

# SIMULACIÓN DE INTERACCIÓN FLUIDO-ESTRUCTURA EN MICROBOMBA DE VACÍO

M. Pedroza Torres<sup>1</sup>, Magister en Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander.  
C. Borrás Pinilla<sup>2</sup>, Doctor Of Philosophy In Mechanical Engineering, Universidad Industrial de Santander  
Recibido marzo 1 de 2014 – Aceptado abril 30 de 2014

<http://dx.doi.org/10.18566/puente.v8n1.a03>

**Resumen** — En el presente artículo, el fenómeno de interacción fluido-estructura fue simulado gracias a la herramienta computacional COMSOL® Multiphysics, empleando como caso de estudio el movimiento recíprocante propio del diafragma integrado a una microbomba de vacío, al modelar este elemento como una estructura deformable, capaz de deflectarse bajo una carga aplicada, y cuya interacción con el fluido implica un cambio de trayectoria en el flujo. 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.

**Palabras claves** — COMSOL®, Interacción fluido-estructura, Microbomba de vacío

**Abstract** — In this article, the fluid-structure interaction phenomena was simulated by the computational tool COMSOL® Multiphysics, using as case of study the reciprocating motion from the integrated diaphragm of a vacuum micropump, modeling this element as a deformable structure, able to deflect itself under an applied load, and whose interaction with the fluid involves a change in the flow path. Detailing for this study the process of mechanical analysis and numerical simulation. Analyzing the performance of the micropump model relative to other prototypes offered by the current state of the art.

**Key words** — COMSOL®, Fluid-Structure Interaction, Vacuum Micropump

## I. INTRODUCCIÓN

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

Este trabajo es postulado dentro del marco del Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Agricultura - CIIMCA 2013 - .

<sup>1</sup> M. Pedroza Torres, Magister en Ingeniería Mecánica, Escuela de Ingeniería Mecánica. ptorres.pro@gmail.com

<sup>2</sup> C. Borrás, Ph.D. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. cborras@ou.edu.

los objetivos de dichas áreas de investigación [1], y debido a que la actual industria no ofrece dispositivos de bombeo a pequeña escala capaces de asegurar las apropiadas condiciones de vacío y suministro de muestras que aplicaciones tecnológicas de este tipo requieren, la microbomba de vacío se convierte en un dispositivo crítico y fuente paralela de diversos temas de investigación.

Con base a esto, el presente estudio, realizado en una microbomba de desplazamiento, busca emular el ciclo de bombeo de una microbomba de vacío, por lo que software basado en la teoría de elementos finitos (COMSOL® Multiphysics) ha sido empleado en el proceso de simulación, debido a que la complejidad de las condiciones de frontera en las ecuaciones diferenciales parciales provenientes de diferentes dominios físicos (interacción diafragma-flujo) dificulta la obtención de soluciones analíticas [2], 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.

## II. MARCO TEÓRICO

### A. Microbombas de vacío

La literatura actual cuenta con completas recopilaciones sobre tecnologías de microbombeo [3, 4, 5, 6, 7], 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 numerosos diseños especializados en el bombeo de gases [8]. 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 [9, 10, 11]. 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 [12] 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 [13].

Pese al importante número de investigaciones 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 térmico-molecular, microbomba de difusión [14], bomba por bombardeo iónico y microbomba de diafragma [15], siendo esta última una de las más promisorias en cuanto a su capacidad de generación de vacío desde condiciones de 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.

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 [1]; el diseño fue conceptualmente similar a la microbomba reportada por Li et al. [16], luego de varias modificaciones al diseño en lo que se refiere a geometría y métodos de actuación, una imagen de la bomba se presenta en la Fig. 1. Esta bomba de una etapa incluye tres puertos de actuación neumáticos para dos válvulas de sellado y un pistón de bombeo. Siendo sus dimensiones externas: 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.



Fig.1. Microbomba de vacío.

En el año 2011 H. Zhou [17] continuando con esta línea de desarrollo y apeándose a muchos de los lineamientos establecidos por V. Sharma, llevo a cabo una reestructuración completa del dispositivo de microbombeo, 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.

#### B. Software de simulación COMSOL® Multiphysics

El estudio de una microbomba de desplazamiento implica el acoplamiento de ecuaciones diferenciales parciales provenientes de diferentes dominios físicos como la mecánica de sólidos y fluidos. La solución analítica de dichas ecuaciones se dificulta debido a la complejidad de sus condiciones de frontera [2], por lo que métodos numéricos de solución basados en la teoría de elementos finitos son empleados en la solución del problema. En la presente investigación se empleó el software de simulación COMSOL® Multiphysics. Algunas ventajas de su implementación como herramienta de análisis son:

- Software más reciente que ANSYS, NASTRAN, ABAQUS, entre otros (actualizaciones constantes, amplio soporte en línea).

- 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 metodología para el análisis mediante elementos finitos, sus diferentes etapas pueden listarse de la siguiente manera [18]:

- 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, cuadriláteros, 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.

### C. 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 radica en que la velocidad de la malla tiene que ser especificada cuidadosamente para el problema considerado [19]. La Fig. 2. muestra un ejemplo de movimiento de malla y partículas bajo los diferentes enfoques.

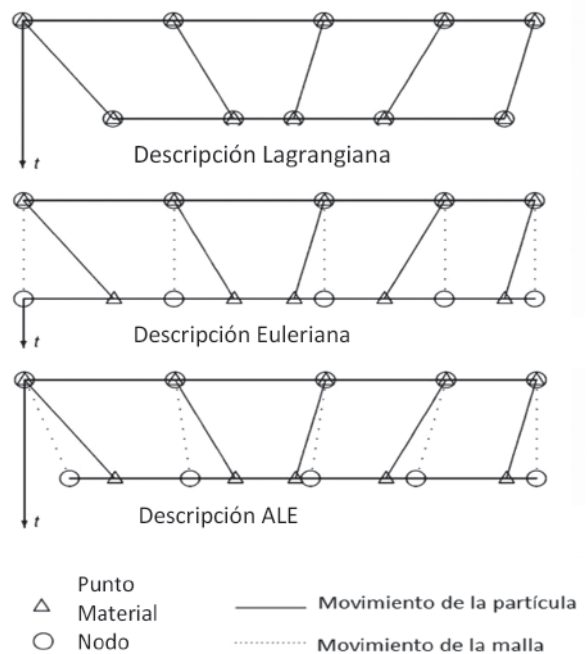


Fig.2. Ejemplo unidimensional de movimiento de malla y partículas.

Dos dominios son comúnmente empleados en la mecánica del medio continuo: el dominio material  $R_x \subset R^n$ , donde  $n$  representa las dimensiones espaciales, formadas por partículas materiales  $X$ , y el dominio espacial  $R_x$ , constituido por puntos espaciales  $\chi$ . 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  $\chi_0$ , 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:

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

Donde  $\rho$  es la densidad,  $v$  es el vector de velocidad material,  $\sigma$  denota el tensor de esfuerzo de Cauchy,  $b$  es el vector fuerza específica de cuerpo,  $E$  es la

energía específica total, y  $\frac{d}{dt}\bigg|_x$  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:

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

Donde  $\frac{d}{dt}\bigg|_x$  representa la derivada temporal en el dominio de referencia  $R_x$  [20].

### III. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

#### A. Simulación multifísica

Los parámetros estructurales del modelo se listan en la TABLA I.

TABLA I.  
PARÁMETROS ESTRUCTURALES

Notación	Descripción	Valor
$h$	Espesor del diafragma	20 [ $\mu\text{m}$ ]
$C_d$	Diámetro de cámara	10 [mm]
$C_h$	Altura de cámara	10 [ $\mu\text{m}$ ]
$M_t$	Material del diafragma	Silicón
$\rho$	Densidad (Silicón)	2329 [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ]
$E$	Módulo de Young (Silicón)	170 [GPa]
$\nu$	Coefficiente de Poisson (Silicón)	0,28
$N_w$	Ancho del canal conector	50 [ $\mu\text{m}$ ]
$N_h$	Alto del canal conector	10 [ $\mu\text{m}$ ]
$N_l$	Largo del canal conector	1.7 [mm]
$S_o$	Espaciamiento entre electrodos	30 [ $\mu\text{m}$ ]

El modelo de microbomba de diafragma y sus parámetros de simulación se presentan en la Fig. 3.

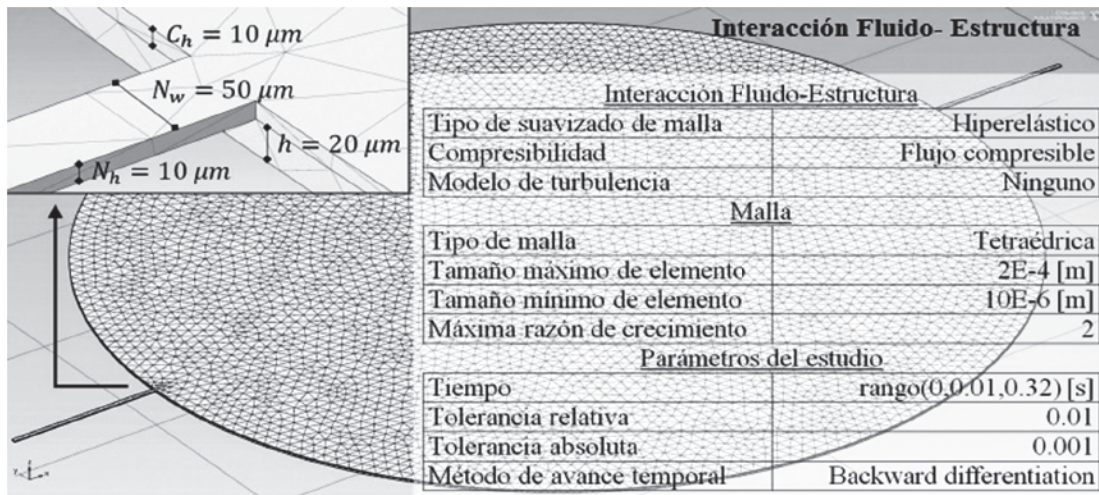


Fig. 3. Modelo de microbomba para simulación.

B. Análisis mecánico

En el presente estudio se considera la implementación de un actuador electrostático de placas planas paralelas, como fuente del movimiento recíprocante del diafragma, cuya estructura mecánica puede esquematizarse de acuerdo a la Fig. 4.

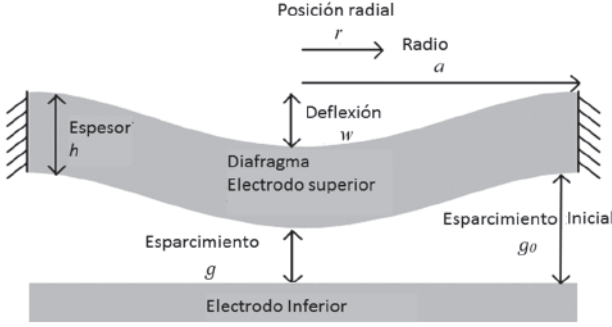


Fig.4. Esquema de deflexión de placa circular.

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 (espaciamento  $g=0$ ), 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:

$$F_e = \frac{\epsilon A V_{elec}^2}{2g^2} \quad (3)$$

Donde  $\epsilon$  denota el valor de permitividad del medio [ $\epsilon_0 = 8.85E - 12 [F/m]$  permitividad del vacío],  $A$  corresponde al área del electrodo (electrodo de placas planas paralelas), y  $g$  representa el espaciamiento entre electrodos (con la condición para deflexiones estables del diafragma [21]). Se despreció la no-uniformidad de la fuerza electrostática debida 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). 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 [22]:

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

Siendo  $\alpha$  el radio de la placa,  $P_u$  el valor de presión aplicado y  $D$  el factor de rigidez a la flexión de la placa definido como:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (5)$$

Donde  $E$  corresponde al módulo de Young,  $h$  es el espesor de la placa y  $\nu$  es el coeficiente de Poisson. De similar manera, es posible demostrar que a lo largo del diafragma, un valor promedio de deflexión puede ser obtenido mediante (6).

$$w_{prom} = \frac{\int_0^a 2\pi r w(r) dr}{\pi a^2} = \frac{P_u a^4}{192D} \quad (6)$$

La selección de parámetros operativos de la microbomba, se ha realizado con base en los datos experimentales y de simulación presentados en la disertación doctoral de Hui Zhou del año 2011, titulada: “A study of micromachined displacement pumps for vacuum generation” del Instituto Tecnológico de Massachusetts [17]. Implementándose el perfil de actuación presentado en la Fig. 5., correspondiente al comportamiento temporal de una cámara de bombeo con diafragma actuado neumáticamente, a fin de emular el fenómeno de bombeo en la etapa de simulación multifísica.

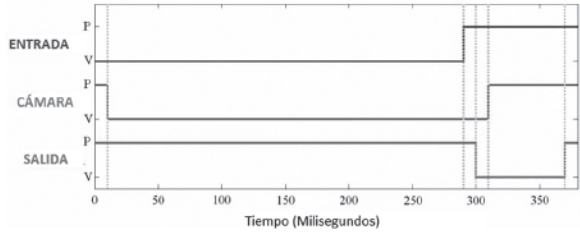


Fig.5. Perfil de actuación.

Con el fin de ajustar el perfil de actuación elegido, a la geometría específica del modelo de microbomba propuesto, se hace necesario determinar la respuesta en el tiempo de la cámara de bombeo. A continuación se presenta la metodología de análisis aplicada:

- 1) Cálculo de la masa del diafragma ( $\alpha = 5$  mm, radio del diafragma

$$m_d = \rho \cdot V = \rho \cdot \pi \cdot a^2 \cdot h = 3.65E - 6 [Kg]$$

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

$$k_l = \frac{192\pi E h^3}{12a^2(1 - \nu^2)} = 2967.05 [N/m]$$

- 3) Cálculo de la frecuencia natural no amortiguada  $\omega_0$ :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_l}{m_d}} = 28511.23 [rad/s]$$

- 4) Cálculo del coeficiente de amortiguamiento para una película de aire entre superficies circulares [23], con  $\mu$  como la viscosidad del aire (1.98E-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  $C_h = 10 \mu m$ :

$$b = \frac{3\pi\mu a^4}{2c^3} = 58.31 [Kg \cdot rad/s]$$

- 5) Cálculo de respuesta al amortiguamiento. Modelando el sistema como un oscilador armónico amortiguado no forzado, con la ecuación:

$$m_d \ddot{x} + b \dot{x} + k_l x = 0 \tag{7}$$

Donde  $m_d > 0$ ,  $b > 0$  y  $K_i > 0$ , Con ecuación característica:

$$m_d s^2 + bs + k_l = 0 \tag{8}$$

Con raíces características:

$$\frac{-b \mp \sqrt{b^2 - 4m_d k_l}}{2m_d}$$

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

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

Por lo que aplicando el criterio se obtiene:

$$\left. \begin{aligned} b^2 &= 3400.05 \\ 4m_d k_l &= 0.04331 \end{aligned} \right\} \quad b^2 > 4m_d k_l \quad (\text{sobreamortiguado})$$

Siendo las raíces características:

$$r_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4m_d k_l}}{2m_d} = -68.49$$

$$r_2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4m_d k_l}}{2m_d} = -15975273.97$$

Con la solución general:

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

- 6) Cálculo de los coeficientes, considerando un distanciamiento a la posición de equilibrio igual al máximo valor de deflexión del diafragma (9  $\mu m$ ):

$$x(t) = c_1 e^{r_1 t} + c_2 e^{r_2 t} ; \quad x(0) = 9E - 6$$

$$\dot{x}(t) = c_1 r_1 e^{r_1 t} + c_2 r_2 e^{r_2 t} ; \quad \dot{x}(0) = 0$$

$$\Rightarrow \begin{aligned} c_1 &= 9,0000385854191855E - 6 \\ c_2 &= -3,8585419184229483E - 11 \end{aligned}$$

- 7) Graficación de la respuesta en el tiempo. En la Fig. 6. 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.

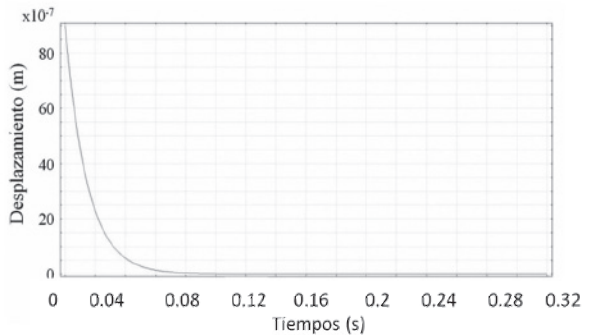


Fig.6. Respuesta desde posición de máxima deflexión.

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

$$m_d \ddot{x} + b \dot{x} + k_l x = f \tag{9}$$

Donde  $f$  corresponde a la fuerza de actuación electrostática, mientras de la ecuación (9) se obtiene:

$$\ddot{x} = \frac{f - b\dot{x} - k_l x}{m_d} \quad (10)$$

Expresado en notación matricial como:

$$\dot{X} = AX + BU \quad (11)$$

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

$$Y = CX + DU \quad (12)$$

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

Mediante graficación, se puede apreciar el comportamiento temporal que tendría el diafragma luego de aplicar el voltaje entre electrodos, causando su desplazamiento desde posición de equilibrio hasta su punto de deflexión máximo. En la Fig. 7 se muestra el lapso de tiempo necesario para alcanzar el valor de deflexión promedio  $W_{prom} = 3 \mu\text{m}$ , el cual equivale a un tercio del valor máximo de deflexión  $W_{prom} = W_{max}/3$  [22], siendo posible apreciar tanto en la Fig. 6. como en la Fig. 7. tiempos similares para el establecimiento de un valor de deflexión constante.

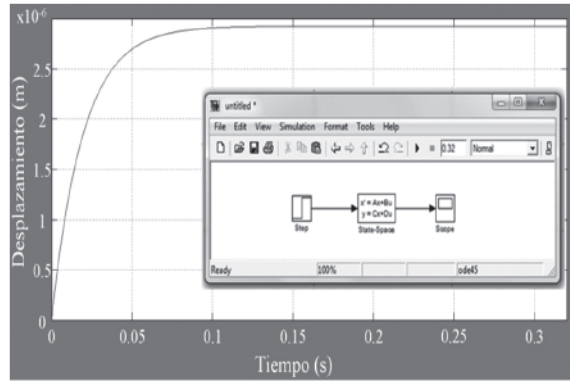


Fig.7. Respuesta desde posición de equilibrio.

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 Fig. 8.

#### IV. RESULTADOS

##### A. Deflexión promedio del diafragma

La Fig. 9. muestra el valor de deflexión promedio del diafragma a lo largo del tiempo, obteniéndose un valor cercano a los  $3 \mu\text{m}$  proyectados para por otra parte, es posible apreciar como el valor de deflexión se ciñe al perfil de actuación adaptado mostrado anteriormente en la Fig. 8., coincidiendo con los tiempos de establecimiento calculados en el apartado “Análisis mecánico”. Información estadística sobre los valores de  $W_{prom}$  obtenidos se presenta en la TABLA II.

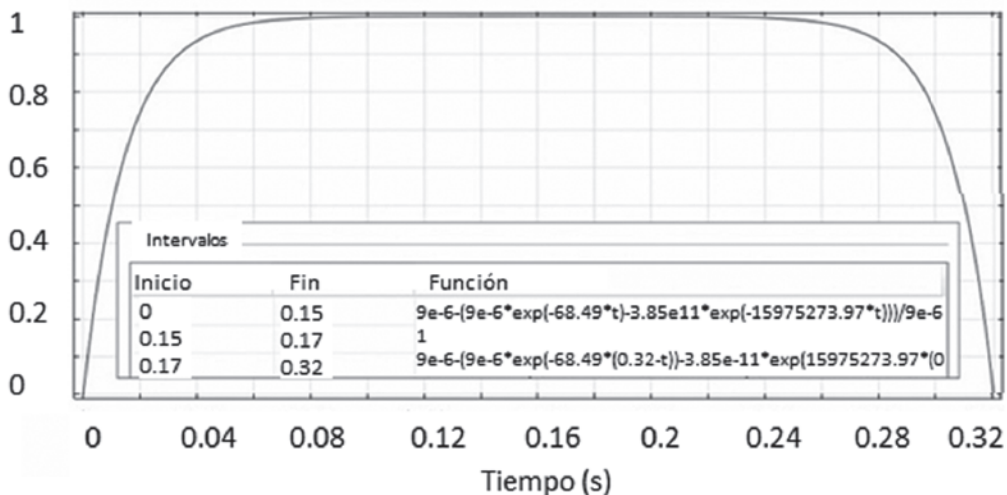


Fig.8. Perfil de actuación adaptado

TABLA II  
DEFLEXIÓN PROMEDIO DEL DIAFRAGMA,  
ESTADÍSTICAS

Valor máximo	2,70E-6 [m]	Valor RMS	2,52E-6 [m]
Valor promedio	2,46E-6 [m]	Desviación estándar	5,45E-7 [m]
Valor mínimo	1,09E-14 [m]	Varianza	2,97E-13 [m <sup>2</sup> ]

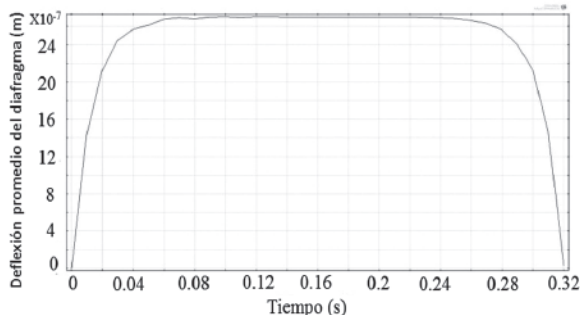


Fig.9. Deflexión promedio del diafragma.

### B. Valores de caudal

La Fig. 10. muestra el comportamiento del caudal a lo largo del tiempo. Detalles sobre los valores de  $Q$  obtenidos se presentan en la TABLA III. 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 III  
CAUDAL, ESTADÍSTICAS

Valor máximo	7.77E-9 [m <sup>3</sup> /s]	Valor RMS	2.81E-9 [m <sup>3</sup> /s]
Valor promedio	1.39E-9 [m <sup>3</sup> /s]	Desviación estándar	2.44E-9 [m <sup>3</sup> /s]
Valor mínimo	-4.7E-9 [m <sup>3</sup> /s]	Varianza	5.9E-18 [m <sup>6</sup> /s <sup>2</sup> ]

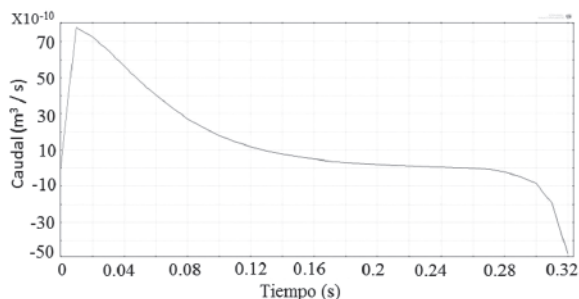


Fig. 10. Caudal.

### C. Valores de presión

La Fig. 11. muestra el comportamiento de la presión a lo largo del tiempo. Detalles sobre los valores de  $P$  obtenidos se presentan en la TABLA IV. 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 IV  
PRESIÓN, ESTADÍSTICAS

Valor máximo	762.59 [torr]	Valor RMS	759.16 [torr]
Valor promedio	759.16 [torr]	Desviación estándar	1.45 [torr]
Valor mínimo	755.25 [torr]	Varianza	2.12 [torr <sup>2</sup> ]

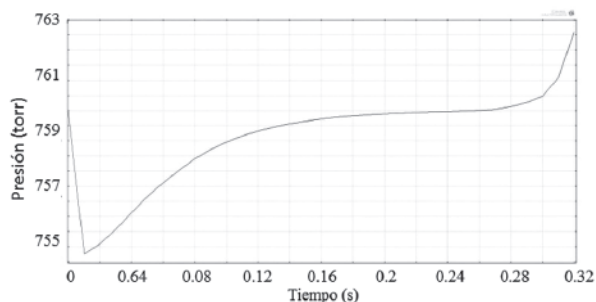


Fig.11. Presión.

D. Perfiles de caudal y presión

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 Fig. 10 y Fig. 11. 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 las Fig. 12 y Fig. 13.

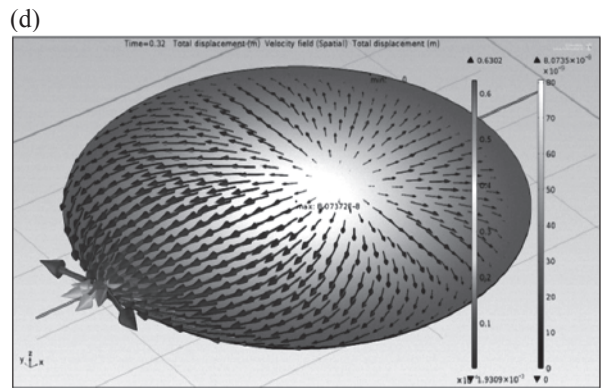
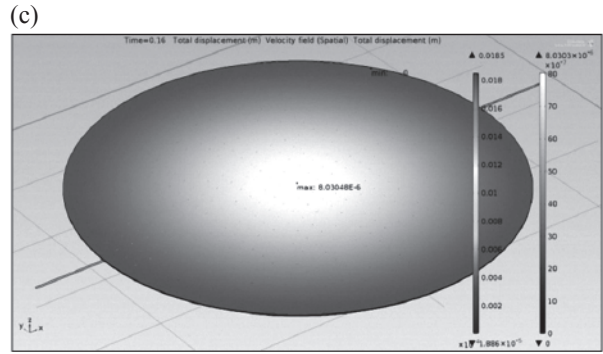
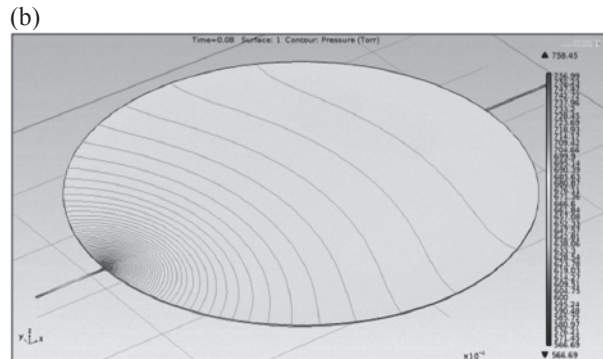
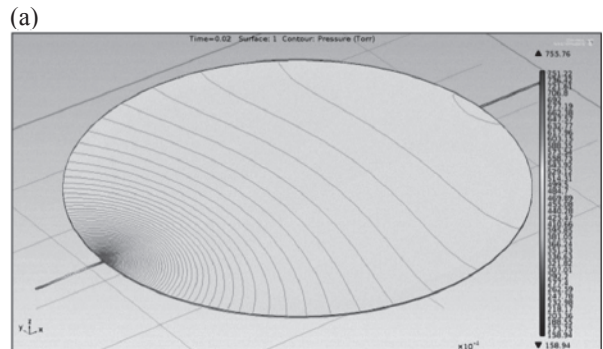
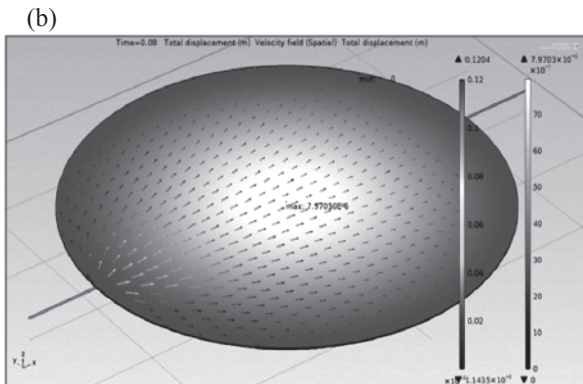
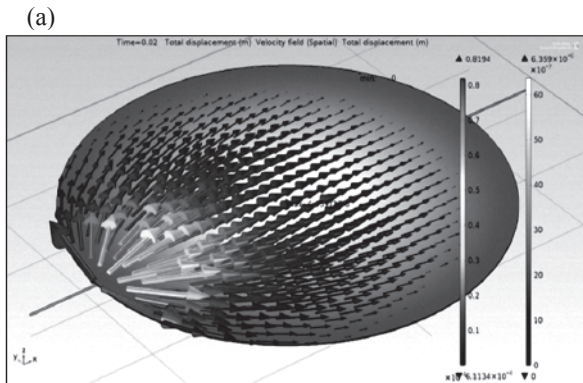


Fig.12. Perfiles de flujo.  
(a) t = 0.02 s, (b) t = 0.08 s, (c) t = 0.16 s, (d) t = 0.32 s



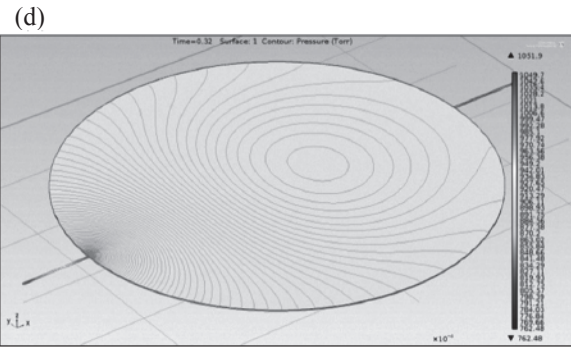
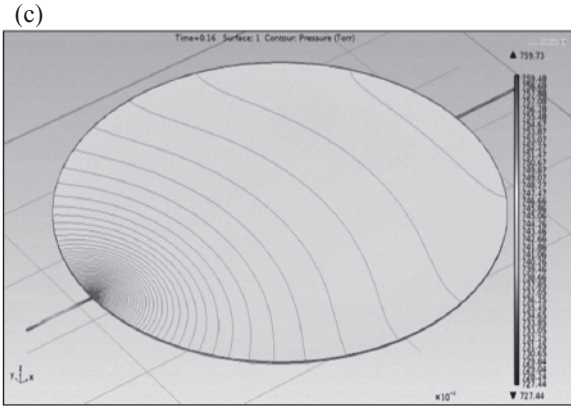


Fig.13. Perfiles de presión.  
(a)  $t = 0.02$  s, (b)  $t = 0.08$  s, (c)  $t = 0.16$  s, (d)  $t = 0.32$  s

E. 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 expondrá más adelante en la sección “Máximo valor de vacío”. La Fig. 14. muestra el comportamiento del volumen bombeado, correspondiente al cálculo numérico de la integral de tiempo:

$$V_p(t) = \int_0^t \dot{V}_{out} dt \tag{13}$$

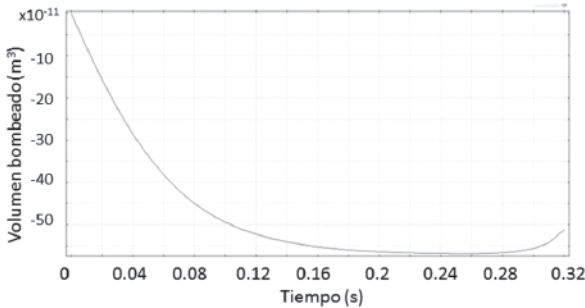


Fig.14. Volumen bombeado.

F. Máximo valor de vacío

Con el ánimo de determinar el máximo valor de vacío alcanzado a lo largo de múltiples ciclos de bombeo mostrado en la Fig. 15, 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 [17]:

$$P_{vac} = \frac{P_i V_t + P_0 V_d + P_0 Q(t_1 + t_c)}{V_t + V_d + V_p} ; V_d = V_{dg} + V_p e^{-\frac{t_c}{\tau}} \tag{14}$$

Datos experimentales:  $P_i$  (presión inicial en cada ciclo),  $P_0$  (presión atmosférica = 760 torr),  $V_{dg}$  (volumen muerto de bombeo =  $78.7E-11$  m<sup>3</sup>),  $V_p$  (volumen bombeado =  $56.86E-11$  m<sup>3</sup>),  $\tau$  (cte de tiempo = 93.1 ms),  $Q$  (caudal de fugas =  $10E-12$  m<sup>3</sup>/s),  $V_t$  (volumen total a evacuar =  $6E-7$  m<sup>3</sup>),  $t_1$  (tiempo de pre-succión = 0.01 s),  $t_c$  (tiempo de succión = 0.28 s).

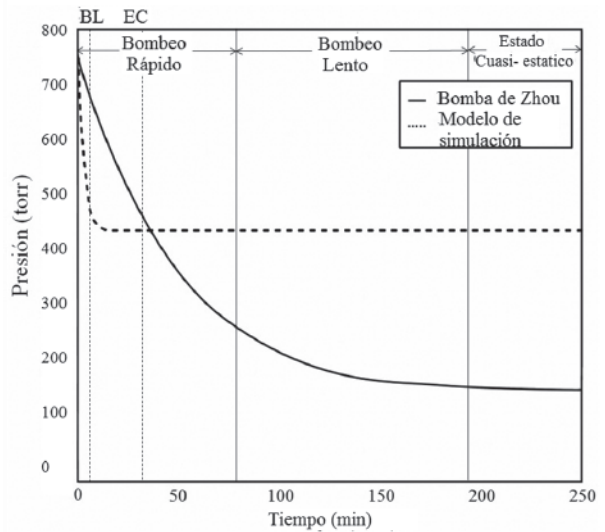


Fig.15. Máximo valor de vacío.

V. CONCLUSIONES

Se ha evaluado el desempeño de funciones construidas a tramos en la simulación del movimiento recíprocante de un diafragma, donde el valor de deflexión promedio para la cámara de bombeo ( $3 \mu\text{m}$ ) junto con los parámetros estructurales de diseño, permitieron determinar el valor de voltaje necesario en un actuador electrostático ( $V_{elec} = 100$  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  $\mu\text{m}$ ), obteniéndose la cifra de 2.7  $\mu\text{m}$ , siendo esta diferencia de tan solo el 10%. Sirviendo como respaldo a los demás resultados derivados de la simulación multifísica.

Debido a la fuerte influencia de la magnitud del volumen muerto en el mínimo valor de presión absoluta alcanzable, y 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, especialmente en lo referente al brusco incremento de los elementos de malla, al tratar de discretizar secciones estrechas del modelo, dificultando un modelamiento detallado de ciertas características geométricas del microdispositivo.

En el presente estudio, el modelo computacional se mostró capaz de manejar un volumen de bombeo de  $56.86\text{E-}11 \text{ m}^3$  en un periodo de operación estimado de 0.32 s lo cual equivale a un caudal de 0.106 sccm., con una presión absoluta mínima de 450 torr, lejana de la cifra de 164 torr ofrecida por Zhou. Sin embargo, esto se debe principalmente a la magnitud del volumen muerto, que tal como se mencionó anteriormente, se torna 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.

## REFERENCIAS

- [1] V. Sharma, "MEMS micropump for a micro gas analyser," Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2009.
- [2] N. Lakshmana, P. Manohar, and S. Babu, "Design and simulation of valveless piezoelectric micropump," *Proceedings of the 2012 COMSOL Conference*, Bangalore, 2012.
- [3] S. Shoji, and M. Esashi, "Microflow devices and systems," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 1994, pp. 57–71.
- [4] P. Woias, "Micropumps, summarizing the first two decades," *Microfluidics and Bio MEMS*, ed. Mastrangelo and Becker, 2001, pp. 39–52.
- [5] N. Nguyen, X. Huang and T. Chuan, "MEMS-micropumps: a review," *Transactions of The ASME, Journal of Fluids Engineering*, 2002, pp. 84–92.
- [6] D. Laser, and J. Santiago, "A review of micropumps," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 14, no. 6, 2004, pp. 35–64.
- [7] C. Zhang, D. Xing, and Y. Li, "Micropumps, microvalves and micromixers within PCR microfluidic chips: Advances and trends," *Biotechnology Advances*, vol. 25, no. 5, 2007, pp. 483–514.
- [8] R. Zegerle, and H. Sandmier, "Microfluidics," *Proceedings of the Seventh International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 1996, pp. 13–20.
- [9] M. Koch, N. Harris, A. Evans, N. White, and A. Brunnschweiler, "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.
- [10] M. Stehr, H. Gruhler, H. Straatmann, S. Messner, H. Sandmaier, and P. Zengerle, "The selfpriming VAMP," *Proceedings of Transducer '97, International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, Chicago, 1997.
- [11] W. Wijngaart, H. Andersson, P. Enoksson, K. Noren, and G. Stemme, "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*, 2000, pp. 674–679.
- [12] F. Goldschmidtboing, A. Doll, M. Heinrichs, P. Woias, H.-J. Schrag, and U.T. Hopt, "A generic analytical model for micro-diaphragm pumps with active valves," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, 2005, pp. 673–683.
- [13] A.A. Astle, L.P. Bernal, P.D. Washabaugh, H. Kim, and K. Najafi, "Theoretical and experimental performance of a high frequency gas micropump," *Proceedings of 2005 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, Orlando, FL, 2005.
- [14] M. Doms and J. Mueller, "A micromachined vapor-jet vacuum pump," *Technical Digest of Transducers & Eurosensors '07*, Lyon, France, 2007, pp. 2425–2428.
- [15] K.P. Kamper, J. Dopfer, W. Ehrfeld, and S. Oberbeck, "A self-filling low-cost membrane micropump," *The Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, Heidelberg, Germany, 1998, pp. 432–437.
- [16] H.Q. Li, D.C. Roberts, J.L. Steyn, K.T. Turner, J.A. Carretero, O. Yaglioglu, Y.-H. Su, L. Saggere, N.W. Hagood, S.M. Spearing, M.A. Schmidt, R. Mlcak, and K. Breuer, "A high-frequency, high flow rate, piezoelectrically driven MEMS micro-pump," *IEEE Solid State Sensors and Actuators Workshop*, Hilton Head SC, 2000.
- [17] H. Zhou, "A study of micromachined displacement pumps for vacuum generation," Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2011.
- [18] R. White, *Tutorial created in COMSOL 4.3 (2012)*. Comsol Acoustics Introduction, 2012.
- [19] Z. Nagy, *FEM simulation of microfluidic devices*. Department of Micro and Nanotechnology, Technical University of Denmark, 2005.
- [20] J. Donea, A. Huerta, J-Ph. Ponthot and A. Rodriguez-Ferran, "Arbitrary Lagrangian-Eulerian methods," *Encyclopedia of Computational Mechanics*, 2004.
- [21] S.D. Senturia, *Microsystem design*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 2001.
- [22] S. Timoshenko and K. Woinowsky, *Theory of plates and shells*. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2<sup>nd</sup> ed., 1964.
- [23] M. Bao, and H. Yeng, "Squeeze film air damping in MEMS," *Sensors and Actuators*, 2007, pp. 3–27.

## BIOGRAFÍA



Mauricio Pedroza Torres, Magister en Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, y docente auxiliar en el área de sistemas dinámicos. Miembro del Grupo de Investigaciones DICBoT, Dinámica Multifísica, Control y Robótica, UIS. Donde se ha desempeñado en campos como la simulación multifísica e inteligencia artificial.



Carlos Borrás Pinilla, Profesor Asociado de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, y director del Grupo de Investigaciones DICBoT, Dinámica Multifísica, Control y Robótica, UIS. Dr. Borrás obtuvo el título de Ingeniero Mecánico - 1991 en la Universidad Industrial de Santander, Especialista en Potencia Fluida - 1995 en Kitakyushu, Japón, Especialista en Gerencia de Mantenimiento - 1998 en la Universidad Industrial de Santander, y obtuvo los títulos de M.Sc., en Ingeniería Mecánica en las áreas de sistemas dinámicos, control y robótica y Ph.D., en Ingeniería Mecánica en la Universidad de Oklahoma en áreas de Microsistemas (MEMS) y Microfluidos (Sistemas Dinámicos Multifísicos Acoplados).