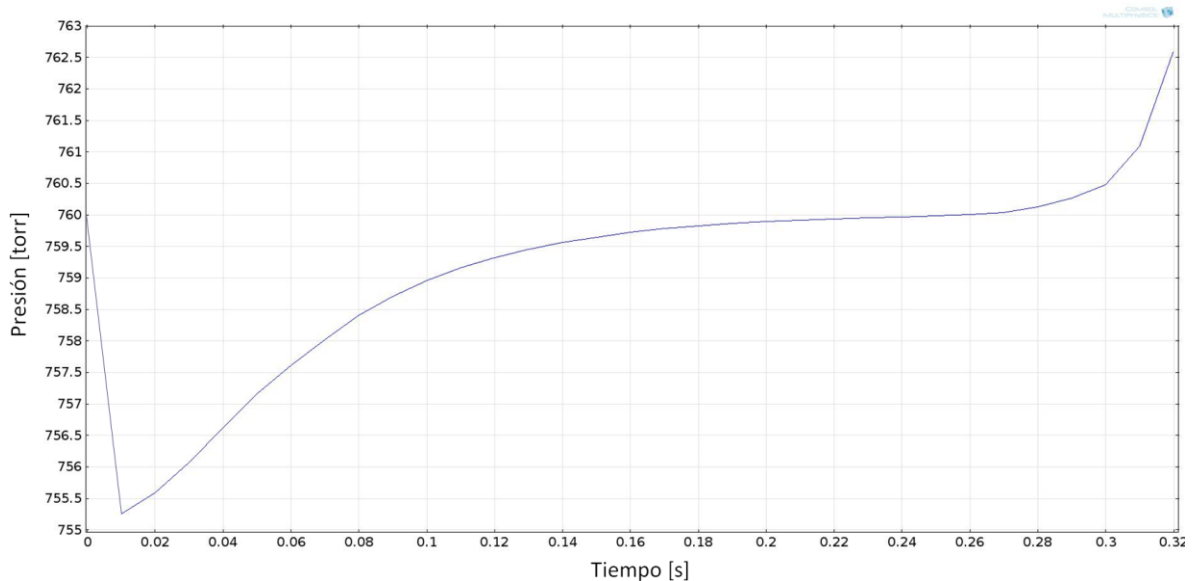
Fuente: El autor (2013)

La Figura 60 muestra el comportamiento de la presión a lo largo del tiempo. Detalles sobre los valores de P obtenidos se presentan en la Tabla 10. En la gráfica es posible apreciar cómo la presión disminuye abruptamente con la deflexión del diafragma en los primeros instantes del ciclo operativo, para comenzar a aumentar gradualmente una vez el diafragma se aproxima a su valor de deflexión final, alcanzando valores superiores a P_{atm} al final del ciclo, debido a un contraflujo causado por el retorno del diafragma a su posición inicial, siendo estos valores de presión medidos en el extremo del canal conector de admisión.

Tabla 10. Presión, estadísticas

Valor máximo	762.59622 [torr]	Valor RMS	759.16524 [torr]
Valor promedio	759.16384 [torr]	Desviación estándar	1.45634 [torr]
Valor mínimo	755.25019 [torr]	Varianza	2.12093 [torr ²]

Figura 60. Presión

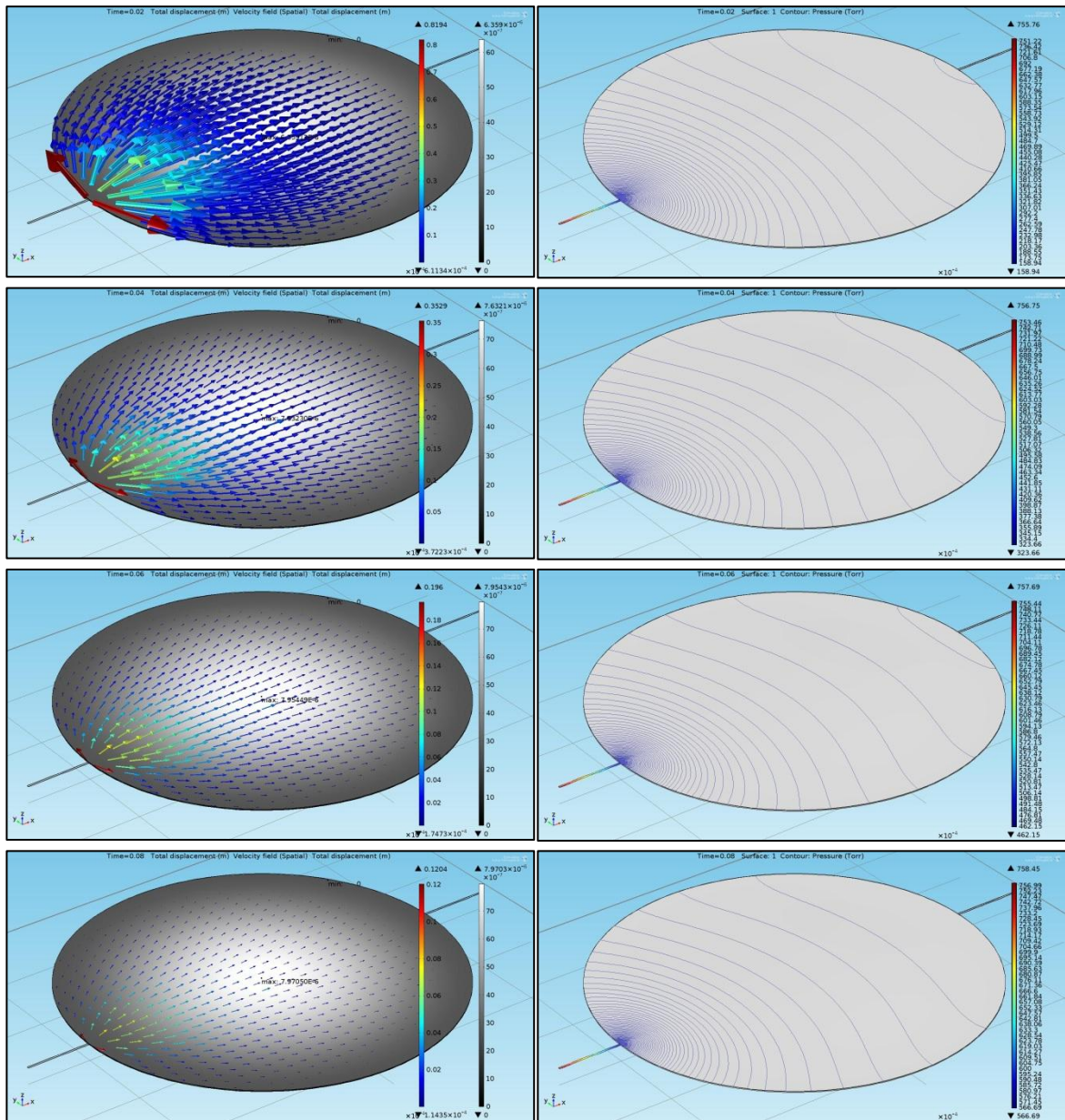


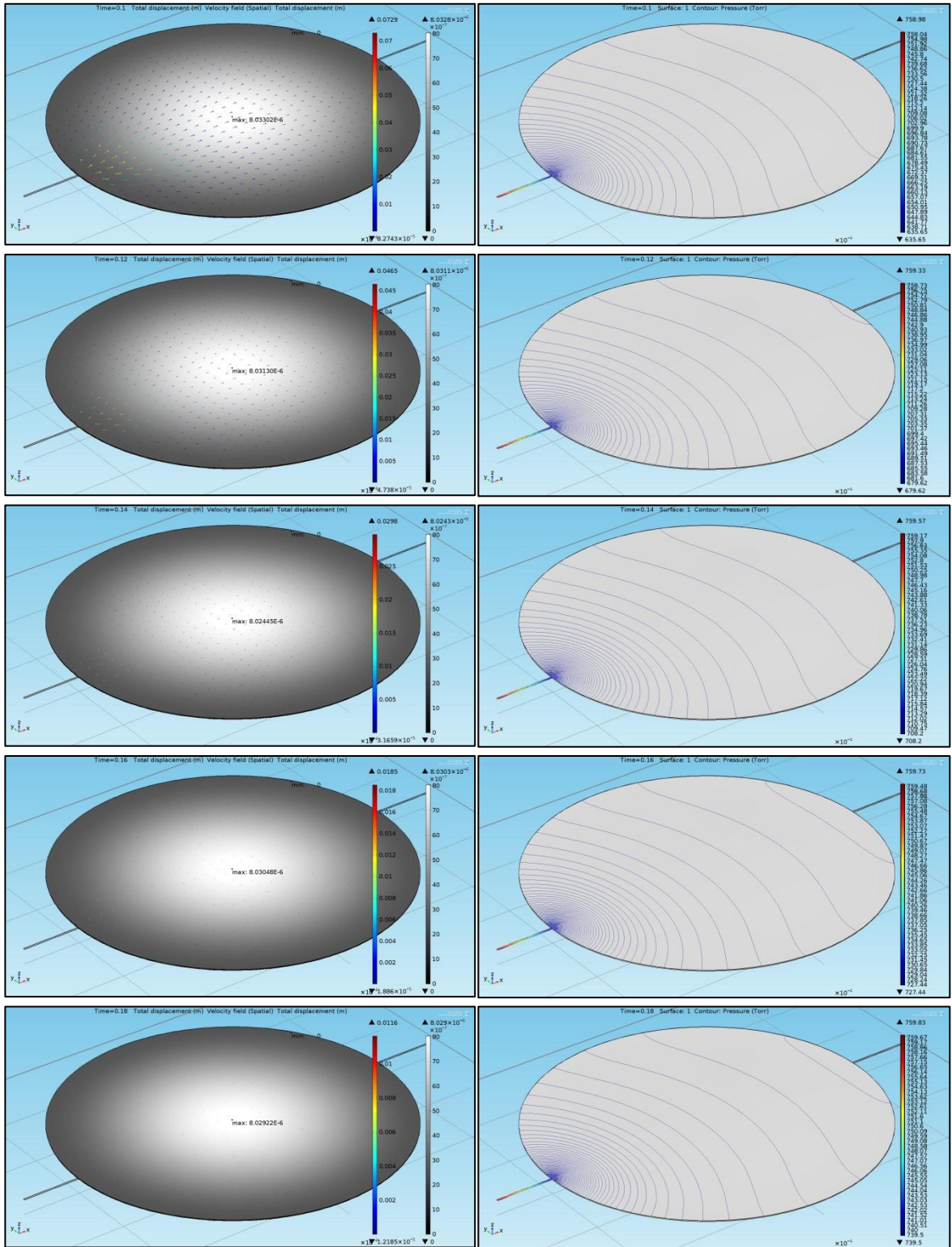
Fuente: El autor (2013)

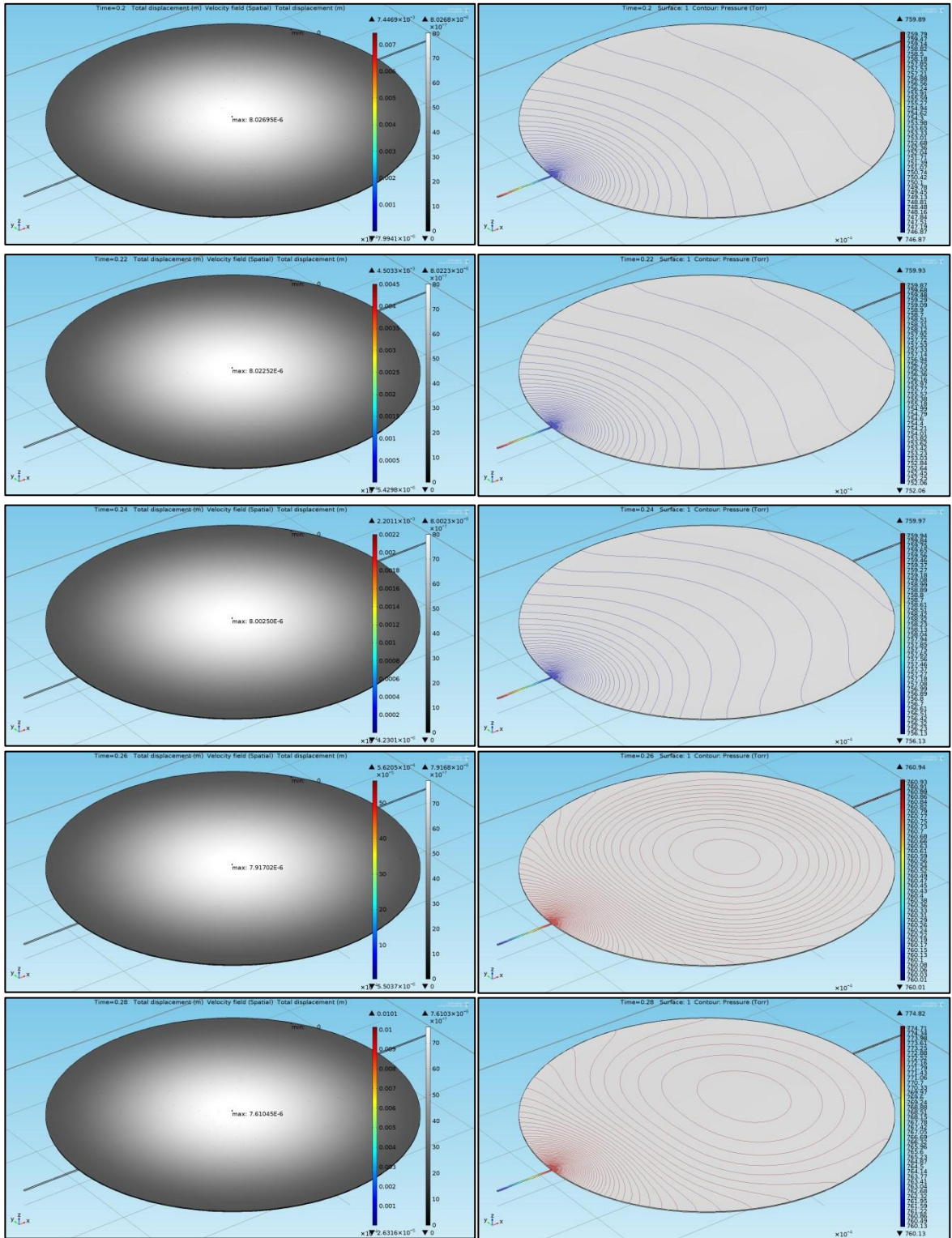
Por simplicidad en el proceso de simulación, se consideró la existencia de una única frontera libre, que permitiese tanto la admisión como la descarga de gas dependiendo de la dinámica del diafragma, es debido a esto que las Figuras 59 y 60 muestran valores negativos de caudal y presiones superiores al valor atmosférico respectivamente, ya que si se incorporará el efecto de cierre y apertura de las válvulas de admisión y descarga, se restringiría la dirección del flujo en una única dirección, evitando la obtención de valores de caudal y presión aparentemente contradictorios. Sin embargo, gráficas sobre el perfil de flujo y presión en la cámara de bombeo pueden brindarnos un panorama aproximado del ciclo operativo al interior del microdispositivo. Gracias a la condición de simetría

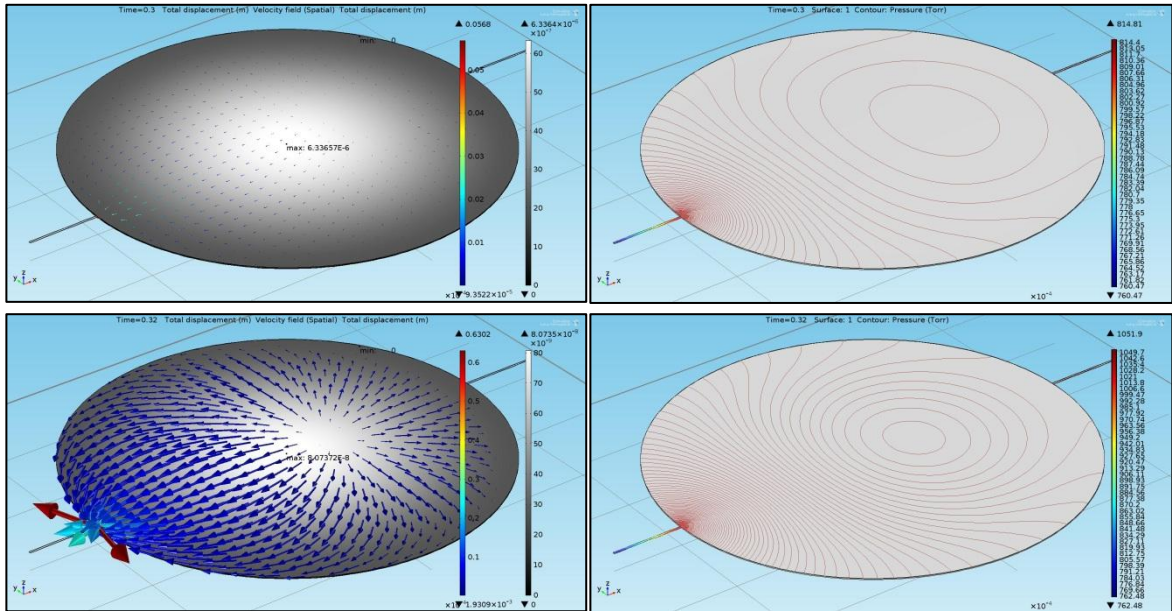
ofrecida por la geometría de la microbomba, solo basta asumir (aunque algunas de las gráficas puedan mostrar la dirección contraria) que el fenómeno de succión se desarrollará siempre a través del canal conector de entrada (parte inferior-izquierda), mientras que la descarga se realizará por medio del canal conector de salida (parte superior-derecha) como puede apreciarse en la Figura 61.

Figura 61. Perfiles de caudal y presión, $t = 0.02s - 0.32s$









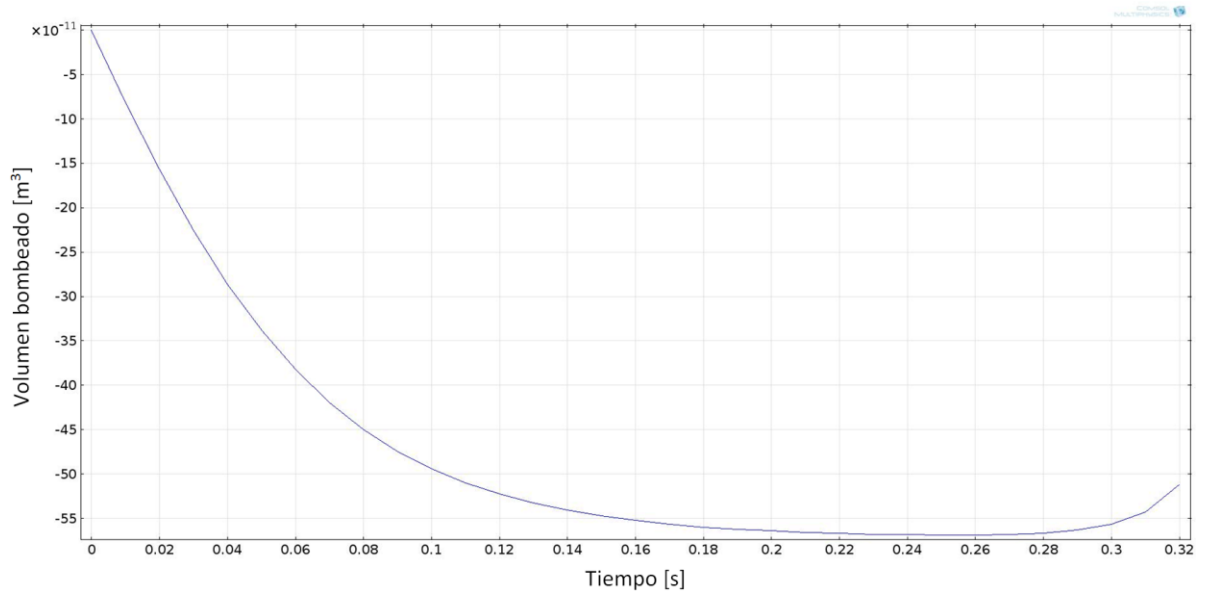
Fuente: El autor (2013)

6.3 VOLUMEN BOMBEADO

El volumen de fluido bombeado constituye uno de los parámetros operativos de interés en este estudio, valor útil en la estimación del máximo valor de vacío alcanzable por medio del dispositivo de bombeo, como se expuso con anterioridad en la sección “Presión de vacío alcanzada”. La Figura 62 muestra el comportamiento del volumen bombeado, correspondiente al cálculo numérico de la integral de tiempo:

$$V_p(t) = \int_0^t \dot{V}_{out} dt \quad (42)$$

Figura 62. Volumen bombeado

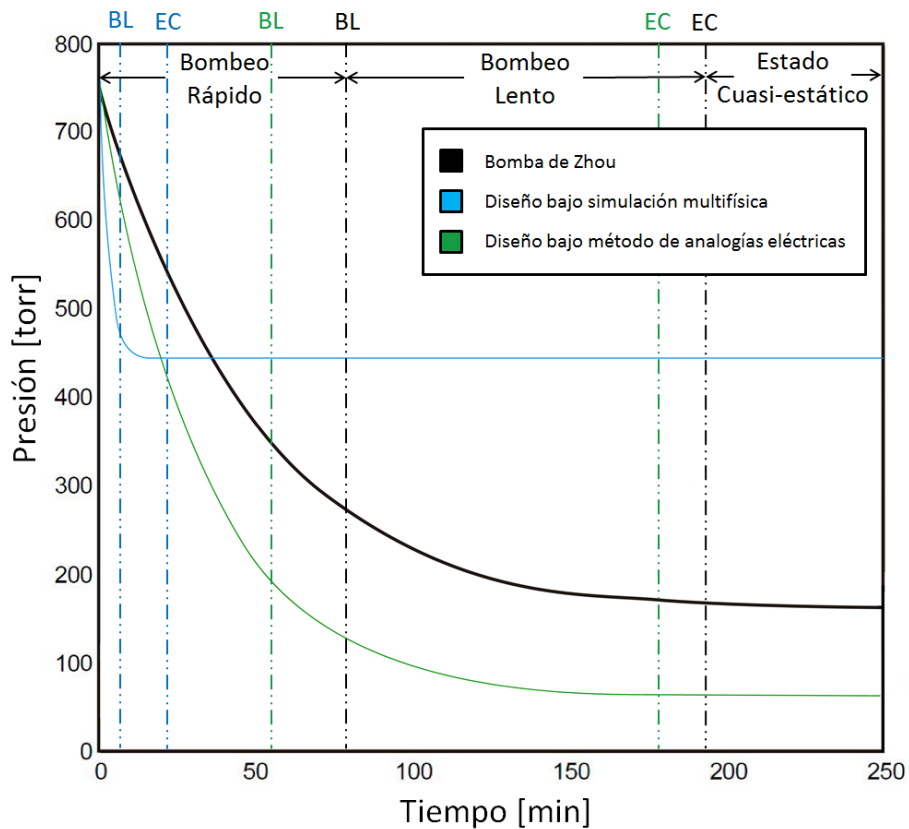


Fuente: El autor (2013)

6.4 MÁXIMO VALOR DE VACÍO

Con el ánimo de determinar el máximo valor de vacío alcanzado a lo largo de múltiples ciclos de bombeo, se acopló el conjunto de ecuaciones (37-41) presentado en el apartado “Esquema eléctrico equivalente” (mayores detalles se brindan en el Anexo B del presente documento). El desempeño del modelo de microbomba simulado mediante COMSOL®, junto al diseño propuesta gracias a la metodología de analogías eléctricas se comparan con los resultados experimentales del prototipo de Zhou, como puede apreciarse en la Figura 63.

Figura 63. Máximo valor de vacío



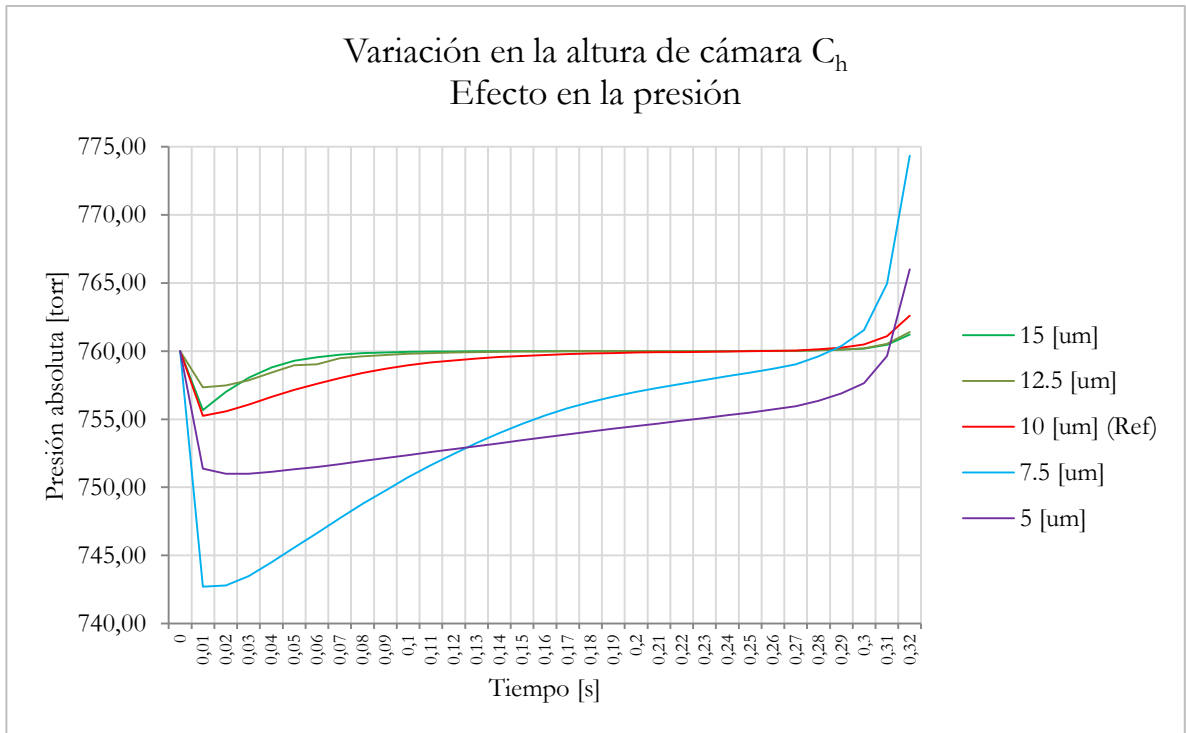
Fuente: El autor (2013)

6.5 ANÁLISIS DE CONFIGURACIONES ALTERNATIVAS

En base a la disponibilidad de una herramienta de simulación tan robusta como COMSOL®, se ha llevado a cabo un estudio paramétrico del prototipo de microbomba de vacío, con el ánimo de evidenciar el efecto de ciertos parámetros estructurales u operativos en cuanto a valores de presión, caudal y volumen bombeado en el primer ciclo operativo del modelo de simulación.

A continuación se presentarán los resultados de simulación obtenidos al variar gradualmente los valores de altura de cámara, longitud del canal conector y periodo de operación. Teniendo como referencia la configuración estándar detallada en el apartado “Simulación multifísica”.

Figura 64. Efecto en la presión (altura de cámara variable)



	5 [um]	7.5 [um]	10 [um]	12.5 [um]	15 [um]
Valor máximo	766,010 [torr]	774,354 [torr]	762,596 [torr]	761,395 [torr]	761,211 [torr]
Valor mínimo	750,996 [torr]	742,705 [torr]	755,250 [torr]	757,349 [torr]	755,668 [torr]
Valor promedio	754,064 [torr]	754,164 [torr]	759,686 [torr]	755,250 [torr]	759,722 [torr]
Valor RMS	754,068 [torr]	754,190 [torr]	759,687 [torr]	755,250 [torr]	759,723 [torr]
Desviación estándar	2,594 [torr]	6,286 [torr]	1,456 [torr]	0,757 [torr]	0,861 [torr]
Varianza	6,731 [torr ²]	39,521 [torr ²]	2,120 [torr ²]	0,573 [torr ²]	0,742 [torr ²]

Fuente: El autor (2013)

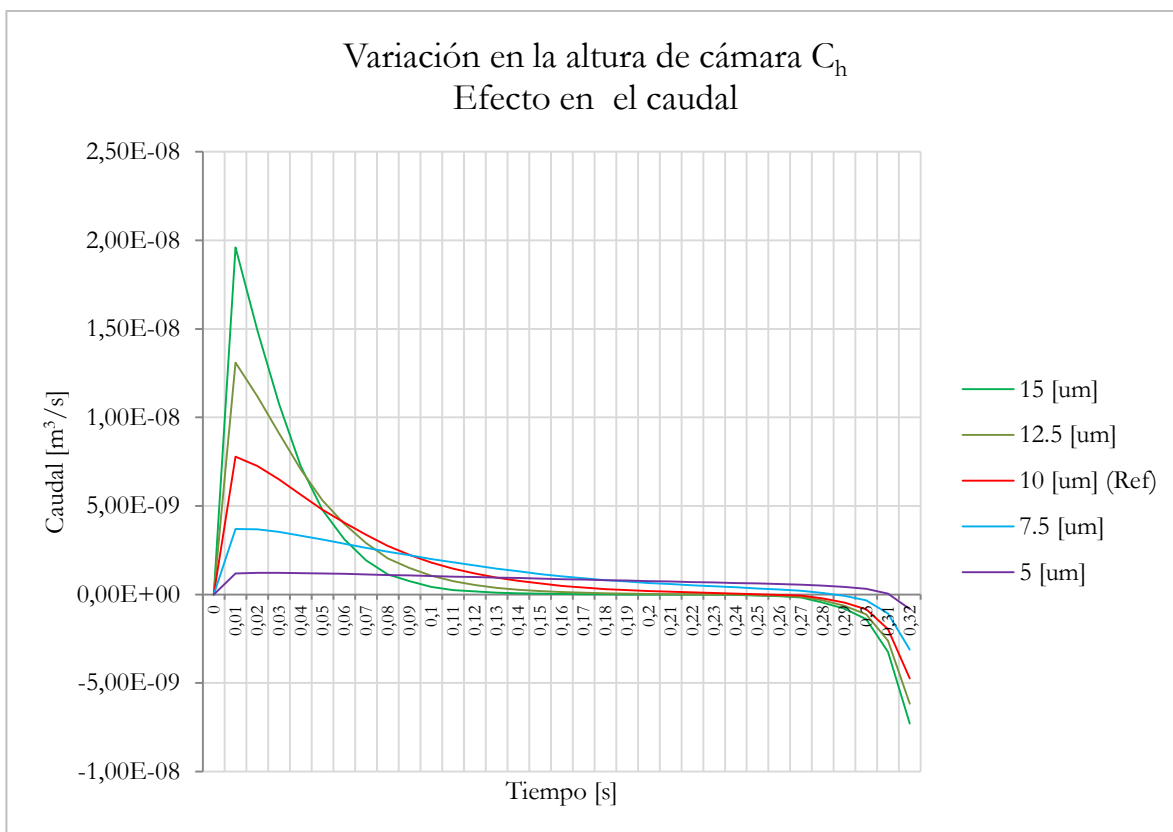
En la Figura 64 puede apreciarse la inestabilidad de los resultados, sobre todo al disminuir el valor de altura en la cámara de bombeo. Sin embargo, este fenómeno ha sido anteriormente documentado en la literatura concerniente a software de simulación, ya que el proceso de discretización de secciones cada vez más

estrechas puede llevar a un incremento del "Aspect Ratio", obteniéndose elementos de mala calidad.

El "Aspect Ratio" en elementos finitos es la relación entre el lado más largo y el más pequeño del elemento. El rango de valores aceptables depende del problema y del tipo de elemento, pero habitualmente se utilizan límites de 3:1 para tensiones y 10:1 para desplazamientos. No existe una regla fija a seguir, el valor límite del "Aspect Ratio" puede depender del orden del elemento, de la función de desplazamiento, del tipo de integración numérica utilizada e incluso del comportamiento del material. Elementos con elevado "Aspect Ratio" (elementos de mala calidad) ocasionaran localmente resultados de mala calidad. Al ser los valores de tensión menos exactos que los valores de desplazamiento, un análisis de tensiones requiere una malla mucho más fina (IBERISA, 2001).

Con lo cual es posible concluir que el algoritmo de solución para el campo de presiones es mucho más susceptible a la calidad de los elementos, que la solución para el campo de velocidades, como se verá más adelante.

Figura 65. Efecto en el caudal (altura de cámara variable).



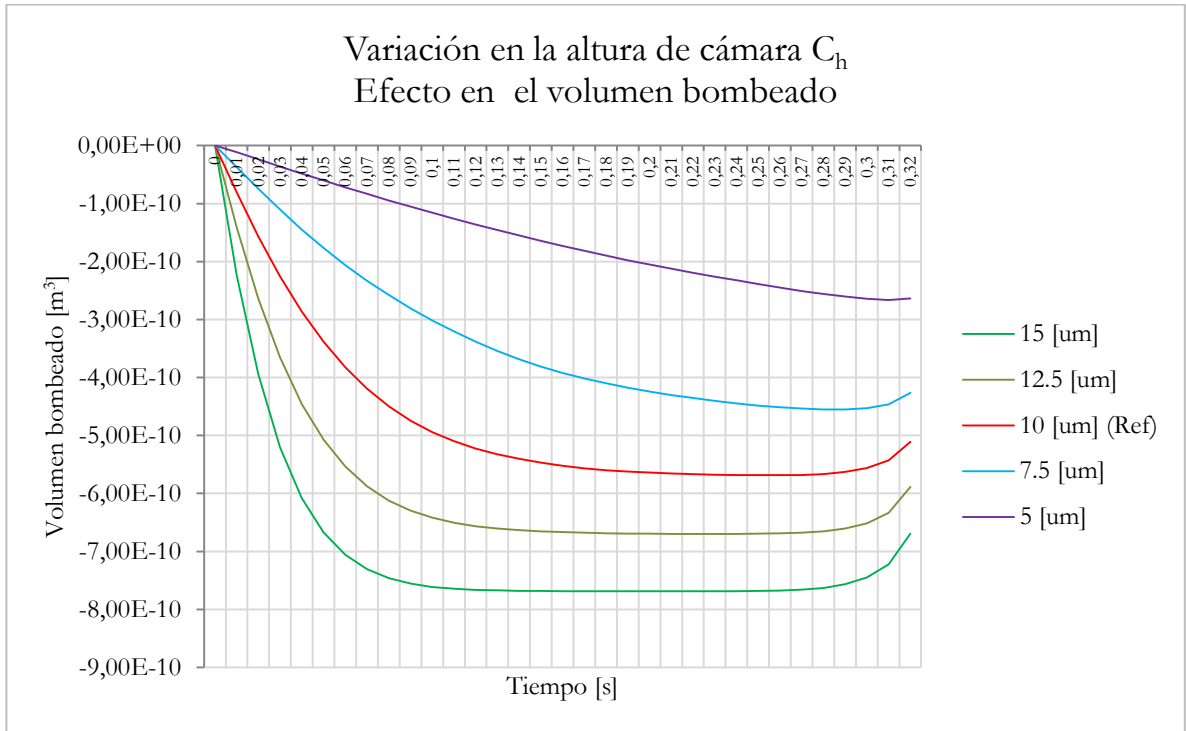
	5 [um]	7.5 [um]	10 [um]	12.5 [um]	15 [um]
Valor máximo	1,22E-9 [m³/s]	3,69E-9 [m³/s]	7,77E-9 [m³/s]	1,31E-8 [m³/s]	1,95E-8 [m³/s]
Valor mínimo	-8,15E-10 [m³/s]	-3,10E-9 [m³/s]	-4,74E-9 [m³/s]	-6,16E-9 [m³/s]	-7,28E-9 [m³/s]
Valor promedio	8,13E-10 [m³/s]	1,25E-9 [m³/s]	1,39E-9 [m³/s]	1,45E-9 [m³/s]	1,47E-9 [m³/s]
Valor RMS	8,86E-10 [m³/s]	1,84E-9 [m³/s]	2,81E-9 [m³/s]	3,73E-9 [m³/s]	4,62E-9 [m³/s]
Desviación estándar	3,53E-10 [m³/s]	1,34E-9 [m³/s]	2,44E-9 [m³/s]	3,44E-9 [m³/s]	4,37E-9 [m³/s]
Varianza	1,24E-19 [m⁶/s²]	1,82E-18 [m⁶/s²]	5,9E-18 [m⁶/s²]	1,18E-17 [m⁶/s²]	1,91E-17 [m⁶/s²]

Fuente: El autor (2013)

En la Figura 65 es posible apreciar cómo el incremento de la altura de cámara genera mayores valores de caudal en las primeras instancias del ciclo de bombeo, debido a que se cuenta con un mayor volumen muerto en la cámara, aumentando

la capacidad de almacenamiento de un fluido de naturaleza compresible como el aire.

Figura 66. Efecto en el volumen bombeado (altura de cámara variable).

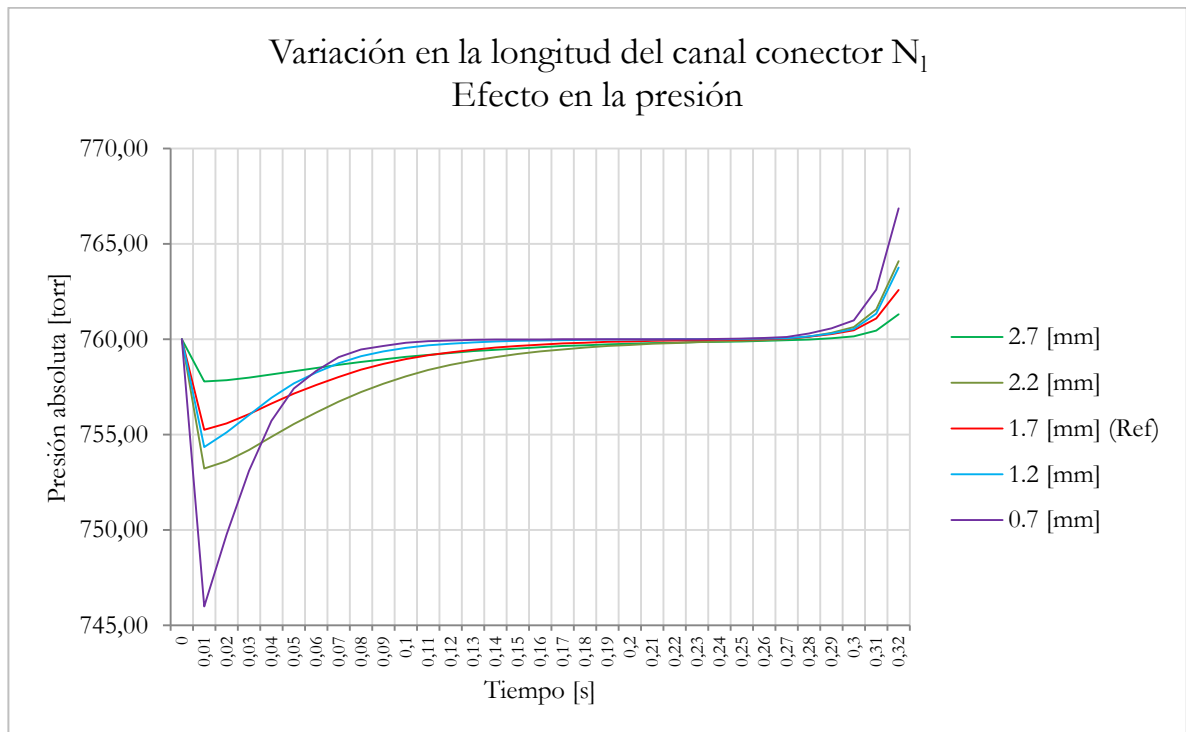


	5 [um]	7.5 [um]	10 [um]	12.5 [um]	15 [um]
Valor máximo	-1,55E-17 [m³]	-2,83E-17 [m³]	-2,29E-17 [m³]	-3,04E-17 [m³]	-3,60E-17 [m³]
Valor mínimo	-2,66E-10 [m³]	-4,55E-10 [m³]	-5,68E-10 [m³]	-6,69E-10 [m³]	-7,68E-10 [m³]
Valor promedio	-1,60E-10 [m³]	-3,36E-10 [m³]	-4,75E-10 [m³]	-5,93E-10 [m³]	-7,02E-10 [m³]
Valor RMS	1,79E-10 [m³]	3,60E-10 [m³]	4,95E-10 [m³]	6,10E-10 [m³]	7,18E-10 [m³]
Desviación estándar	8,01E-11 [m³]	1,29E-10 [m³]	1,41E-10 [m³]	1,45E-10 [m³]	1,48E-10 [m³]
Varianza	6,42E-21 [m⁶]	1,67E-20 [m⁶]	1,99E-20 [m⁶]	2,12E-20 [m⁶]	2,20E-20 [m⁶]

Fuente: El autor (2013)

En la Figura 66 es posible apreciar como ya se ha dicho anteriormente, la relación entre un mayor volumen muerto en la cámara y una mayor capacidad de almacenamiento y posterior descarga de un fluido compresible como el aire.

Figura 67. Efecto en la presión (longitud de canal conector variable).

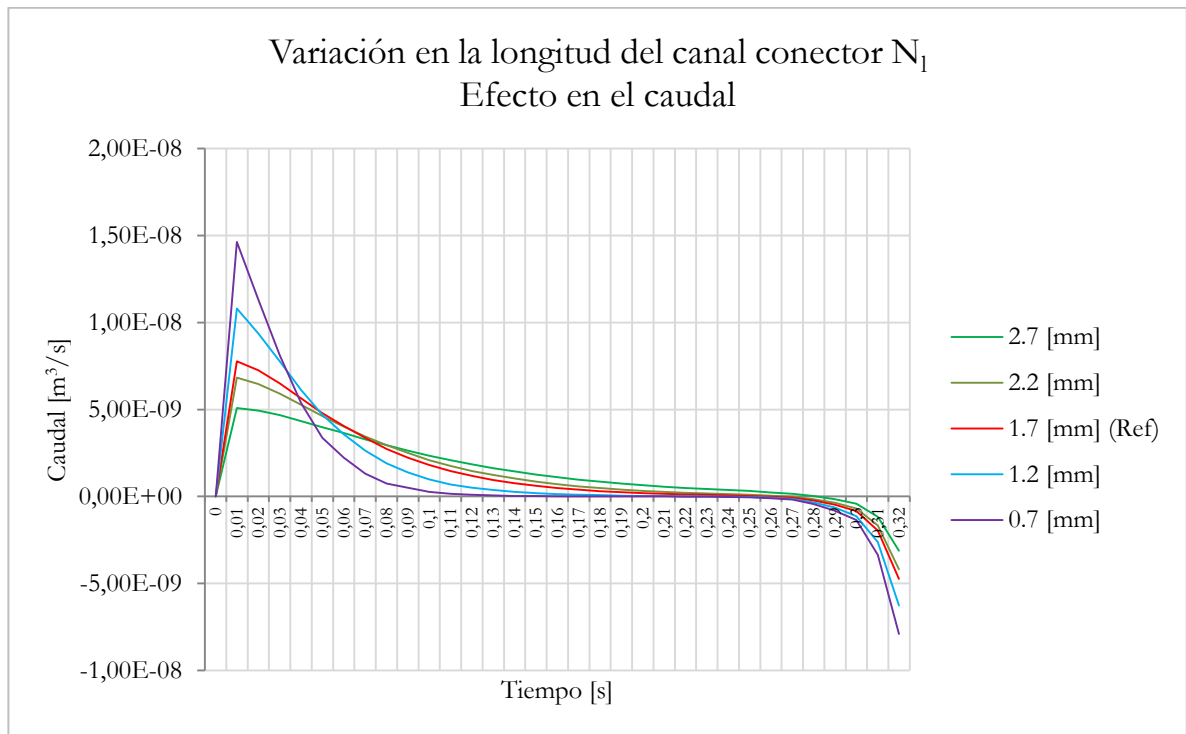


	0.7 [mm]	1.2 [mm]	1.7 [mm]	2.2 [mm]	2.7 [mm]
Valor máximo	766,861 [torr]	763,755 [torr]	762,596 [torr]	764,099 [torr]	761,313 [torr]
Valor mínimo	745,994 [torr]	754,349 [torr]	755,250 [torr]	753,219 [torr]	757,787 [torr]
Valor promedio	759,139 [torr]	759,395 [torr]	759,686 [torr]	758,599 [torr]	759,382 [torr]
Valor RMS	759,145 [torr]	759,396 [torr]	759,687 [torr]	758,602 [torr]	759,382 [torr]
Desviación estándar	3,049 [torr]	1,549 [torr]	1,456 [torr]	2,158 [torr]	0,734 [torr]
Varianza	9,297 [torr ²]	2,400 [torr ²]	2,120 [torr ²]	4,659 [torr ²]	0,539 [torr ²]

Fuente: El autor (2013)

En la Figura 67 la inestabilidad de los resultados, debida al alto “Aspect Ratio” de los elementos, no evidencia un efecto claro de la longitud del canal conector sobre los valores de presión obtenidos en el puerto de admisión de la microbomba.

Figura 68. Efecto en el caudal (longitud de canal conector variable).

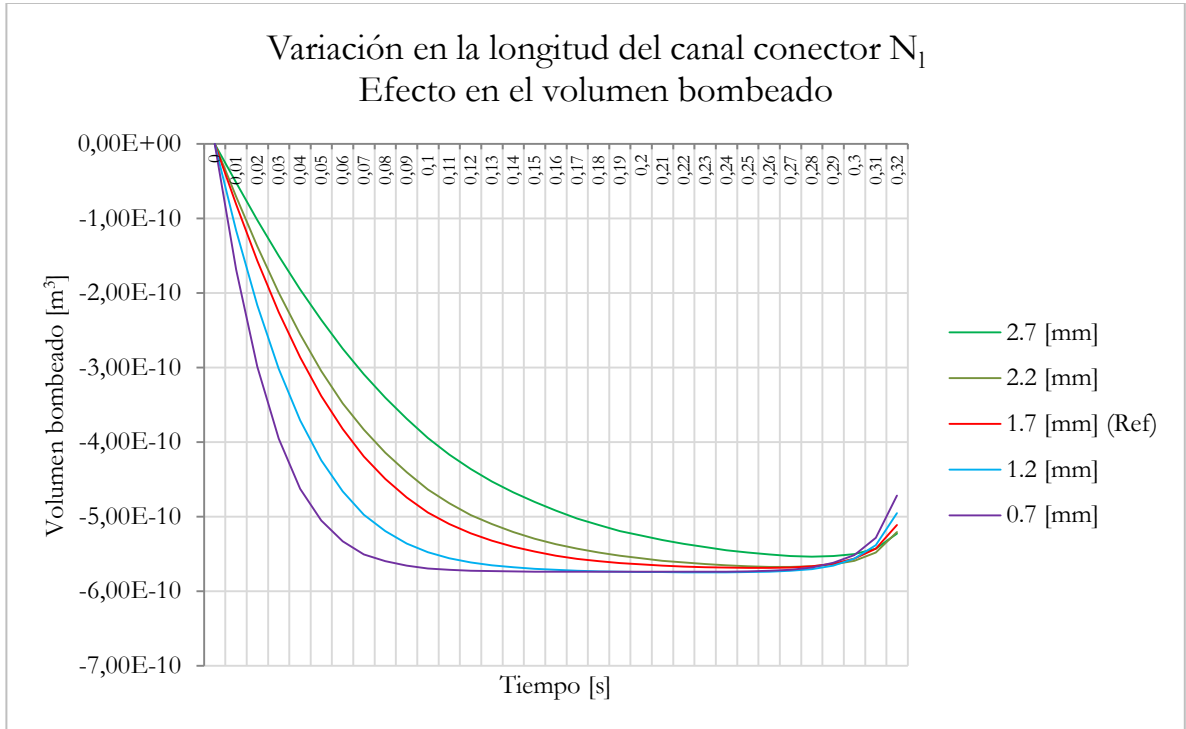


	0.7 [mm]	1.2 [mm]	1.7 [mm]	2.2 [mm]	2.7 [mm]
Valor máximo	1,46E-8 [m³/s]	1,08E-8 [m³/s]	7,77E-9 [m³/s]	6,83E-9 [m³/s]	5,07E-9 [m³/s]
Valor mínimo	-7,90E-9 [m³/s]	-6,26E-9 [m³/s]	-4,74E-9 [m³/s]	-4,19E-9 [m³/s]	-3,12E-9 [m³/s]
Valor promedio	9,87E-10 [m³/s]	1,23E-9 [m³/s]	1,39E-9 [m³/s]	1,46E-9 [m³/s]	1,52E-9 [m³/s]
Valor RMS	3,56E-9 [m³/s]	3,22E-9 [m³/s]	2,81E-9 [m³/s]	2,65E-9 [m³/s]	2,30E-9 [m³/s]
Desviación estándar	3,42E-9 [m³/s]	2,97E-9 [m³/s]	2,44E-9 [m³/s]	2,21E-9 [m³/s]	1,72E-9 [m³/s]
Varianza	1,17E-17 [m⁶/s²]	8,85E-18 [m⁶/s²]	5,9E-18 [m⁶/s²]	4,90E-18 [m⁶/s²]	2,98E-18 [m⁶/s²]

Fuente: El autor (2013)

La Figura 68 muestra cómo menores longitudes del canal conector favorecen el flujo en las primeras instancias del ciclo de bombeo, lo cual coincide con el concepto de resistencia al flujo, ya que una menor longitud del canal conector llevará a menores valores de resistencia, favoreciendo mayores valores de caudal.

Figura 69. Efecto en el volumen (longitud de canal conector variable).

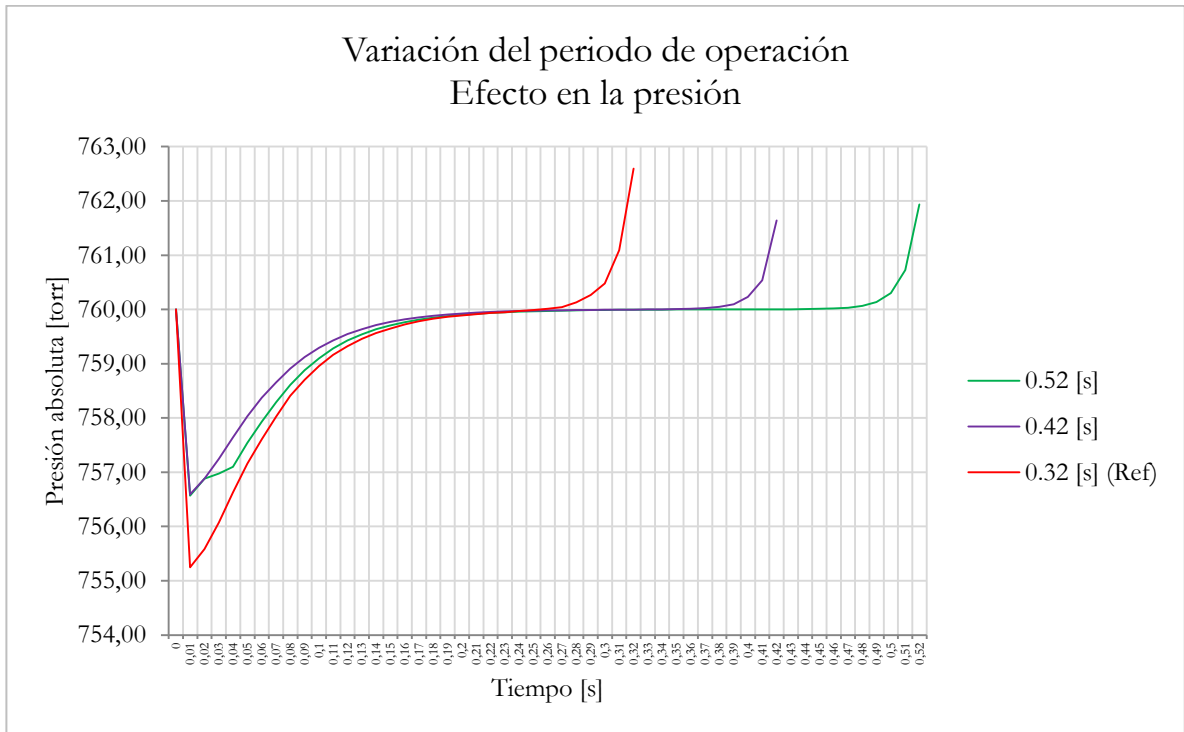


	0.7 [mm]	1.2 [mm]	1.7 [mm]	2.2 [mm]	2.7 [mm]
Valor máximo	-3,16E-17 [m³]	-2,75E-17 [m³]	-2,29E-17 [m³]	-3,24E-17 [m³]	-2,31E-17 [m³]
Valor mínimo	-5,74E-10 [m³]	-5,74E-10 [m³]	-5,68E-10 [m³]	-5,67E-10 [m³]	-5,53E-10 [m³]
Valor promedio	-5,25E-10 [m³]	-5,05E-10 [m³]	-4,75E-10 [m³]	-4,60E-10 [m³]	-4,21E-10 [m³]
Valor RMS	5,36E-10 [m³]	5,21E-10 [m³]	4,95E-10 [m³]	4,83E-10 [m³]	4,48E-10 [m³]
Desviación estándar	1,10E-10 [m³]	1,27E-10 [m³]	1,41E-10 [m³]	1,46E-10 [m³]	1,53E-10 [m³]
Varianza	1,21E-20 [m ⁶]	1,61E-20 [m ⁶]	1,99E-20 [m ⁶]	2,14E-20 [m ⁶]	2,35E-20 [m ⁶]

Fuente: El autor (2013)

La Figura 69 muestra cómo menores longitudes del canal conector llevan a alcanzar mayores valores de volumen bombeado en un lapso de tiempo más corto.

Figura 70. Efecto en la presión (periodo de operación variable).

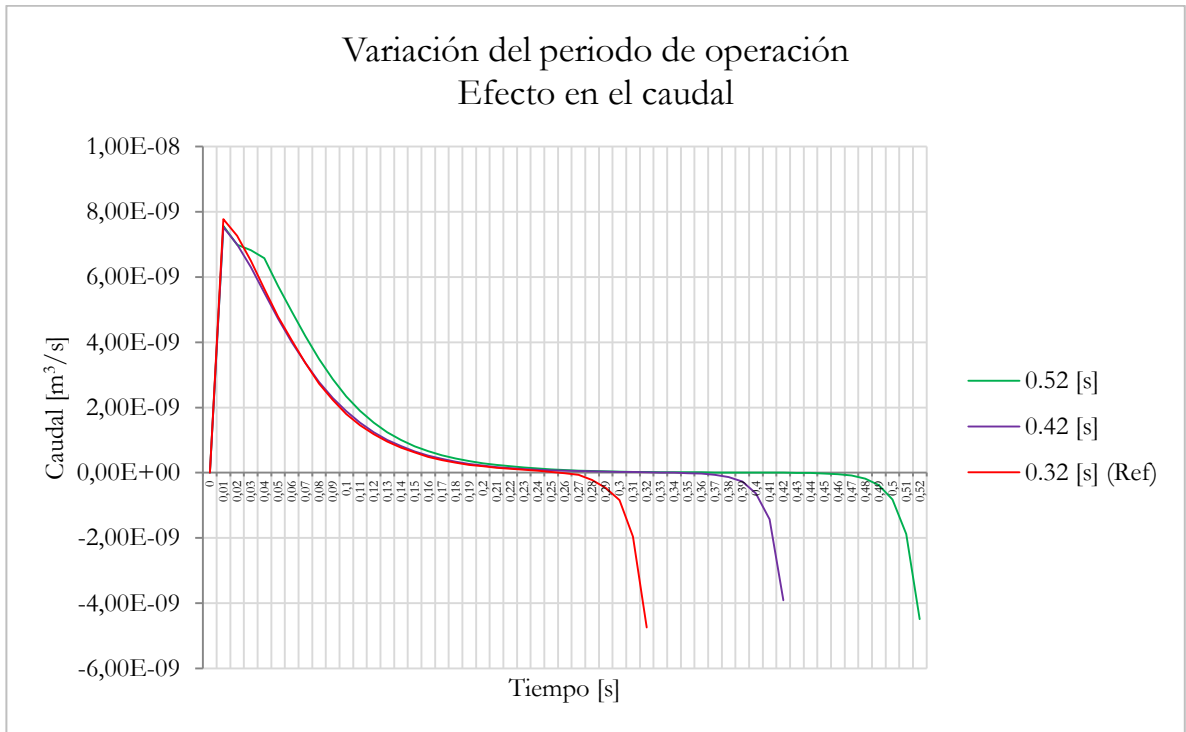


	0.32 [s]	0.42 [s]	0.52 [s]
Valor máximo	762,596 [torr]	761,642 [torr]	761,937 [torr]
Valor mínimo	755,250 [torr]	756,589 [torr]	756,569 [torr]
Valor promedio	759,686 [torr]	759,547 [torr]	759,573 [torr]
Valor RMS	759,687 [torr]	759,547 [torr]	759,574 [torr]
Desviación estándar	1,456 [torr]	0,906 [torr]	0,940 [torr]
Varianza	2,120 [torr ²]	0,820 [torr ²]	0,884 [torr ²]

Fuente: El autor (2013)

Tal y como puede verse en la Figura 70 no se aprecia un efecto importante del valor del periodo de operación sobre la magnitud de presión a la entrada del canal conector (para el primer ciclo de bombeo).

Figura 71. Efecto en el caudal (periodo de operación variable).

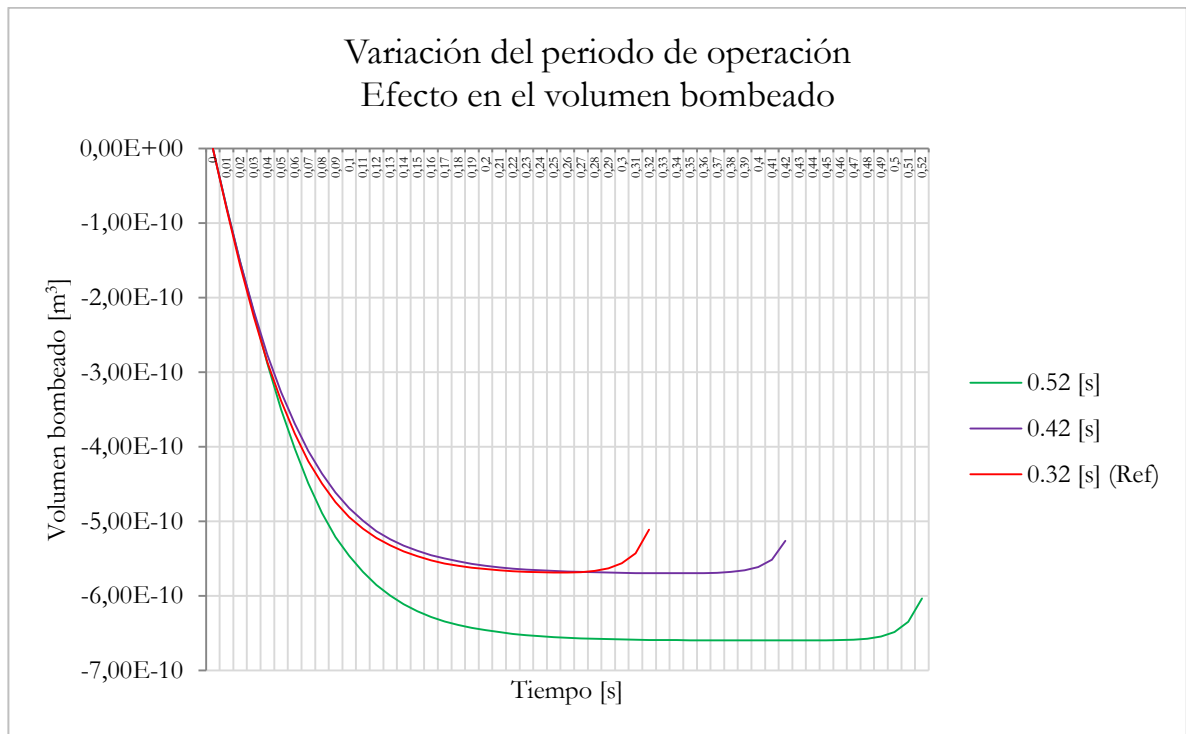


	0.32 [s]	0.42 [s]	0.52 [s]
Valor máximo	7,77E-9 [m³/s]	7,53E-9 [m³/s]	7,57E-9 [m³/s]
Valor mínimo	-4,74E-9 [m³/s]	-3,90E-9 [m³/s]	-4,49E-9 [m³/s]
Valor promedio	1,39E-9 [m³/s]	1,09E-9 [m³/s]	1,02E-9 [m³/s]
Valor RMS	2,81E-9 [m³/s]	2,37E-9 [m³/s]	2,39E-9 [m³/s]
Desviación estándar	2,44E-9 [m³/s]	2,10E-9 [m³/s]	2,16E-9 [m³/s]
Varianza	5,9E-18 [m⁶/s²]	4,42E-18 [m⁶/s²]	4,70E-18 [m⁶/s²]

Fuente: El autor (2013)

De igual manera, en la Figura 71 no se aprecia un efecto importante del valor del periodo de operación sobre la magnitud del caudal en las fases de admisión y descarga de la microbomba (para el primer ciclo de bombeo).

Figura 72. Efecto en el volumen (periodo de operación variable).



	0.32 [s]	0.42 [s]	0.52 [s]
Valor máximo	-2,29E-17 [m³]	-4,10E-17 [m³]	-6,26E-17 [m³]
Valor mínimo	-5,68E-10 [m³]	-5,69E-10 [m³]	-6,59E-10 [m³]
Valor promedio	-4,75E-10 [m³]	-4,93E-10 [m³]	-5,83E-10 [m³]
Valor RMS	4,95E-10 [m³]	5,11E-10 [m³]	6,01E-10 [m³]
Desviación estándar	1,41E-10 [m³]	1,31E-10 [m³]	1,47E-10 [m³]
Varianza	1,99E-20 [m ⁶]	1,72E-20 [m ⁶]	2,18E-20 [m ⁶]

Fuente: El autor (2013)

La Figura 72 muestra un ligero incremento en el volumen bombeado al aumentar el periodo de operación, debido principalmente a que, un mayor tiempo de carga disponible favorece el reordenamiento y admisión de mayores cantidades de fluido.

7. CONCLUSIONES

- En base a los objetivos del proyecto (prototipo teórico de microbomba de vacío. Mínima presión absoluta alcanzada = 100 torr, Valor de caudal = 0.1 - 5 sccm, microbomba de una etapa) se han propuesto dos variaciones en el diseño del dispositivo. La primera propuesta se basó en un modelo computacional capaz de manejar un volumen de bombeo de $56.86E-11 \text{ m}^3$ en un periodo de operación estimado de 0.38 s lo cual equivale a un caudal de 0.089 [sccm] (centímetros cúbicos estándar por minuto), con una presión absoluta mínima de 450 torr. En la segunda propuesta, se optó por el método de analogías eléctricas para el cálculo de un nuevo perfil de actuación en una microbomba de volumen muerto reducido con respecto a la primera, estimándose un volumen bombeado de $23.5E-11 \text{ m}^3$ en un periodo de operación de 0.848 s, equivalente a un caudal de 0.016 [sccm], con una presión absoluta mínima alcanzada de 66 torr, siendo la segunda opción particularmente interesante, debido al valor de presión absoluta alcanzado, superando el objetivo de diseño, mientras que su falencia en la magnitud del flujo manejado puede ser compensada con la conexión en paralelo de dispositivos similares.
- Las dimensiones finales propuestas para el dispositivo se presentaron en los parámetros estructurales listados en la Tabla 4 (página 50), con la importante variación consistente en, remplazar la presencia de una cámara

de aire con altura $C_n = 10 \text{ um}$ (reduciendo el valor de volumen muerto), por un canal interno encargado de mantener comunicados los canales conectores aun si la cámara de bombeo permanece cerrada, esto con el fin de redistribuir el volumen muerto de gas no bombeado luego de la fase de descarga. Tal canal atraviesa el ancho de la microbomba, siendo su longitud igual al diámetro del diafragma (10 mm) mientras que sus dimensiones de ancho y alto coinciden con aquellas de los canales conectores: 50 um y 10 um respectivamente.

- Se ha evaluado el desempeño tanto de funciones escalón Heaviside, como de funciones construidas a trozos, en la simulación del movimiento recíprocante de un diafragma, donde el valor de deflexión promedio para la cámara de bombeo (3um) junto con los parámetros estructurales de diseño, permitieron determinar el valor de voltaje necesario en un actuador electrostático ($V_{elec}=100 \text{ V}$, para este prototipo). Luego de ingresar dicho valor de voltaje en el modelo, el dato de deflexión en la simulación numérica fue contrastado con el valor de referencia original (3 um), obteniéndose la cifra de 2.7 um, siendo esta diferencia de tan solo el 10%. Sirviendo como respaldo a los demás resultados derivados de la simulación multifísica.
- Se logró el cálculo de los valores de resistencia asociados a la metodología de analogías eléctricas para las diferentes secciones de la microbomba, paso clave en el establecimiento de un esquema circuital equivalente a cada una de las fases desarrolladas en el ciclo operativo.
- El software de simulación COMSOL® Multiphysics, fue empleado como herramienta de análisis y diseño, previa validación de su protocolo de simulación mediante datos experimentales aportados por Hui Zhou (Zhou, 2011). La comparación de las características operativas obtenidas por la versión computacional de la microbomba de Zhou, con respecto al

desempeño experimental reportado del dispositivo, sirvió como referencia para la detección de limitantes propios de la herramienta computacional empleada, especialmente en lo que tiene que ver con el brusco incremento de los elementos de malla al tratar de discretizar secciones estrechas del modelo, dificultando una solución razonable en tiempo y recursos de computo.

- Se empleó la metodología de analogías eléctricas como enfoque de diseño al momento de determinar los tiempos consumidos por cada una de las fases del ciclo operativo de la microbomba, permitiendo establecer un nuevo perfil de actuación adaptado a las características estructurales del prototipo propuesto, logrando el diseño de una microbomba capaz de alcanzar una presión absoluta mínima de 66 torr, partiendo de condiciones de presión atmosférica.

8. APORTES

- Obtención de modelo teórico de microbomba, con información detallada de su desempeño, principio de funcionamiento, geometría y especificaciones de diseño.
- Formulación de una metodología de diseño enfocada a microdispositivos de bombeo de actuación electrostática.

- Generación de un código para el análisis mecánico y de características operativas en microbombas de vacío, así como un tutorial detallado del proceso de simulación asociado a este tipo de microdispositivos.

- Publicación en revistas indexadas:
 - Integración de actuador electrostático en microbomba de diafragma, análisis y simulación aplicando COMSOL® Multiphysics. “*Revista Ingeniería*”, Universidad de los Andes. (En revisión).
 - Simulación de interacción fluido-estructura en microbomba de vacío. “*Revista Puente*”, Universidad Pontificia Bolivariana. (En revisión).

- Participación en ponencias internacionales:
 - XXIV Congreso Panamericano de Ingeniería COPIMERA Bolivia 2013. “*Microbombas de vacío, revisión del estado del arte*”, Santa Cruz de la Sierra (Bolivia), julio 29 y 30 de 2013.
 - International Mechanical Engineering and Agricultural Sciences Congress. “*Simulation of fluid-structure interaction in vacuum micropump*”, Floridablanca (Santander), octubre 9,10 y 11 de 2013.

9. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- Propuesta de una metodología para mallado eficiente de secciones estrechas en microdispositivos empleando COMSOL® Multiphysics.

- Construcción de un modelo computacional capaz de integrar en el mismo entorno de simulación, tanto la atracción electrostática de los electrodos, como la interacción fluido-estructura propia de la microbomba.
- Reestructuración de un modelo de microbomba de vacío capaz de alcanzar valores de presión absoluta menores a los reportados en esta investigación, ya sea mediante la alteración selectiva de su geometría o la postulación de otra mecánica de funcionamiento.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ANDERSSON, H., WIJNGAAT, W., NILSSON, P., ENOKSSON, P. & STEMME, G. A valve-less diffuser micropump for microfluidic analytical systems. *Sensors and Actuators B* 72, 2001. p. 259-265
- [2] ARGYRIS, J. Three-dimensional anisotropic and inhomogeneous media – matrix analysis for small and large displacements. *Ingenieur Archiv.* 34, 1965. p. 33-55
- [3] ASTLE, A., BERNAL, L., WASHABAUGH, P., KIM, H. & NAJAFI, K. Dynamic modeling and design of a high frequency micro vacuum pump. *Proceedings of 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, Washington, DC, 2003.
- [4] ASTLE, A., BERNAL, L., WASHABAUGH, P., KIM, H. & NAJAFI, K. Theoretical and experimental performance of a high frequency gas micropump. *Proceedings of 2005 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, Orlando, FL, 2005.
- [5] ASTLE, A., PAIGE, A., BERNAL, L., WASHABAUGH, P., MUNFAKH, J., KIM, H. & NAJAFI, K. Analysis and design of multistage electrostatically-actuated microvacuum pumps. *Proceedings of 2002 ASME International Mechanical Engineering Congress*, New Orleans, LA, 2002.
- [6] BABU, V. *Fundamentals of gas dynamics*. CRC Taylor & Francis Ane Books, India, 2008.

- [7] BADMAN, E. & COOKS, R. Miniature mass analyzers. *Journal of Mass Spectrometry* 35, 2000. p. 659-671
- [8] BAO, M. & YENG, H. Squeeze film air damping in MEMS. *Sensors and Actuators*, 2007. p. 3-27
- [9] BIRD, G. *Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows*. Oxford University Press, New York, 1994.
- [10] BOHM, S., OLTHUIS, W. & BERGVELD, P. A plastic micropump constructed with conventional techniques and materials. *Sensors and Actuators* 77, 1999. p. 223-228
- [11] BORRÁS, C. Multiphysics analysis of high differential pressure electrozipper peristaltic micropump. Ph.D. Thesis, The University of Oklahoma, 2012.
- [12] BOUROUINA, T. & GRANDCHAMP, J. Modeling micropumps with electrical equivalent networks. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 6, 1996. p. 398-404
- [13] BROOKS, E. The design and fabrication of an electrostatically actuated diaphragm with silicon-on-insulator wafer. S.M Thesis, California Polytechnic State University, 2013.
- [14] CABUZ, C., HERB, W., CABUZ, E. & LU, S. The dual diaphragm pump. *Proceedings of 14th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS*, 2001. p. 519-522
- [15] COMSOL. Peristaltic pump. Tutorial, 2011.

- [16] DOMS, M. & MUELLER, J. A micromachined vapor jet pump. *Sensors and Actuators A* 119, 2005. p. 462-467
- [17] DOMS, M. & MUELLER, J. A micromachined vapor-jet vacuum pump. *Technical Digest of Transducers & Eurosensors '07*, Lyon, France, 2007. p. 2425-2428
- [18] DONEA, J., HUERTA, A., PONTHOT, J. & RODRIGUEZ-FERRAN, A. Arbitrary Lagrangian-Eulerian methods. *Encyclopedia of Computational Mechanics*, 2004.
- [19] GALAMBOS, P., JAMES, C., LANTZ, J., GIVLER, R., MCCLAIN, J. & SIMONSON, R. Passive MEMS valves with preset operating pressures for microgas analyzer. *Journal of Microelectromechanical Systems* 18, 2009. p. 14-27
- [20] GALLAGHER, R., PADLOG, J. & BIJLAARD, P. Stress analysis of heated complex shapes. *A.R.S Journal*, 1962. p. 700-707
- [21] GERLACH, T. A new micropump principle of the reciprocating type using pyramidic micro flowchannels as passive valves. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 5, 1995. p. 199-201
- [22] GOLDSCHMIDTBOING, F., DOLL, A., HEINRICHS, M., WOIAS, P., SCHRAG, H. & HOPT, U. A generic analytical model for micro-diaphragm pumps with active valves. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 15, 2005. p. 673-683
- [23] GRIFFEL, W. *Plate formulas*. Frederick Ungar Publishing Co., New York, 1968.

- [24] GRZEBYK, T. & GÓRECKA, A. Vacuum microdevices. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences 60 (1), 2012. p. 19-23
- [25] HSU, T. Engineering mechanics for microsystems design. Lectures on MEMS and Microsystems design and manufacture, San José State University, 2008.
- [26] HSU, Y. & LE, N. Equivalent electrical network for performance characterization of piezoelectric peristaltic micropump. Microfluid Nanofluid, 7, 2009. p. 237-248
- [27] IBERISA. El "Aspect Ratio" en el método de los elementos finitos. Control de la calidad de malla de elementos finitos, 2001.
- [28] KAMPER, K., DOPPER, J., EHRFELD, W. & OBERBECK, S. A self-filling low-cost membrane micropump. The Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, Heidelberg, Germany, 1998. p. 432-437
- [29] KIM, H., ASTLE, A., NAJAFI, K., BERNAL, L. & WASHABAUGH, P. A fully integrated high-efficiency peristaltic 18-stage gas micropump with active microvalves. Kobe, Japan, 2007. p. 131-134
- [30] KLEPS, I., ANGELESCU, A., SAMFIRESCU, N., GIL, A. & CORREIA, A. Study of porous silicon, silicon carbide and DLC coated field emitters for pressure sensor application, Solid-State Electronics 45, 2001. p. 997-1001
- [31] KOCH, M., HARRIS, N., EVANS, A., WHITE, N. & BRUNNSCHWEILER, A. A novel micromachined pump based on thick film piezoelectric actuation. Proceedings of the Transducers '97, International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Chicago, 1997.

- [32] KOWALSKI, P., LATECKI, B., GNIAZDOWSKI, Z., MILCZAREK, W. & SKWARA, K. A silicon gas micro pump with the piezoelectric driver. *Electronics* 6, 2010. p. 81-83
- [33] LAKSHMANA, N., MANOHAR, P. & BABU, S. Design and simulation of valveless piezoelectric micropump. Excerpt from the Proceedings of the 2012 COMSOL Conference in Bangalore, 2012.
- [34] LASER, D. & SANTIAGO, J. A review of micropumps. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 14 (6), 2004. p. 35-64
- [35] LEGTENBERG, R., GILBERT, J., SENTURIA, S. & ELWENSPOEK, M. Electrostatic curved electrode actuators. *Journal of Microelectromechanical Systems* 6 (3), 1997. p. 257-265
- [36] LI, H., ROBERTS, D., STEYN, J., TURNER, K., CARRETERO, J., YAGLIOGLU, O., SU, Y., SAGGERE, L., HAGOOD, N., SPEARING, S., SCHMIDT, M., MLCAK, R. & BREUER, K. A high-frequency, high flow rate, piezoelectrically driven MEMS micro-pump. *IEEE Solid State Sensors and Actuators Workshop*, Hilton Head SC, 2000.
- [37] LI, S. Analytical analysis of a circular PZT actuator for valveless micropumps. *Sensors and Actuators A (Physical)*, v A104, 2003.
- [38] LIOU, W. & FANG, Y. *Microfluid mechanics, principles and modeling*. McGraw-Hill, 2006.
- [39] MALLEO, D., HAAS, C., & KRAFT, M.. Design, Modelling and simulation of a PZN-PT Actuated Micropump. *Technical Proceedings of the 2005 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show*, Volume 1, 2005.

- [40] MCNAMARA, S. On-Chip vacuum generated by a micro-machined Knudsen pump. *Journal of Microelectromechanical Systems* 14 (4), 2005. p. 741-745
- [41] MELOSH, R. Structural analysis of solids. *Proceedings of the American Society of Civil Engineering*, 1963. p. 205-223
- [42] NAGY, Z. FEM simulation of microfluidic devices. Department of Micro and Nanotechnology, Technical University of Denmark, 2005.
- [43] NGUYEN, N., HUANG, X. & CHUAN, T. MEMS-micropumps: a review. *Transactions of The ASME, Journal of Fluids Engineering*, 2002. p. 84-92
- [44] PETERSEN, K. Silicon as a mechanical material. *Proc. IEEE* 70 (5), 1982.
- [45] PHYSIK INSTRUMENTE. Piezo nano positioning. *Inspiration Catalog*, 2009.
- [46] PIL, D. Theory of fluid structure interaction algorithm. University of Illinois at Chicago, Chicago, 2013.
- [47] RICHTER, T. Numerical methods for fluid-structure interaction problems. University of Heidelberg, Heidelberg, 2010.
- [48] RIVERA, M., TRUJILLO, M., ROMERO, V., LÓPEZ, J., & BERJANO, E. Numerical resolution of the hyperbolic heat equation using smoothed mathematical functions instead of Heaviside and Dirac delta distributions. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2003.

- [49] ROBERTS, D. Design, modeling, fabrication, and testing of a piezoelectric microvalve for high pressure, high frequency hydraulic applications. PhD Thesis, 1995.
- [50] SENTURIA, S. Microsystem design. Kluwer Academic Publishers, Boston, 2001.
- [51] SHARMA, V. MEMS micropump for a micro gas analyser. Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2009.
- [52] SHOJI, S. & ESASHI, M. Microflow devices and systems. Journal of Micromechanics and Microengineering, 1994. p. 57-71
- [53] STEHR, M., GRUHLER, H., STRAATMANN, H., MESSNER, S., SANDMAIER, H. & ZENGERLE, P. The selfpriming VAMP. Proceedings of Transducer '97, International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Chicago, 1997.
- [54] TILMANS, H. Equivalent circuit representation of electromechanical transducers: I. Lumped-parameter systems. Journal of Micromechanics and Microengineering, 6, 1996. p. 157-176
- [55] TIMOSHENKO, S., & WOINOWSKY, K. Theory of plates and shells. McGraw-Hill Higher Education, 2nd ed. New York, 1964.
- [56] TSUCHIYA, T., KAGEYAMA, Y., FUNABASHI, H. & SAKATA, J. Polysilicon vibrating gyroscope vacuum-encapsulated in an on-chip micro chamber. Sensors and Actuators A 90, 2003. p. 49-55

- [57] TURNER, K. An evaluation of critical issues for microhydraulic transducers: silicon wafer bonding, strength of silicon on insulator membranes and gold-tin solder bonding. MIT Master's Thesis, 2001.
- [58] VABOND PROJECT. Long-term stability of vacuum-encapsulated MEMS devices using eutectic wafer bonding. <http://www.ist-world.org> , 2005.
- [59] WANG, J. Dilute gases and DSMC. National University of Singapore, 2004.
- [60] WHITE, R. Tutorial created in COMSOL 4.3 (2012). Comsol Acoustics Introduction, 2012.
- [61] WIJNGAART, W., ANDERSSON, H., ENOKSSON, P., NOREN, K. & STEMME, G. The first self-priming and bi-directional valve-less diffuser micropump for both liquid and gas. Proceedings of the 13th Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS, 2000. p. 674-679
- [62] WOIAS, P. Micropumps: past, progress and future prospects. Sensors and Actuators B: Chemical 105 (1), 2005. p. 28-38
- [63] WOIAS, P. Micropumps, summarizing the first two decades. Microfluidics and Bio MEMS, ed. Mastrangelo and Becker, 2001. p. 39-52
- [64] WRIGHT, S. & GIANCHANDANI, Y. Controlling pressure in microsystem packages by on-chip microdischarges between thin-film titanium electrodes. Journal of Vacuum Science and Technology B 25, 2007. p. 1711-1720
- [65] WYGANT, I., & KUPNIK, M. Analytically calculating membrane displacement and the equivalent circuit model of a circular CMUT cell. International Ultrasonics Symposium Proceedings, 2008. p. 2111-2114.

[66] ZEGERLE, R. & SANDMIER, H. Microfluidics. Proceedings of the Seventh International Symposium on Micro Machine and Human Science, 1996. p. 13-20

[67] ZHANG, C., XING, D. & LI, Y. Micropumps, microvalves and micromixers within PCR microfluidic chips: Advances and trends. *Biotechnology Advances* 25 (5), 2007. p. 483-514

[68] ZHOU, H. A study of micromachined displacement pumps for vacuum generation. Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2011.

[69] ZHOU, H. Micromechanical actuators for insect flight mechanics. S.M Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2008.

[70] ZIENKIEWICZ, O. The finite element method. McGraw-Hill Book Company (UK) Limited, Maidenhead, 1977.

ANEXOS

ANEXO A. CÓDIGO MATLAB PARA ANÁLISIS MECÁNICO

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% Código para análisis mecánico y cálculo de resistencia al flujo  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
  
clear  
clc  
% Coeficiente de Poisson (Silicón) : 0.28  
pratio = 0.28;  
% Módulo de Young (Silicón) : 170 GPa  
E = 170e9;  
% Espesor del diafragma: 20 um  
h = 20e-6;  
% Cálculo del factor de rigidez a la flexión de la placa "D"  
%-----  
I = h^3/12;  
D = E*I/(1-pratio^2);  
%-----  
% Cálculo del radio de diafragma en base al voltaje de actuación (m)  
%-----  
% Permitividad del vacío : 8.85e-12 F/m  
ep=8.85e-12;  
% Valor de deflexión promedio : 3 um  
wprom=3e-6;  
% Espaciamiento mínimo entre electrodos (g0-wmax) : 20 um  
g=20e-6;  
% Valor de voltaje aplicado: 100 V  
V=100;
```

```

% Cálculo del radio de diafragma
r=((192*D*wprom*2*(g^2))/(ep*(V^2)))^(1/4);
%-----
% Cálculo de constantes de resorte (N/m)
%-----
% Pequeñas deflexiones con relación al espesor de placa (wmax<(h/2))
kl=(192*pi*D)/r^2;
% Grandes deflexiones con relación al espesor de placa (wmax>=(h/2))
knl=(-24*pi*D*(-896585-529610*pratio+342831*pratio^2))/(29645*r^2*h^2);
%-----
% Cálculo de resistencia para la cámara de bombeo
%-----
% Viscosidad del aire : 1.98e-5 Kg/(m.s)
nair=1.98e-5;
% Ancho de la tira "wr1"
nwr1=10000;
wr1=r/nwr1;
dwr1=wr1;
% Altura del elemento : 0.1 um (cám cerrada) - 3.1 um (cám abierta)
hr1=0.1e-6;
% Cálculo de resistencia total equivalente
RdivAc=0;
while wr1 < r
    Aelip=r;
    Belip=wr1;
    Per=pi*(3*(Aelip+Belip)-sqrt((10*Aelip*Belip)+3*(Aelip^2+Belip^2)));
    Rdiv=1/((8*nair*(Per/2))/(dwr1*(hr1^3)));
    RdivAc=RdivAc+Rdiv;
    wr1=wr1+dwr1;
end

```

R1=1/((1/((8*nair*2*r)/(dwr1*(hr1^3))))+(2*RdivAc));

%-----

%%%

ANEXO B. CÓDIGO MATLAB PARA MÍNIMA PRESIÓN ABSOLUTA

Código para modelo de simulación:

%%%

% Código para cálculo de la mínima presión absoluta alcanzable Sim

%%%

clear

clc

% Definición del tiempo total de operación "tf" (s) : 250 min

tf=250*60;

% Duración del ciclo operativo "t" : 0.38 s

t=0.38;

dt=0.38;

% Duración de la fase de succión/carga "tc" : 0.28 s

tc=0.28;

% Duración de la fase de pre-succión "t1" : 0.01 s

t1=0.01;

% Constante de tiempo fase de succión "tau" : 0.0931 s

tau=0.0931;

% Volumen bombeado (m^3) : 56.86e-11 (r5 CSL) - 17.84e-11 (r3 CSL)

Vp=56.86e-11;

% Volumen muerto físico (m^3)

% 78.7e-11 (r5 Ch10) - 28.44e-11 (r3 Ch10) - 2.99e-11(r3 Ch1)

Vdf=78.7e-11;

```

% Volumen muerto virtual (m^3)
Vdv=Vp*exp(-tc/tau);
% Volumen muerto total (m^3)
Vd=Vdf+Vdv;
% Volumen total a evacuar : 6e-7 m^3
Vt=6e-7;
% Presión atmosférica : 760 torr
P0=760;
% Caudal de fugas : 10e-12 m^3/s
Q=10e-12;
% Cálculo de presión absoluta mínima alcanzable
i=2;
Pt0=760;
A(1,1)=0;
A(1,2)=Pt0;
while t < tf
    pv=((Pt0*Vt)+(P0*Vd)+(P0*Q*(t1+tc)))/(Vt+Vd+Vp);
    A(i,1)=t;
    A(i,2)=pv;
    Pt0=pv;
    t=t+dt;
    i=i+1;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Código para modelo de analogías eléctricas:

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Código para cálculo de la mínima presión absoluta alcanzable Analog
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

clear
clc
% Definición del tiempo total de operación "tf" (s) : 250 min
tf=250*60;
% Duración del ciclo operativo "t" : 0.848 s
t=0.848;
dt=0.848;
% Duración de cada fase (s)
t1=0.04716;
t2=0.61452;
t3=0.05;
t4=0.0808;
t5=0.0062;
t6=0.05;
% Constante de tiempo fase de pre-succión (s)
tau1=0.01572;
% Constante de tiempo fase de succión (s)
tau2=0.20484;
% Volumen bombeado (m^3) : 23.5e-11 (r5 Analog)
Vp=23.5e-11;
% Volumen muerto físico (m^3) : 6.7e-12 (r5 Analog)
Vd=6.7e-12;
% Volumen muerto virtual (m^3)
Vd1=Vd+Vp*exp(-t1/tau1);
Vd2=Vd+Vp*exp(-t2/tau2);
% Volumen total a evacuar : 6e-7 m^3
Vt=6e-7;
% Presión atmosférica : 760 torr
P0=760;
% Caudal de fugas : 3.96e-12 m^3/s

```

```

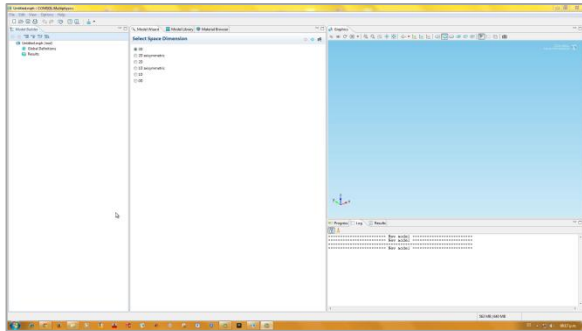
Q=3.96e-12;
% Cálculo de presión absoluta mínima alcanzable
i=2;
Pt0=760;
A(1,1)=0;
A(1,2)=Pt0;
while t < tf
    p1=((Pt0*Vt)+(P0*Vd1)+(P0*Q*(t1)))/(Vt+Vd1);
    p2=((Pt0*Vt)+(P0*Vd2)+(P0*Q*(t1+t2)))/(Vt+Vd2+Vp);
    p3=((p2*(Vt+Vd+Vp)+(P0*Q*t3))/(Vt+Vd+Vp);
    p5=((p3*Vt)+(P0*Q*(t4+t5)))/(Vt);
    p6=((p5*Vt)+(P0*Q*t6))/(Vt);
    A(i,1)=t;
    A(i,2)=p6;
    Pt0=p6;
    t=t+dt;
    i=i+1;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

ANEXO C. TUTORIAL DE SIMULACIÓN COMSOL®

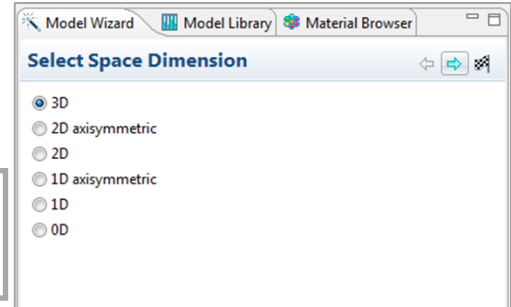
A continuación se expondrá un esquema explicativo del proceso de simulación llevado a cabo para el prototipo de microbomba propuesto en la presente investigación. Discutiendo algunas de las herramientas y utilidades presentes en el software de simulación COMSOL® Multiphysics, a fin de servir como referencia a futuras investigaciones en el área del análisis y simulación de sistemas multifísicos.

1) Inicialización del programa
COMSOL® Multiphysics

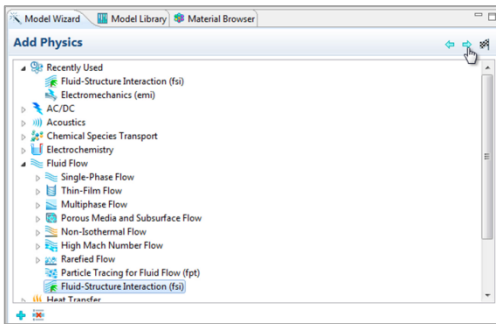


Configuración inicial

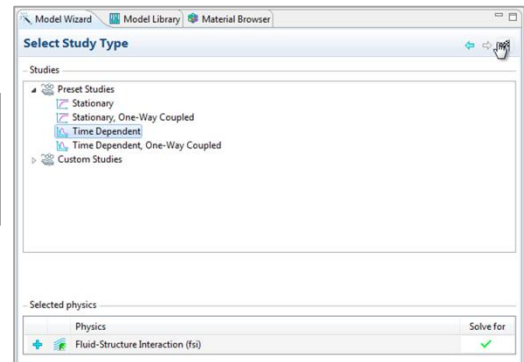
2) Selección de dimensiones espaciales
3D



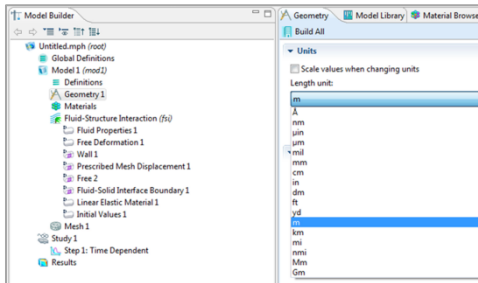
3) Selección de física representativa
Fluid-Structure Interaction (fsi)



4) Selección del tipo de estudio
Time dependent

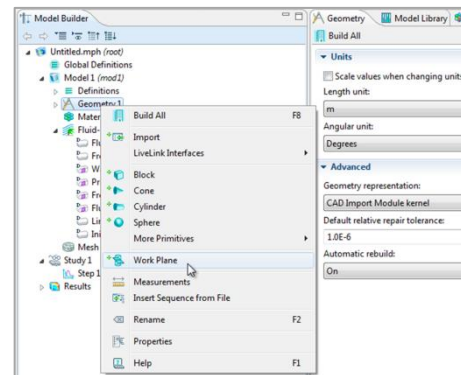


5) Selección de unidades
Geometry1>...>m

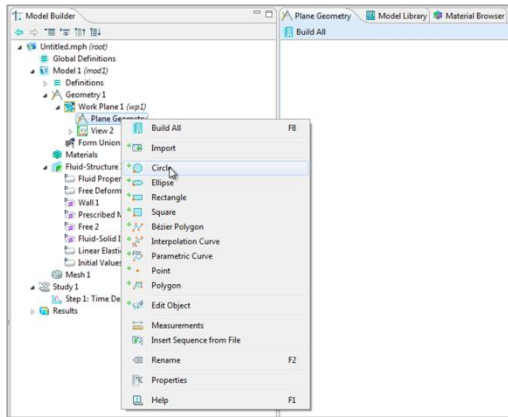


Construcción del modelo

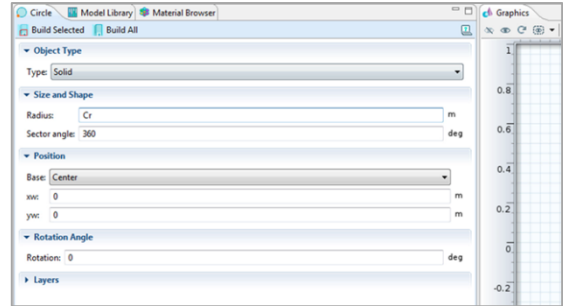
6) Selección del plano de trabajo
Geometry1>Work Plane



7) Construcción de círculo
Plane Geometry>Circle



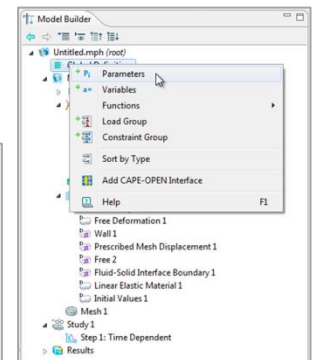
8) Definición de la geometría
Circle1



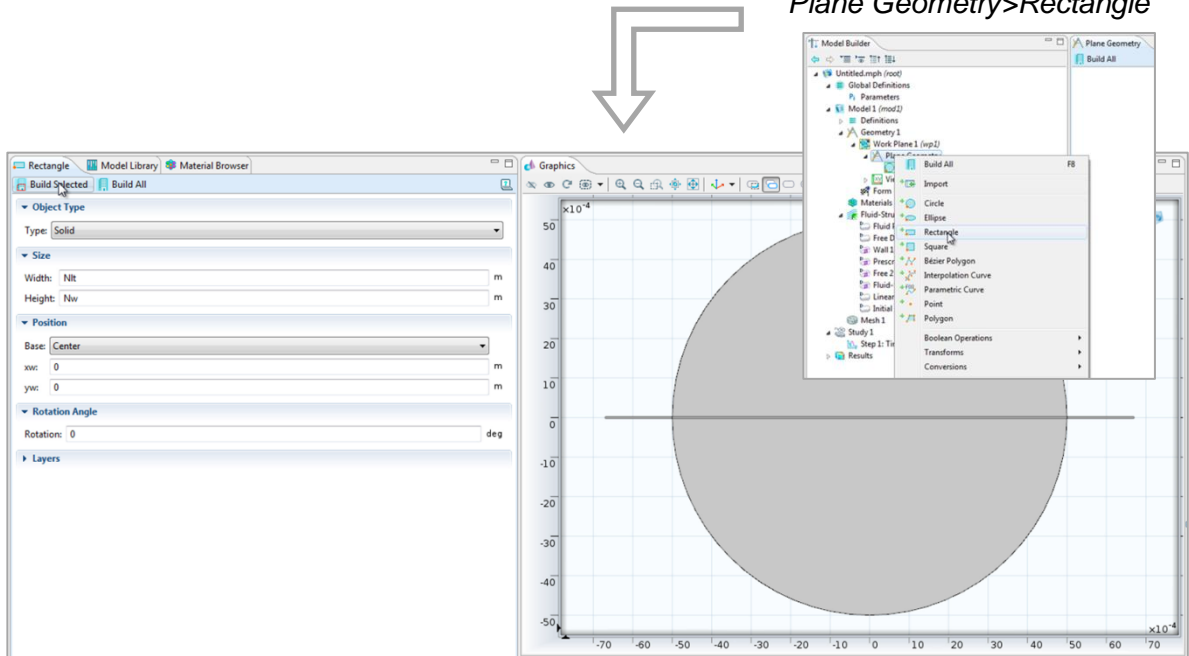
A fin de obtener un modelo fácil de modificar en cuanto a sus dimensiones y configuración geométrica. Se aconseja definir con anterioridad las diferentes cotas del modelo, así como el valor de constantes y parámetros a utilizar a lo largo de la simulación.

9) Definición de parámetros
Global Definitions>Parameters

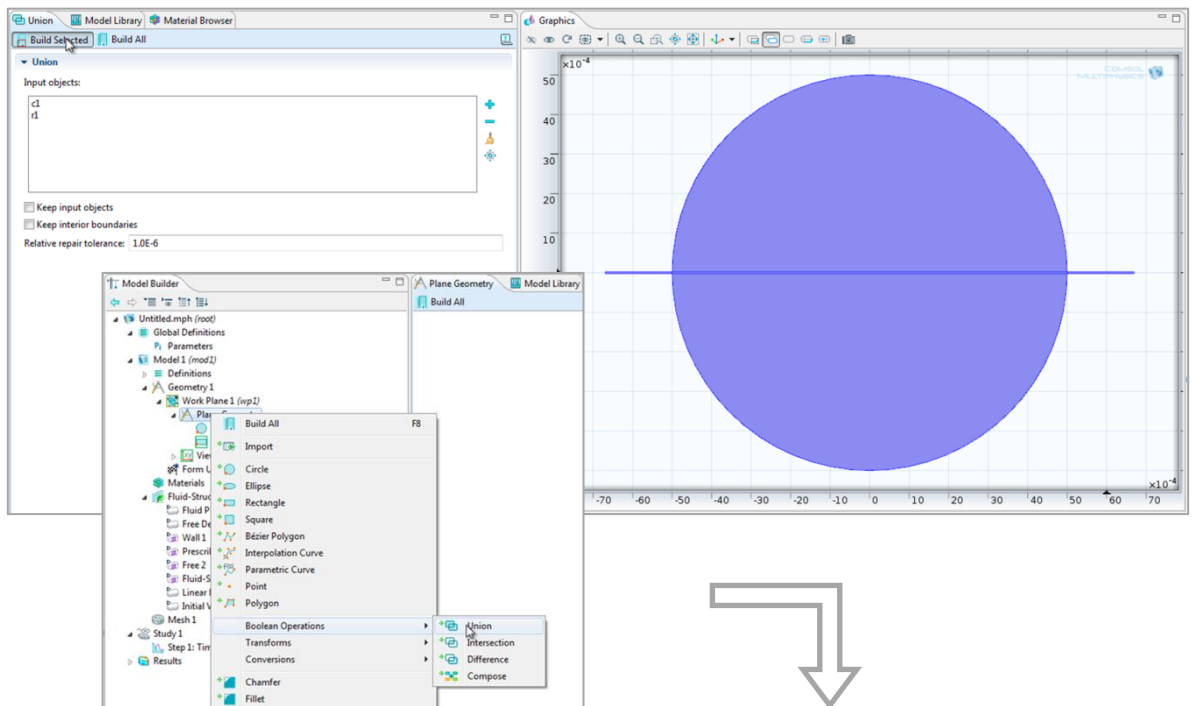
Name	Expression	Value	Description
Cr	5[mm]	0.0050000 m	Radio de cámara
Nlt	2*Cr+2*1.7E-3[m]	0.013400 m	Largo total de canales c...
Nw	50[um]	5.0000E-5 m	Ancho del canal conector
Ch	10[um]	1.0000E-5 m	Altura de cámara
Dh	20[um]	2.0000E-5 m	Espesor del diafragma
V	100[V]	100.00 V	Voltaje aplicado
gmin	20[um]	2.0000E-5 m	Espaciamiento mínimo
e0	8.85E-12[F/m]	8.8500E-12 F...	Permitividad del vacío
Lmax	$(e0*(V^2))/(2*(gmin^2))$	110.63 Pa	Presión máxima uniforme



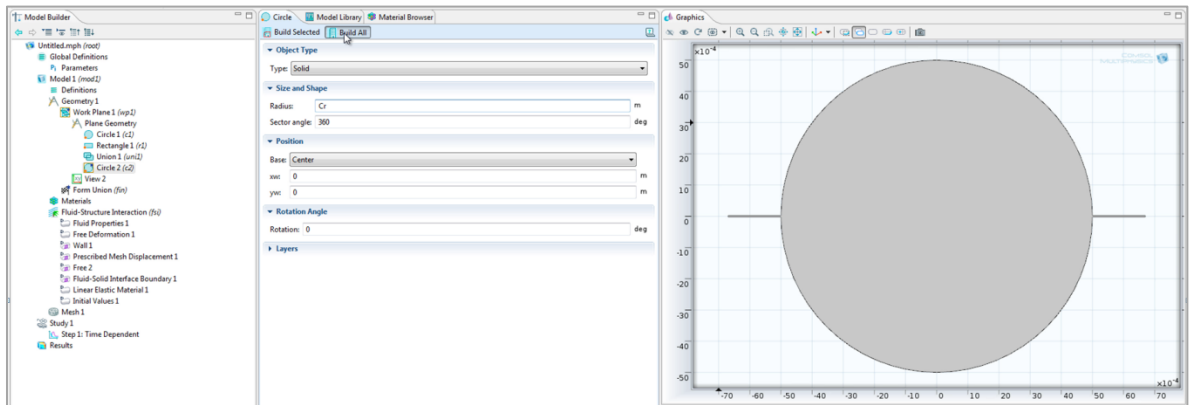
10) Construcción de rectángulo
Plane Geometry>Rectangle



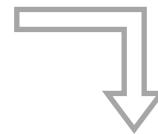
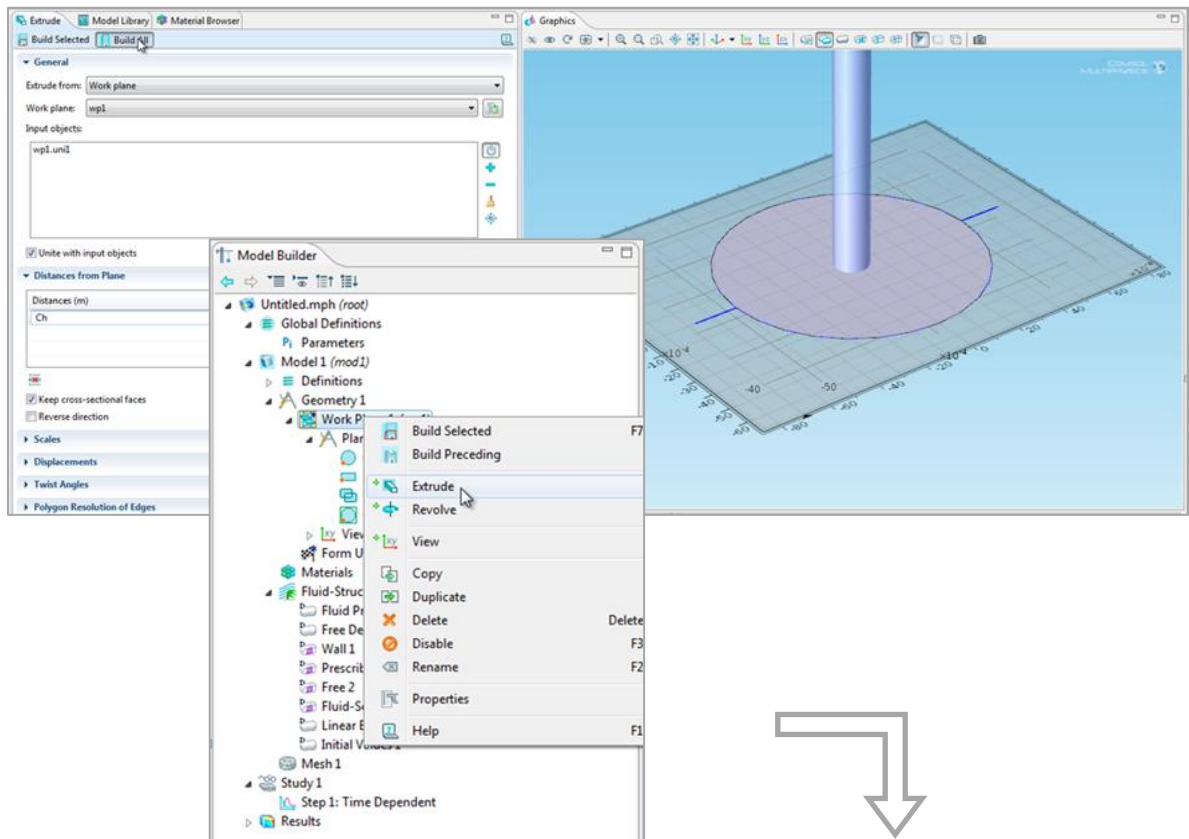
11) Unión de entidades
Plane Geometry>...>Union



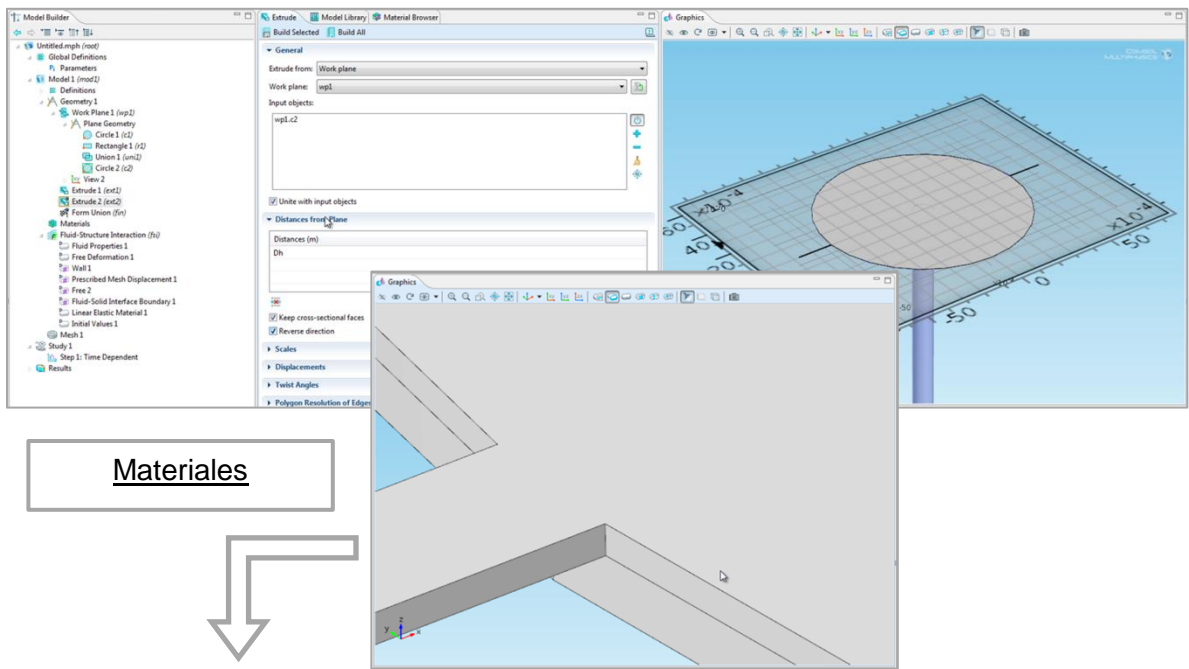
12) Construcción de círculo 2
Plane Geometry>Circle



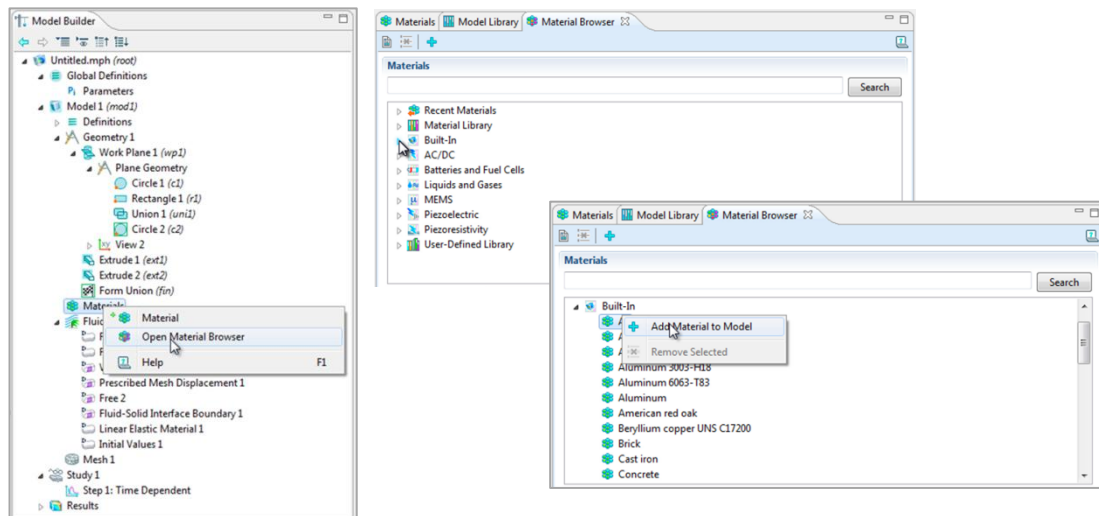
13) Extrusión de cámara de bombeo
Work Plane>Extrude



14) Extrusión de diafragma
Work Plane>Extrude

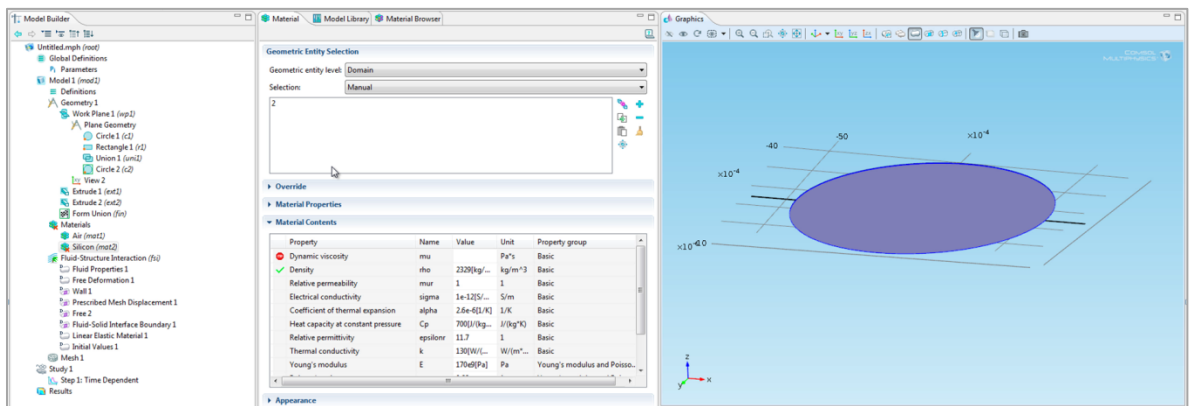
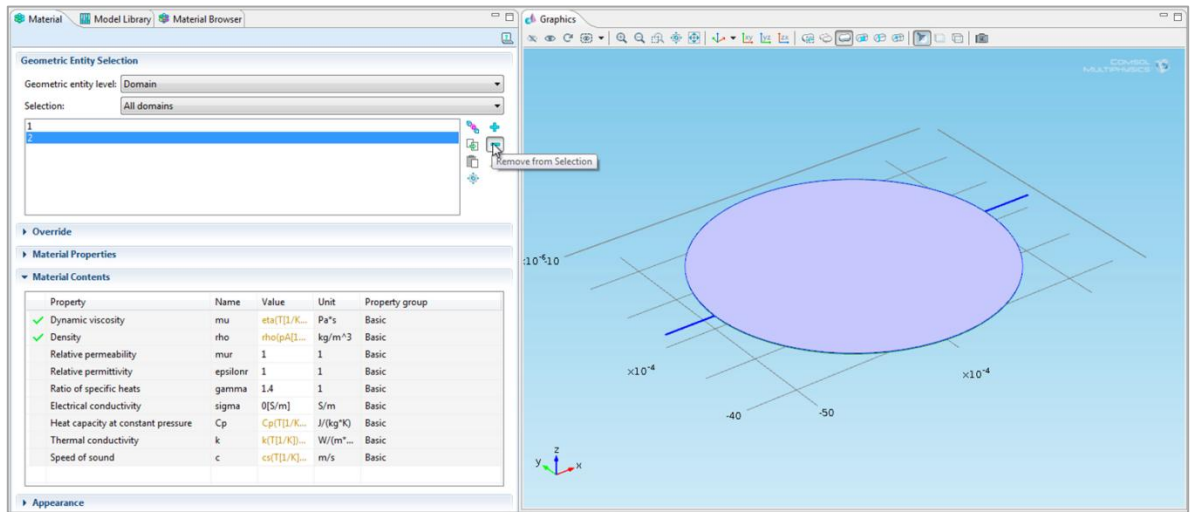


15) Selección de materiales
Materials>Open Material Browser



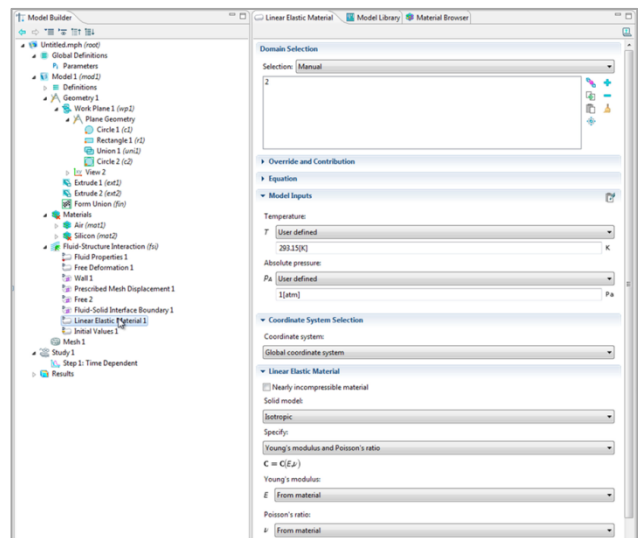
Al agregar *Air* como material constitutivo, este material será asignado a todos los dominios del modelo (Dominio 1=cámara de bombeo, Dominio 2=Diafragma). Debido a esto, es necesario remover el Dominio 2 de dicha selección, asignándole en su lugar el elemento *Silicon* como material constitutivo (elemento disponible en la librería *Built-In*)

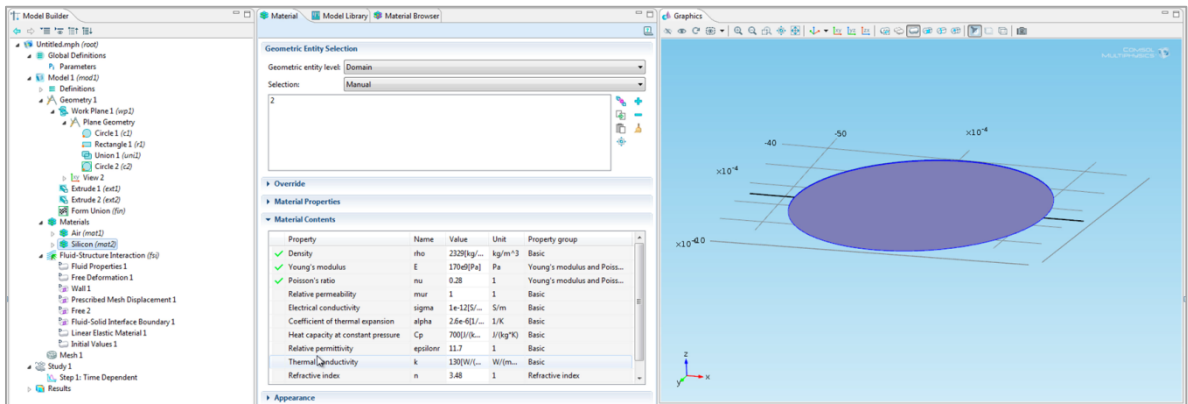
16) Selección de material Dominio 2 Materials>...>Silicon



El mensaje de advertencia en el material *Silicon* se debe a propiedades faltantes en la definición del material. Sin embargo, al establecer deformaciones elásticas lineales en el caso del diafragma, las propiedades principales para dicho caso de estudio (densidad, módulo de Young y radio de Poisson) se encuentran especificadas, por lo que el mensaje de error desaparece.

17) Deformaciones elásticas lineales Fluid-Structure Interaction>Linear Elastic Material 1

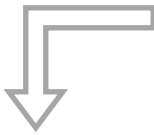




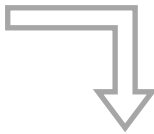
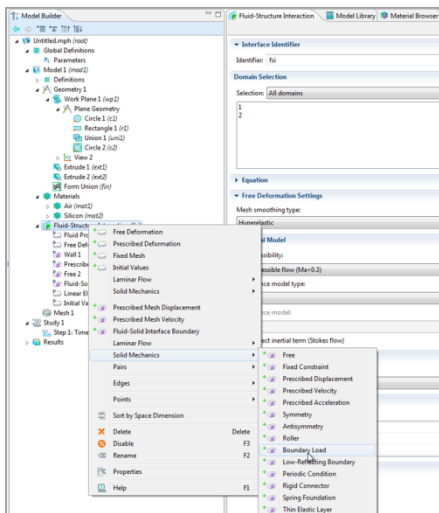
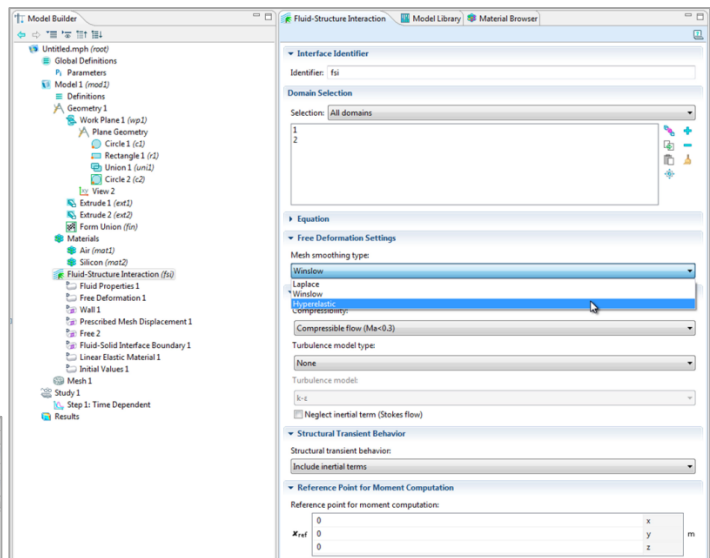
Interacción fluido-estructura

18) Tipo de suavizado de malla
Fluid-Structure Interaction > ... > *Hyperelastic*

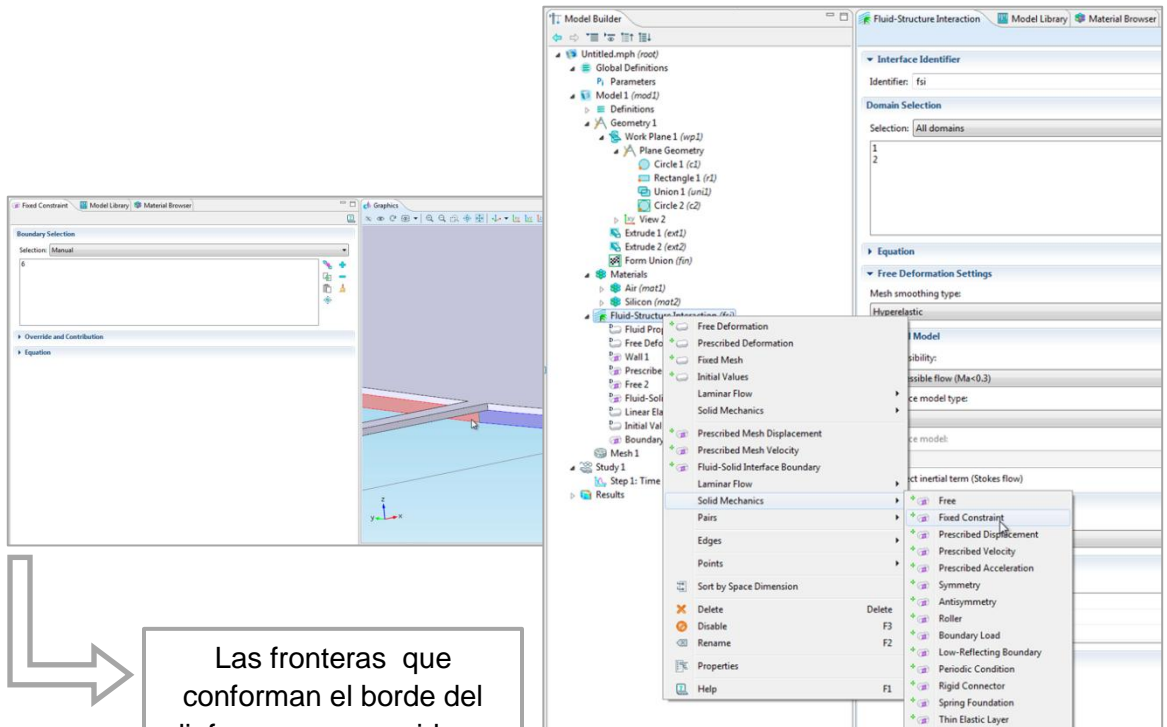
19) Compresibilidad
Fluid-Structure Interaction > ... > *Compressible flow (Ma<0.3)*



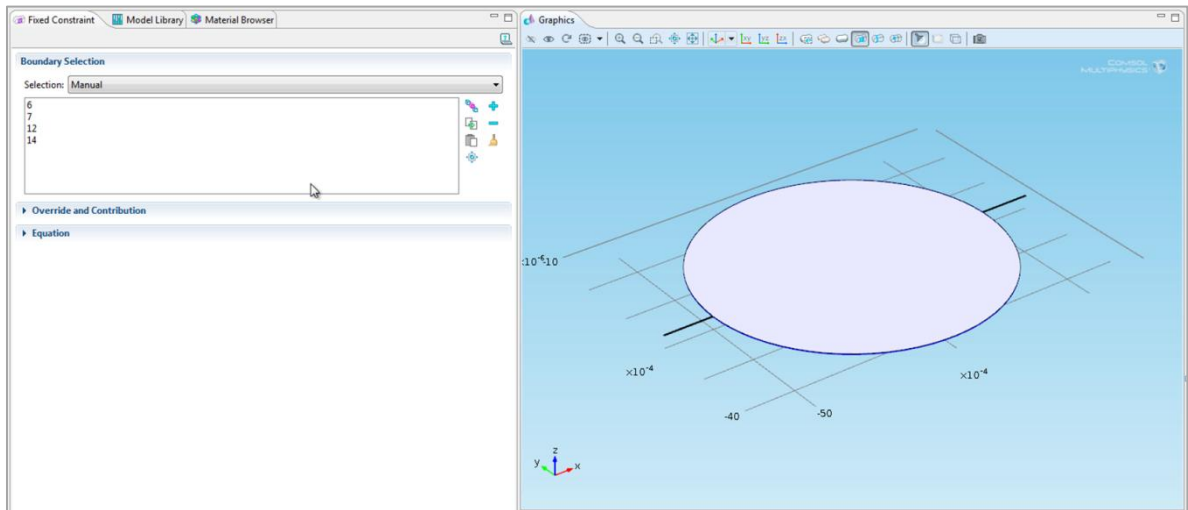
20) Inclusión de carga en la frontera
Fluid-Structure Interaction > ... > *Boundary Load*



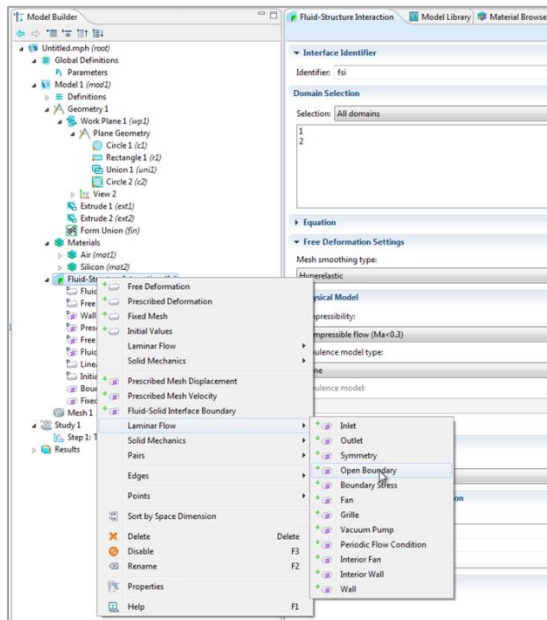
21) Especificación de puntos de anclaje
Fluid-Structure Interaction > ... > *Fixed Constraint*



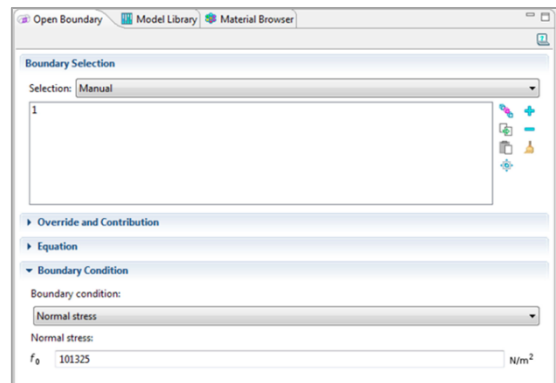
Las fronteras que conforman el borde del diafragma, se consideran restricciones para el movimiento reciprocante



22) Inclusión de frontera abierta
Fluid-Structure Interaction>...>Open Boundary



23) Especificación del valor de presión
Open Boundary>...>Normal stress : 101325



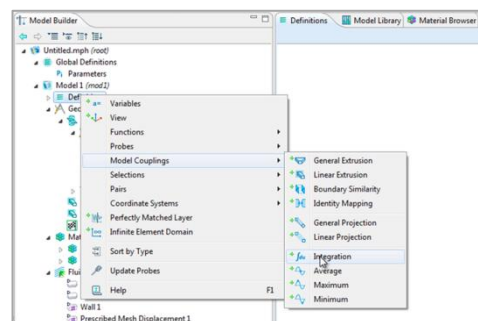
Ciertos valores de interés en el estudio, requieren el manejo de variables anteriormente no definidas. Tal es el caso del valor de volumen bombeado dado por:

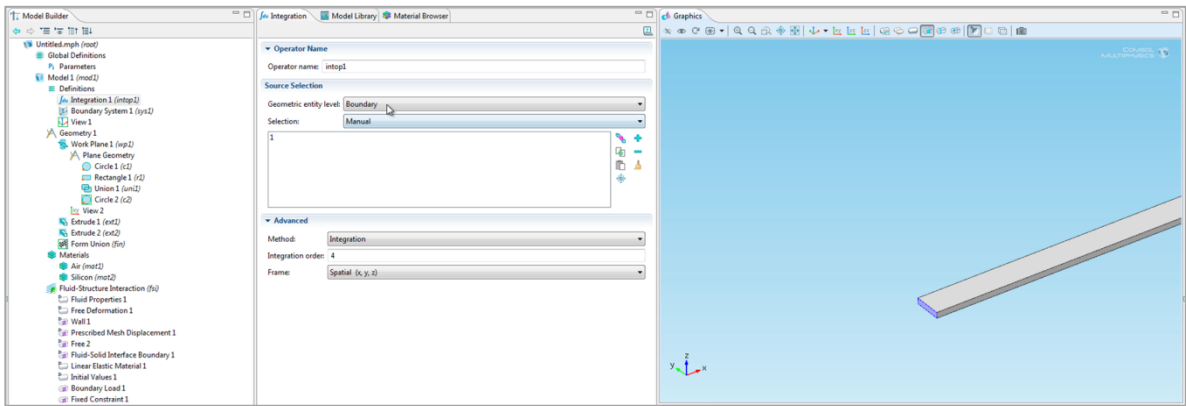
$$V_p(t) = \int_0^t \dot{V}_{out} dt$$

donde se requiere definir el valor de \dot{V}_{out} en cada instante de tiempo. En el presente ejemplo se realizará la integración numérica de dicha expresión, empleando para ello el valor de \dot{V}_{in} en remplazo de \dot{V}_{out} y considerando al valor de volumen absorbido en el proceso de succión como el volumen total bombeado luego del cierre de la válvula de admisión y apertura de la válvula de descarga.

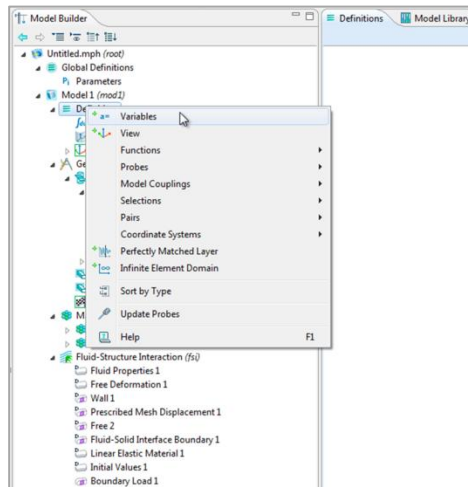
24) Definición de frontera de integración
Definitions>...>Integration

Cálculo de volumen bombeado

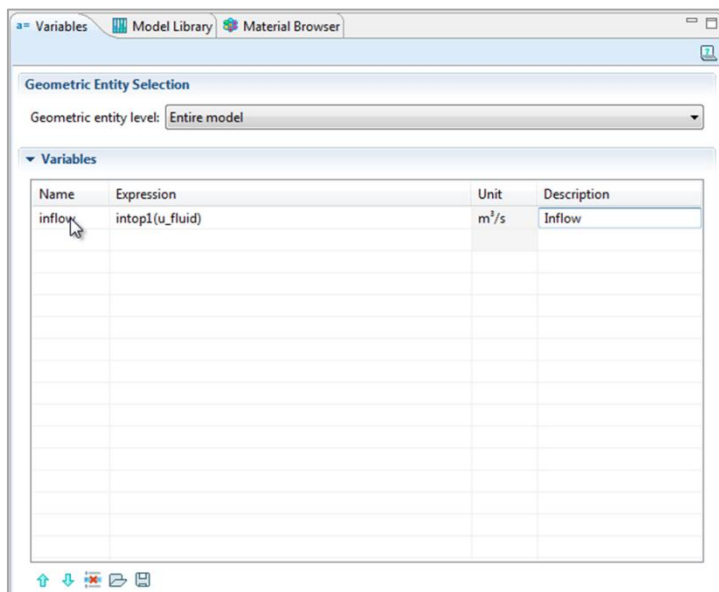




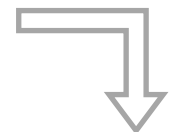
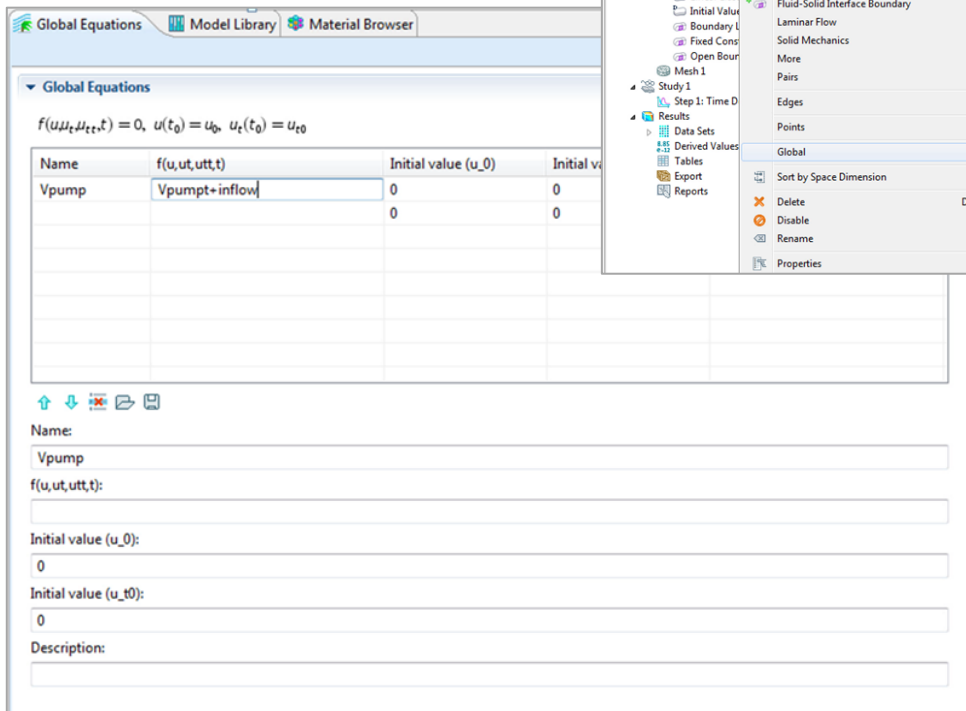
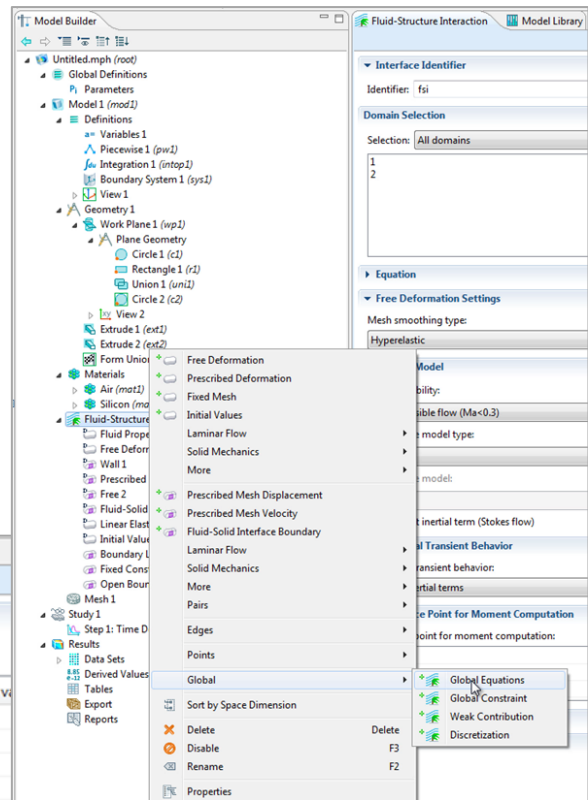
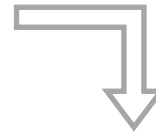
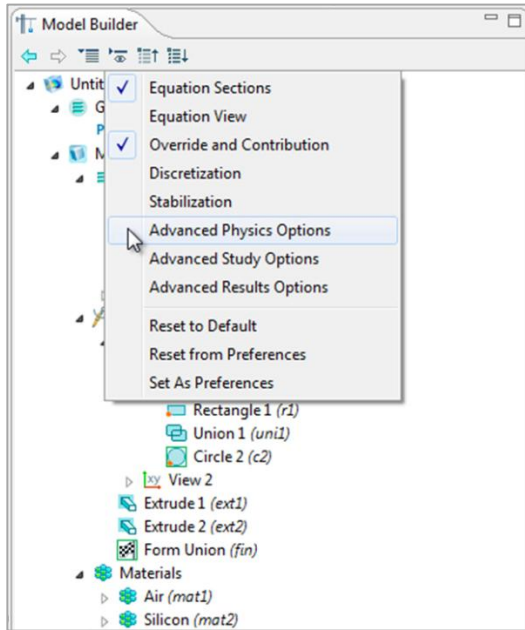
25) Definición de variable que hará uso de la frontera de integración
Definitions > Variables



Se define el caudal de entrada como la integral de superficie de la velocidad del flujo en la dirección del eje x "u"

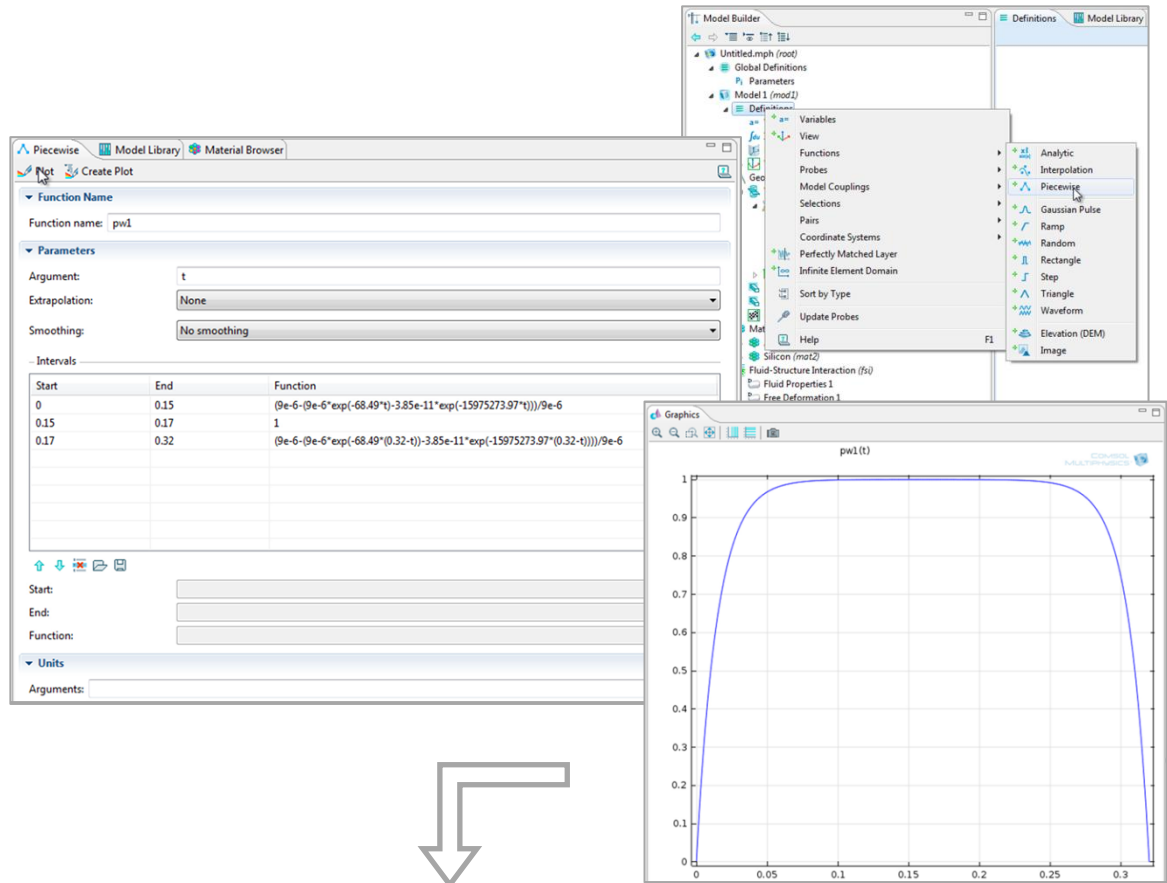


26) Definición de variable Vpump
Advanced Physics Options (ON)

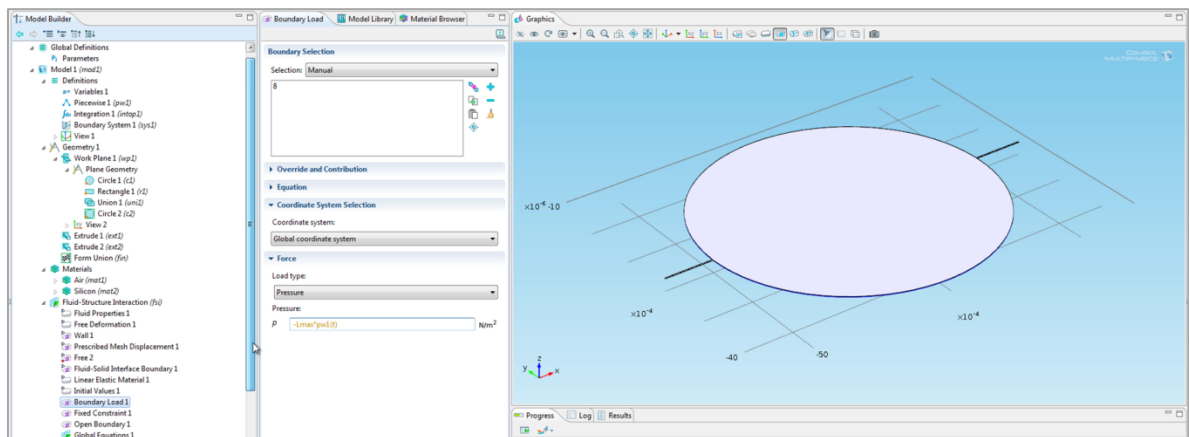


Construcción del perfil de carga

27) Construcción de función a trozos Definitions>...>Piecewise

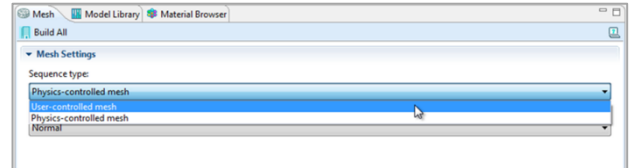


28) Especificación del valor de presión en la frontera de carga Fluid-Structure Interaction>...>Pressure : -Lmax*pw1(t) Pa

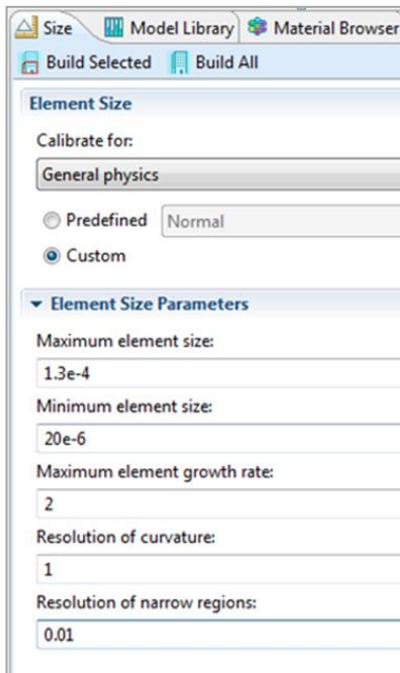


Generación de la malla

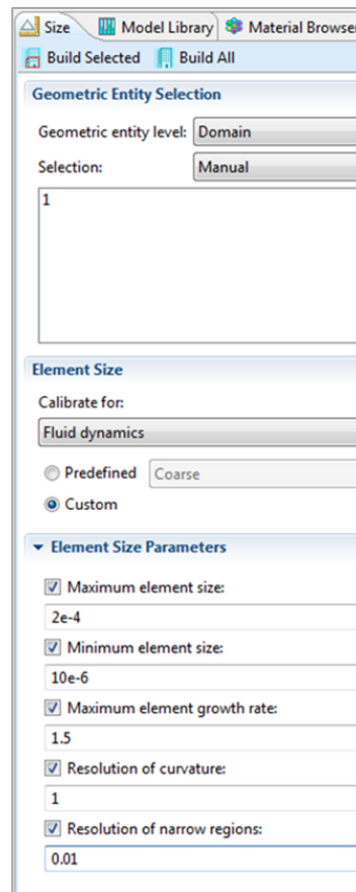
29) Configuración manual del mallado
Mesh 1>User-controlled mesh



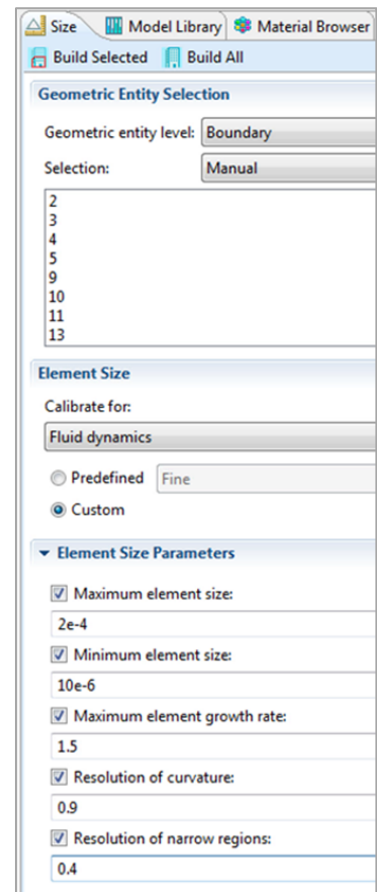
30) Configuración de tamaño 1
Mesh 1>Size



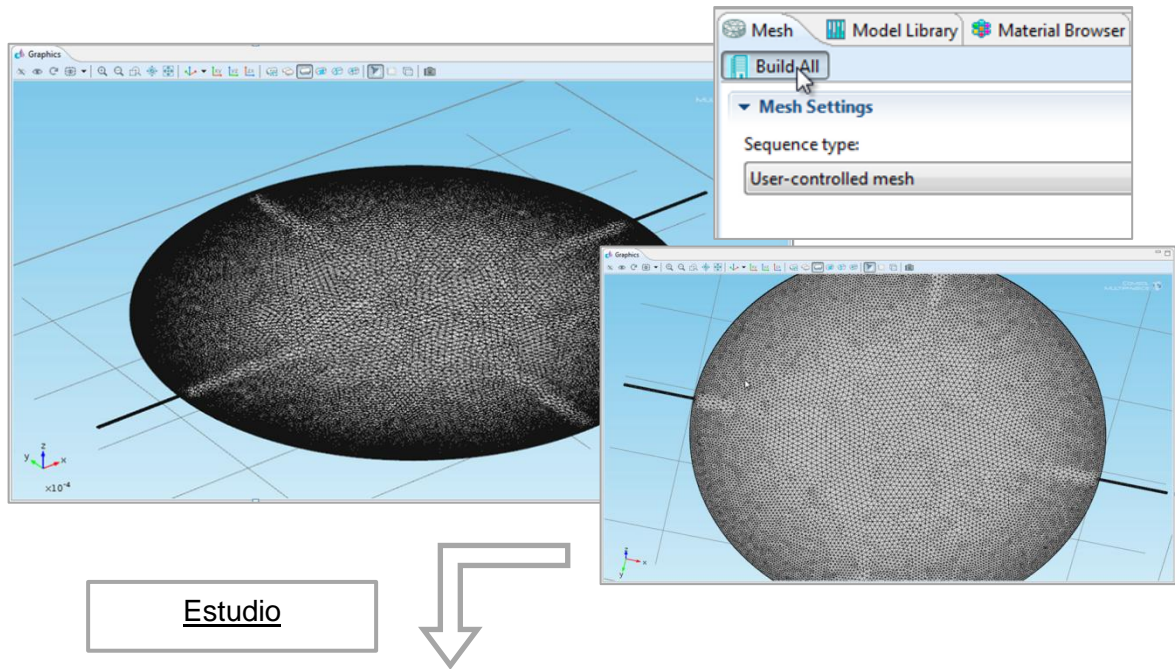
31) Configuración de tamaño 2
Mesh 1>Size 1



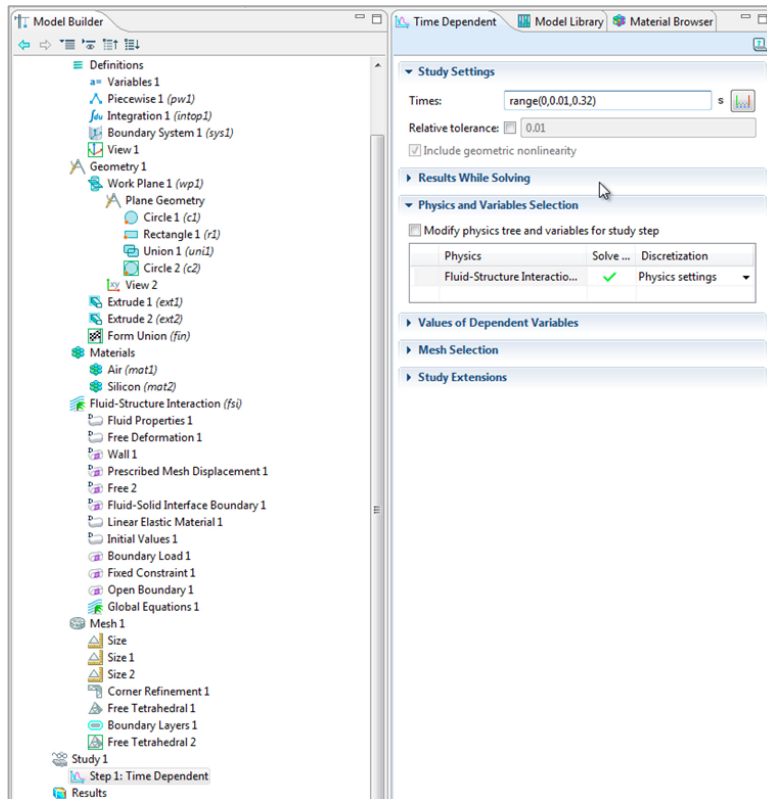
32) Configuración de tamaño 3
Mesh 1>Size 2



33) Construcción de malla

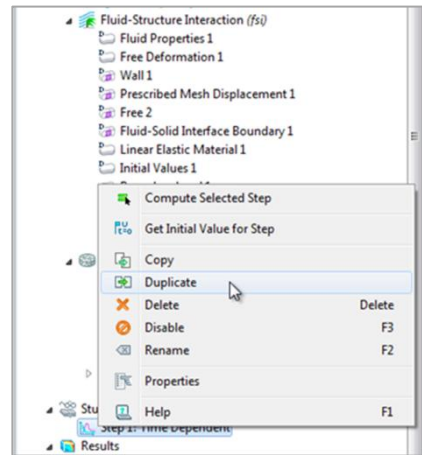


34) Rango de tiempo Times : range(0,0.01,0.32)

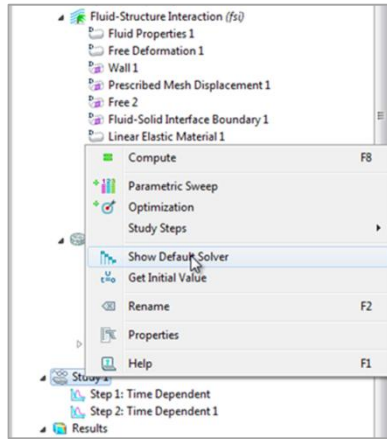


El estudio se dividirá en dos etapas. La primera con el fin de resolver las ecuaciones asociadas al desplazamiento del diafragma, mientras la segunda, hará uso de los resultados obtenidos en la primera etapa al evaluar el comportamiento del flujo

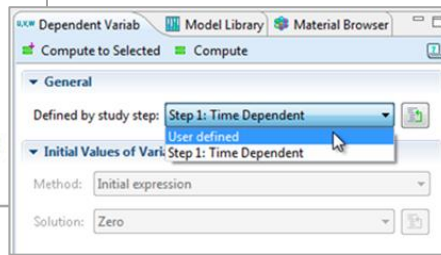
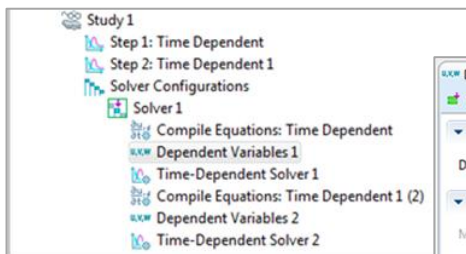
35) División por etapas
 Step 1: Time Dependent > Duplicate



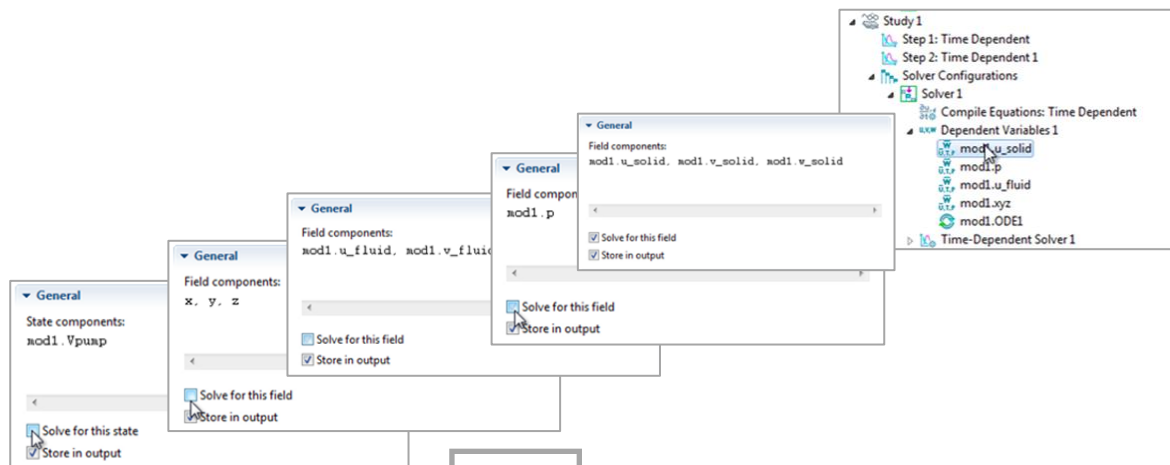
36) Activar opciones
 Study 1 > Show Default Solver



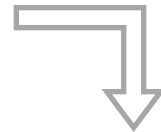
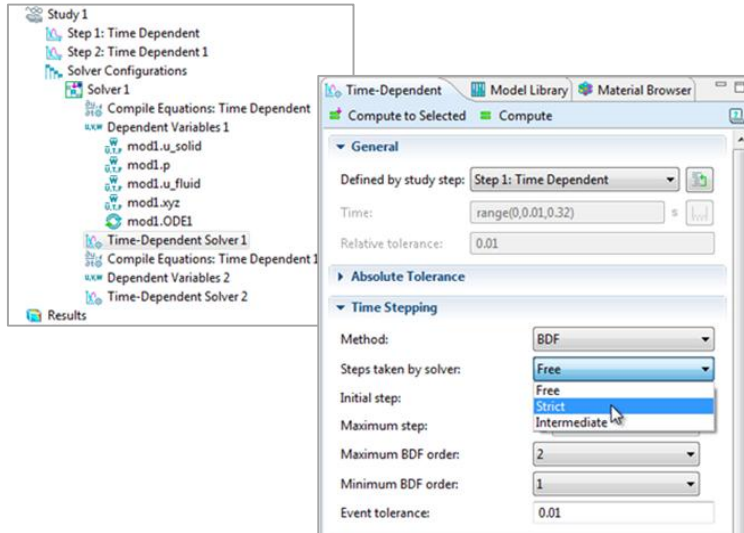
37) Estudio definido por el usuario



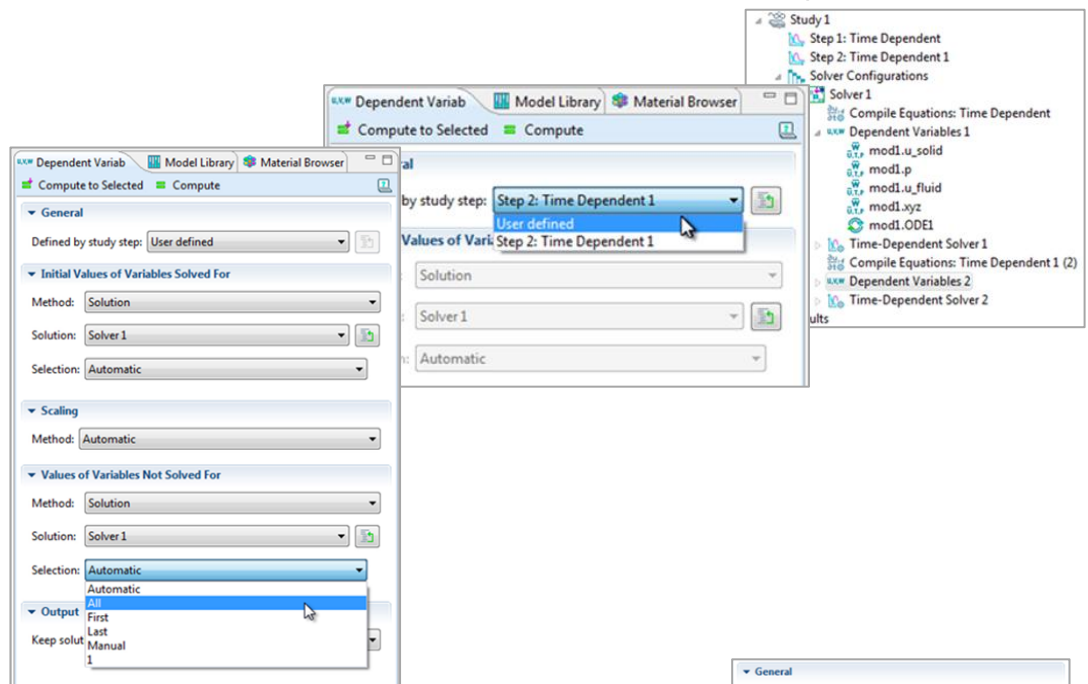
38) Configuración de variables para la etapa 1



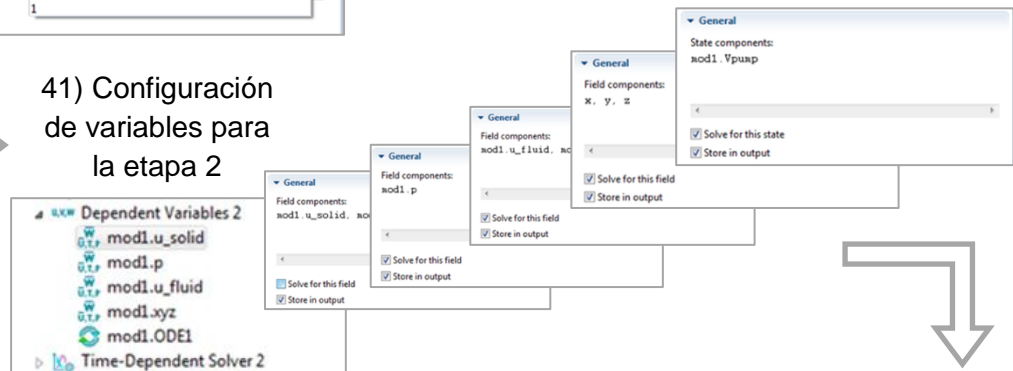
39) Configuración del paso temporal
Time Dependent Solver 1 > ... > Strict



40) Estudio definido por el usuario 2

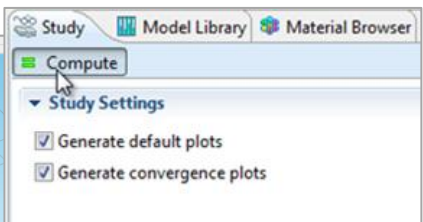


41) Configuración de variables para la etapa 2

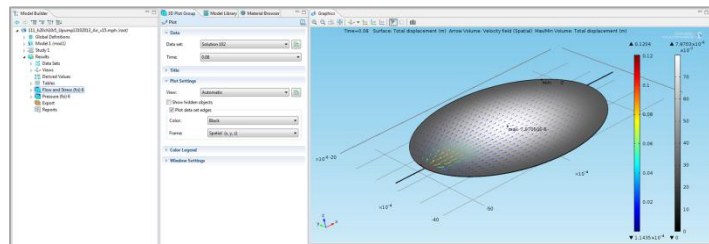


42) Compute Study 1>Compute

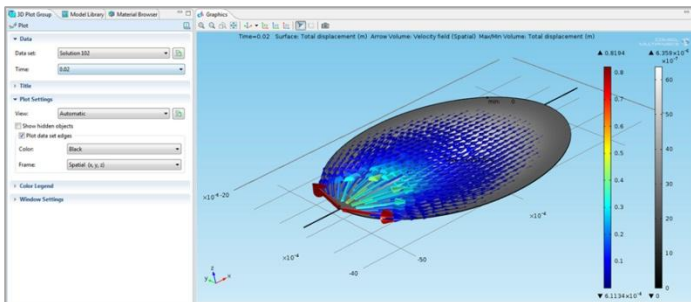
Fin del cómputo.
Tiempo aproximado: 2 horas
Equipo
Procesador: Intel Core i5
2400 CPU @ 3.10 GHz
RAM: 6 Gb



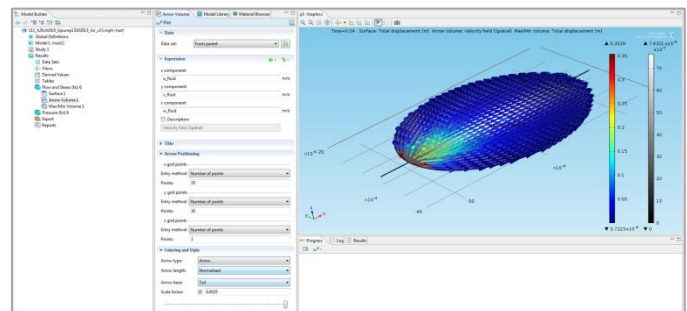
The screenshot shows the 'Compute' button highlighted in the software's top menu bar. Below it, the 'Study Settings' panel is visible, with two checkboxes checked: 'Generate default plots' and 'Generate convergence plots'. The background shows a 3D model of a wing-like object.



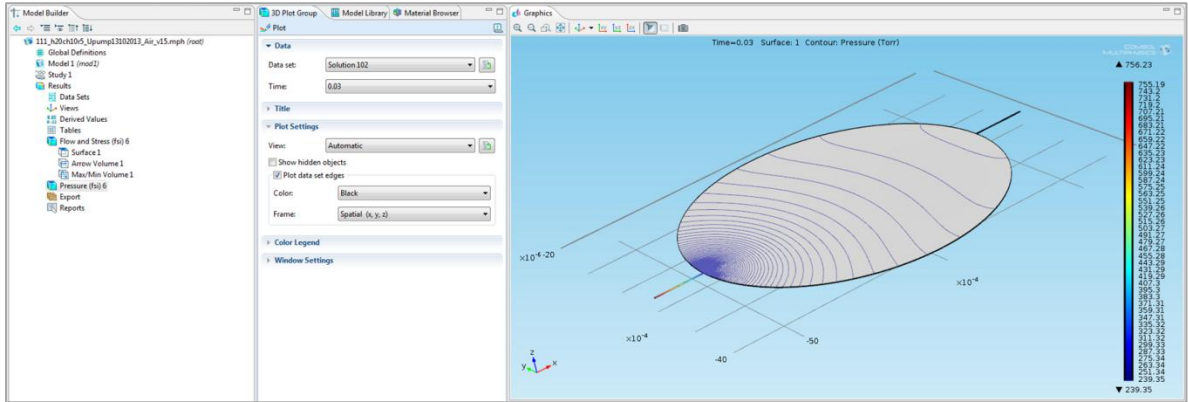
Visualización del
flujo en distintos
instantes de
tiempo



Cambios de
color y estilo



Visualización de perfiles de presión en distintos instantes de tiempo

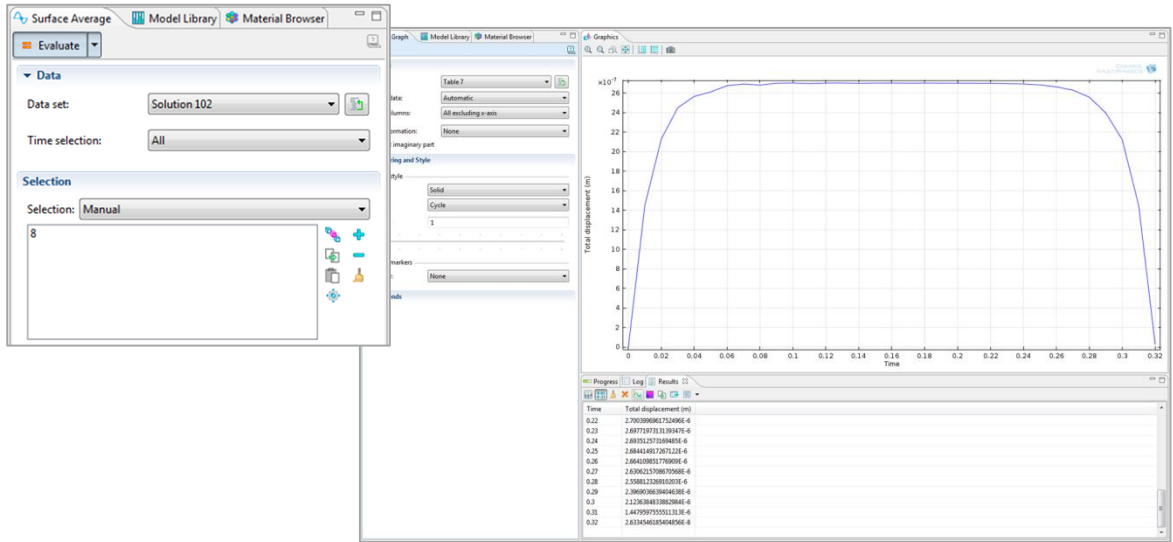


Post-procesamiento

43) Deflexión promedio del diafragma
Derived Values>...>*Surface Average*

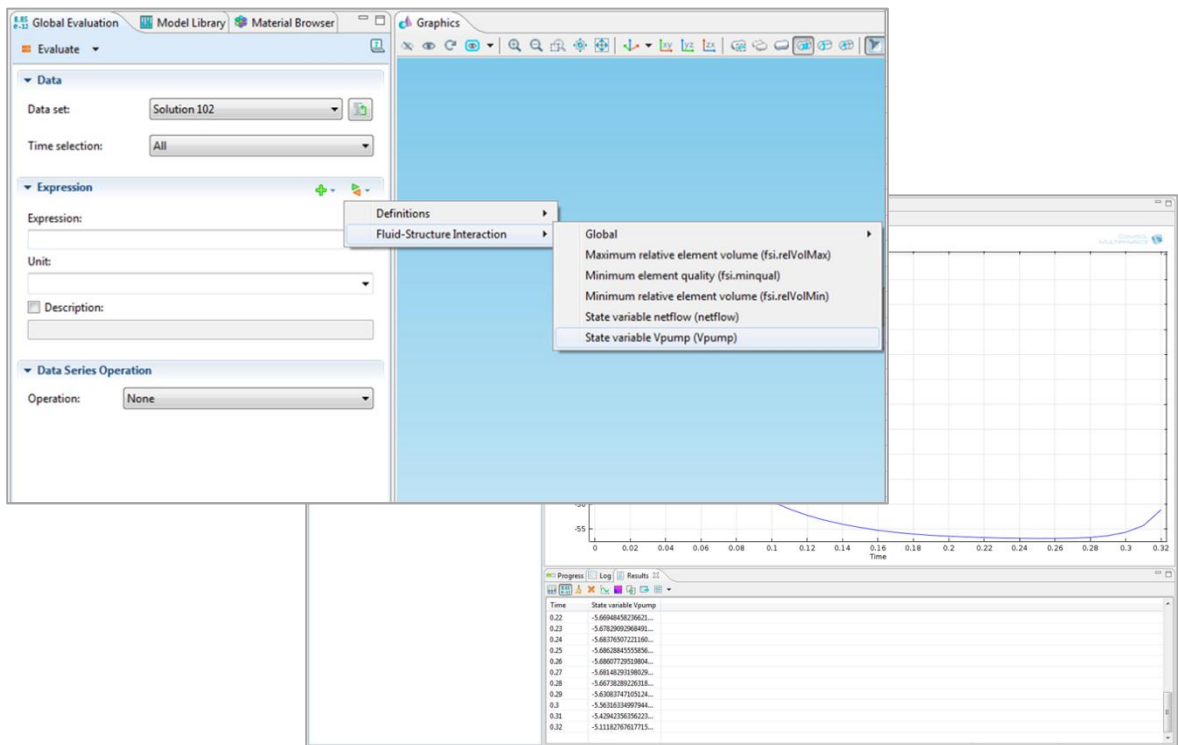
44) Selección de la variable de interés
Surface Average>...>*Total displacement*

45) Evaluación y graficación de resultados

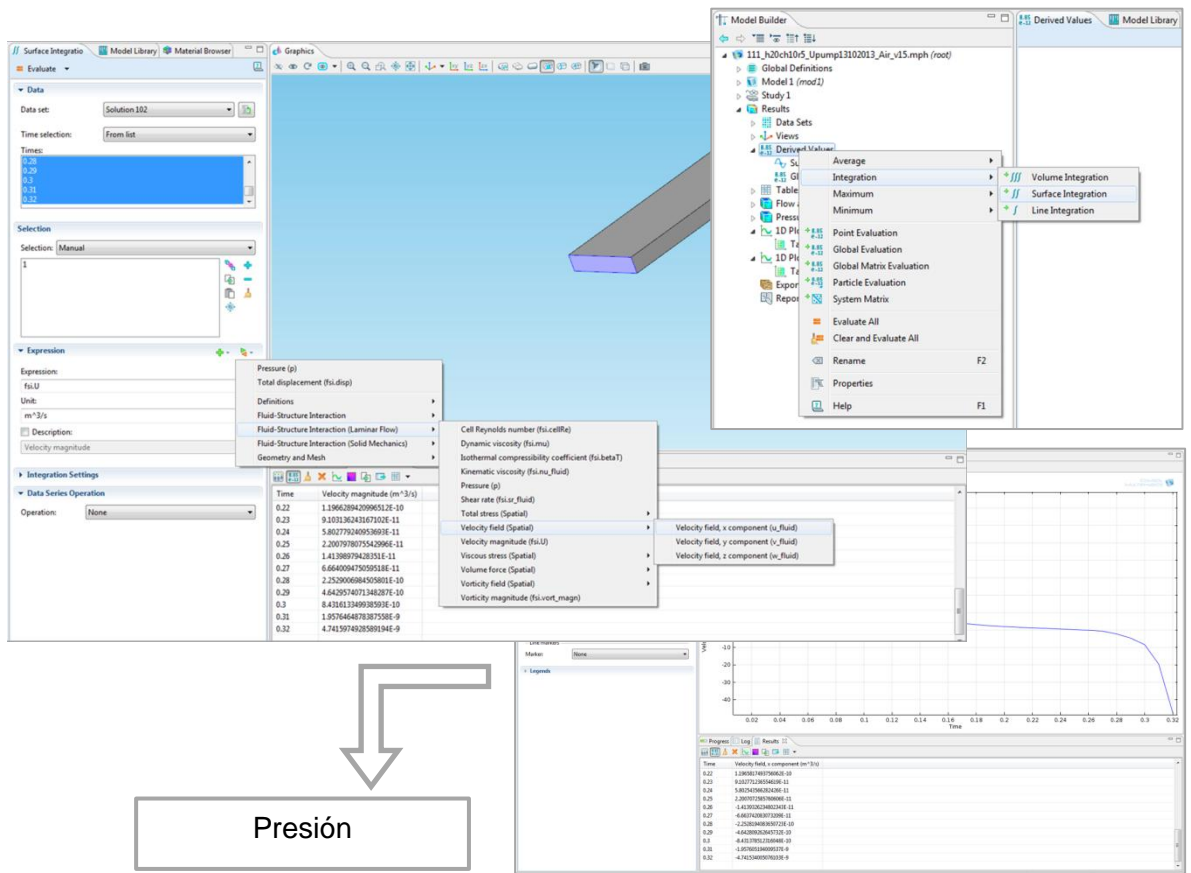


De manera similar al procedimiento mostrado en los pasos 43, 44 y 45. Es posible obtener las gráficas de volumen bombeado, caudal y presión.

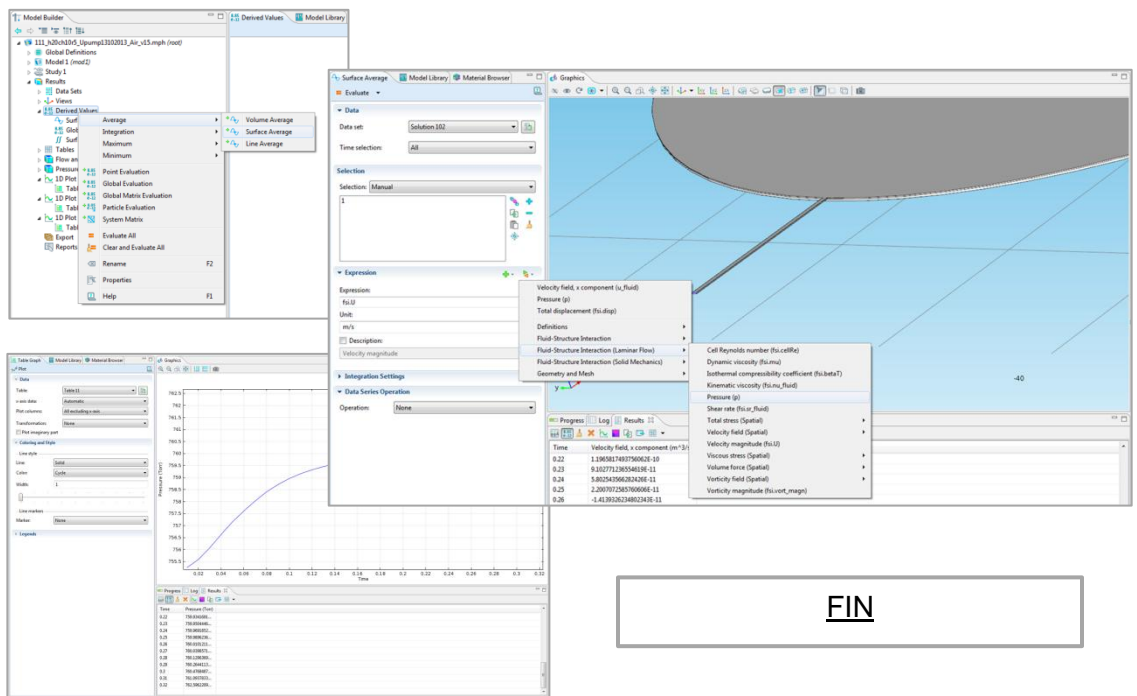
Volumen bombeado



Caudal



Presión



FIN