

Diseño de una Estación de Trabajo para la Caracterización de Estructuras Microfluídicas Sensoras de Flujo, Basadas en el Principio de Presión Diferencial

Houari Cobas Gomez, José E. Eirez Izquierdo, Ricardo J. Alvares Suárez, Luis A. Sobrino Fradera, Leonel D. Plasencia Cobas, Manuel F. Cobas Valle, Marcio Rodrigues da Cunha, Sonia Pavoni Oliver & Mario Ricardo Góngora-Rubio

Resumen—Se presenta una propuesta de diseño de una estación de trabajo para la caracterización de estructuras microfluídicas dedicadas al sensado de microflujos. El principio de medición de flujo de estas estructuras se basa en la diferencia de presión desarrollada en una restricción presente en el canal por el que circula el fluido. Para la caracterización propone una estación de trabajo compuesta por un Programa de Caracterización y Control diseñado en LabView, una Estación de Bombeo controlada por computadora, una Tarjeta de Adquisición de Datos de *National Instruments* y un Circuito Acondicionador de Señal. El Programa de Caracterización y Control hará posible la configuración y automatización del proceso de caracterización de las estructuras microfluídicas. Para operar remotamente el sistema, vía internet, este programa será incorporado en una página web. El Acondicionador de Señal multiplexa la señal de tres sensores de presión diferencial y realiza un tratamiento sobre las mismas por medio de amplificadores de ganancia programable para lograr la función de autoajuste de ganancia del sistema. Este procesamiento permitirá a la estación de trabajo la medición niveles de caída de presión en la restricción con una resolución mejor que 400 μ bar, provocados por valores de flujos pequeños.

Contribución remitida 24 de noviembre del 2009.

Se agradece al proyecto SENSAME-(506PI0292) del “Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo”, CYTED, por el financiamiento de la estancia del autor Houari Cobas en el IPT.

Houari Cobas Gomez, Alumno de Doctorado, Área Microelectrónica de la Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, Brazil (e-mail: hcobas@usp.br).

José E. Eirez Izquierdo, Centro de Investigaciones en Microelectrónica (CIME/ISPJAE), Ciudad de La Habana, Cuba.

Ricardo J. Alvares Suárez, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE), Ciudad de La Habana, Cuba.

Luis A. Sobrino Fradera, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE), Ciudad de La Habana, Cuba.

Leonel D. Plasencia Cobas, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE), Ciudad de La Habana, Cuba.

Manuel F. Cobas Valle, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE), Ciudad de La Habana, Cuba.

Marcio Rodrigues da Cunha, Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) do Estado de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

Sonia Pavoni Oliver, Centro de Investigaciones en Microelectrónica (CIME/ISPJAE), Ciudad de La Habana, Cuba.

Mario Ricardo Góngora-Rubio, Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) do Estado de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

Palabras Claves— Sensores de flujo, estructuras microfluídicas, presión diferencial, caracterización.

I. INTRODUCCION

LA microfluídica agrupa un gran número de ramas de la física, desde la dinámica de fluidos hasta la electrónica. En los últimos años el uso de dispositivos microfluídicos se ha incrementado con el desarrollo de la biotecnología, la microelectrónica, la ciencia de materiales y otras aplicaciones de avanzada [1].

La literatura reporta diferentes definiciones para el término microfluídica. De modo general coinciden en que se trata de dispositivos, con escalas de longitud menores a algunos milímetros, y métodos para controlar y manipular fluidos [1].

Los dispositivos microfluídicos pueden tener diversas aplicaciones, muchas de ellas tienen su equivalente en el macromundo. Ejemplo de estas aplicaciones pueden citarse los intercambiadores de calor, las válvulas, bombas, mezcladores, reactores químicos, generadores de micro o nano emulsiones para fabricación de partículas, sensores de diferentes variables físicas, entre otros [2-9].

Entre los dispositivos que pueden ser fabricados que empleen técnicas microfluídicas se encuentran los sensores de flujo. Existen diferentes métodos para la medición de esta variable, algunos datan del siglo XIX. Uno de estos métodos se basa en la medición de presión diferencial.

Trabajos realizados por Bernoulli sirvieron de base para el desarrollo de sensores de flujo de presión diferencial. Bernoulli percibió que si se sitúa una restricción en un conducto por el que circula un fluido, como resultado se obtiene un aumento de la velocidad del fluido a través de la restricción. Como consecuencia se produce una disminución de la presión estática, lo que crea una diferencia de presión a ambos lados de la restricción. El flujo de fluido por el conducto en estas condiciones es proporcional a la raíz cuadrada de la diferencia de presión anteriormente mencionada [10-12].

A partir de la ecuación de Bernoulli y los principios de conservación de la masa, es posible demostrar que el flujo

volumétrico se puede expresar como una relación de la presión diferencial como se muestra en (1) [11]:

$$Q = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} * \sqrt{\frac{2 * (p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (1)$$

donde,

- Q → Flujo volumétrico
 A1 y A2 → Áreas de las secciones transversales antes y después de la restricción respectivamente.
 p1 y p2 → Presiones antes y después de la restricción respectivamente.
 ρ → Densidad del fluido

Debido a las dimensiones de los dispositivos microfluídicos, las propiedades y fenómenos físicos pueden ser distintos a los de la escala convencional [1]. Por estas razones los principios de funcionamiento sólidamente establecidos en los dispositivos fluidicos convencionales pueden no funcionar del mismo modo en los microfluídicos. Por tanto se impone la necesidad de sistemas de caracterización para evaluar el desempeño de dispositivos microfluídicos que son fabricados basados en principios tradicionales.

Se presenta un proyecto sobre una propuesta de diseño de una estación de trabajo automatizada para la caracterización de estructuras microfluídicas, destinadas a la medición de microflujo, basadas en el principio de presión diferencial.

II. MATERIALES

A. Estación de Bombeo Controlada por Computadora

En este proyecto se utilizará una estación de bombeo controlada por computadora. Esta estación será empleada en la generación del patrón de flujo para la caracterización de las diferentes estructuras sensoras [13]. La misma está compuesta por dos bombas de jeringuilla de los modelos PHD-4400 (70-2200) y HV-74900-20 de los fabricantes *Harvard Apparatus* y *Cole Parmer* respectivamente [14, 15].

B. Sensores de Presión Diferencial

Para determinar la caída de presión que tiene lugar en la restricción de las estructuras microfluídicas se emplearán los sensores de presión diferencial cuyas características fundamentales se presentan en la Tabla I [16, 17].

TABLA I
 CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES DE PRESIÓN DIFERENCIAL
 EMPLEADOS

Dispositivo	Presión de Operación	Variación a Plena Escala (Típ.)	Sensibilidad (Típ.)
26PC01K0DSMT	0 – 1000 mbar	97 mV	97 μV/mbar
26PC02K0D6A	0 – 2 bar	97 mV	48.5 mV/bar
26PC05K0D6A	0 – 5 bar	72 mV	14.4 mV/bar

Típ. = Típica, bar = baria, V = volt.

C. Circuitos Integrados

Para el acondicionamiento de la señal de los sensores de presión diferencial se diseñó un circuito electrónico compuesto por los integrados LM285LP-2.5 (referencia de tensión) [18], DG408 (multiplexor analógico) [19], TLC041 (filtro pasa bajo *Butterworth* de cuarto orden) [20], PGA202 (amplificador de ganancia programable) [21], INA114 (amplificador de instrumentación) [22], AD8620 (amplificador operacional) [23].

D. Tarjeta de Adquisición de Datos

Para la digitalización de las señales de los sensores, así como para el control digital de los diferentes bloques de la estación de trabajo se utilizará la tarjeta de adquisición de datos NI6014 de la *National Instruments* [24]. Entre las principales características de esta tarjeta de adquisición de datos (TAD) se encuentran:

- Resolución de 16 bits.
- Frecuencia de muestreo de 200 ksps.
- 16 canales analógicos de entrada configurables como 8 canales diferenciales o 16 referidos al terminal común.
- Intervalo de entrada bipolar que puede variar de acuerdo a una ganancia programada, como se muestra en la Tabla II.
- 2 salidas analógicas.
- 8 entradas/salidas digitales.

En esta aplicación las entradas de la TAD fueron configuradas como diferenciales de modo que el máximo intervalo de entrada fuese ± 5 V.

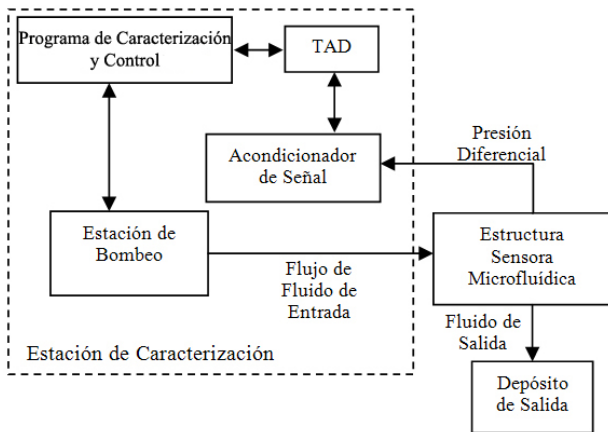
TABLA II
 PRECISIÓN DE LA MEDICIÓN

Ganancia	Intervalo de Entrada	Precisión
0.5	-10 V a 10 V	305.2 μV
1	-5 V a 5 V	152.6 μV
10	-500 V a 500 mV	15.3 μV
100	-50 mV a 50 mV	1.53 μV

V = volt.

III. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

En la figura 1 se presenta el diagrama en bloques de la estación de trabajo propuesta. Los componentes fundamentales de dicha estación son el Programa de Caracterización y Control (PCC), la Estación de Bombeo (EB), la Tarjeta de Adquisición de Datos (TAD) y el Circuito Acondicionador de Señal (CAS).



A. Programa de Caracterización y Control

El PCC ha sido diseñado en el lenguaje de instrumentación virtual *LabView*. Este programa será el encargado de dirigir el funcionamiento del sistema en su totalidad. En él, el usuario definirá los parámetros de caracterización, entre los que se encuentran los relacionados con el flujo de fluido a través de los dispositivos microfluidicos. El PCC impondrá, por medio de la Estación de Bombeo, el patrón de flujo de caracterización deseado por el usuario. Este patrón será básicamente una escalera de flujo cíclica desde un valor mínimo hasta un valor máximo. Por otra parte el PCC, en función de las medidas de presión diferencial realizadas, establecerá el valor de ganancia del Acondicionador de Señal de modo que cada medición realizada aproveche al máximo la resolución de la TAD. El PCC será empotrado en un sitio web con el objetivo de poder acceder a la estación de trabajo remotamente y realizar la caracterización de las estructuras vía Internet.

B. Estación de Bombeo

La función de la EB es mantener patrón de flujo con el que será caracterizada cada una de las estructuras [13]. La configuración de la EB se realiza a través del PCC en función de los requerimientos del proceso de caracterización. En la EB se define el flujo que se debe inyectar a los sensores en cada instante de tiempo desde un programa de supervisión y control diseñado en *LabView*. La información llega a las bombas por medio del protocolo de comunicación serie RS232.

C. TAD y Acondicionador de Señal

La TAD en este sistema tiene la función de digitalizar e introducir a la computadora en que se ejecuta el PCC, los valores de presión diferencial a los que se encuentran sometidos las entradas de los sensores empleados. Al mismo tiempo, por medio de las salidas digitales de la TAD, se aplican las señales de control que permitirán realizar la multiplexación de los sensores así como establecer la ganancia del amplificador de salida.

En el bloque de acondicionamiento de la señal estarán ubicados los sensores de presión diferencial. En este bloque la salida de los sensores serán multiplexadas, amplificadas y

filtradas. El acondicionador de señal diseñado permitirá trabajar hasta con tres sensores de presión diferencial simultáneamente. Este aspecto permitirá la caracterización simultánea de hasta tres estructuras microfluidicas sensoras de flujo.

IV. CIRCUITO ACONDICIONADOR DE SEÑAL

El circuito básico simplificado del CAS se muestra en la figura 2. El CAS multiplexa la señal de salida de tres sensores de presión diferencial. Para la selección del sensor con el que se realizará cada medición se utilizan las entradas de selección del bloque de multiplexado. Estas señales de selección son enviadas al CAS desde el PCC a través de la TAD. La salida del bloque de multiplexación se conecta a la entrada del bloque pre-amplificador. El Pre-amplificador tendrá la responsabilidad de eliminar el offset de la señal de salida de los sensores al mismo tiempo de llevar a cabo una primera etapa de amplificación con una ganancia igual a 51. La salida de los sensores, una vez pre-amplificadas, es filtrada para reducir las señales de ruido, para lo que se utiliza un filtro Butterworth pasabajo integrado de 4^{to} orden. Una vez filtrada, la señal ya está lista para el último paso de amplificación.

La precisión en la medición del sistema se establece por dos

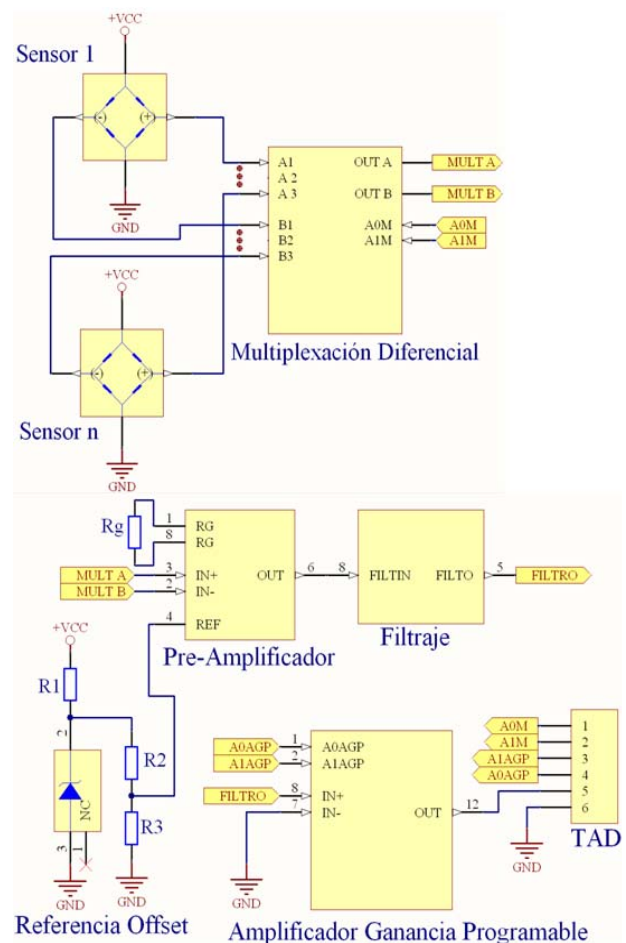


Fig. 2 Diagrama eléctrico resumido del Circuito Acondicionador de Señal.

vías. La primera vía es variando la resolución de la TAD en función de la tensión que se encuentra en cada momento en sus entradas, como se muestra en la Tabla II. La segunda es variando la ganancia del amplificador de ganancia programable empleado en la última etapa de amplificación. La ganancia en este dispositivo está predefinida por el fabricante y puede tomar valores de 1, 10, 100 y 1000. La ganancia es seleccionada y aplicada por el PCC al amplificador de ganancia programable a través de la TAD. Este último bloque tiene como objetivo el máximo aprovechamiento de la resolución de la TAD en función del nivel de presión diferencial al cual estén sometidas las entradas de los sensores, que está relacionado con el flujo que circula por el dispositivo microfluídico. En las Tablas III, IV y V se muestran las resoluciones que se pueden tener en cada intervalo de medición de presión diferencial. Se tienen en cuenta la ganancia del último paso de amplificación, la resolución de la tarjeta para cada intervalo de entrada y cada uno de los sensores empleados. Se puede apreciar como con esta configuración se obtiene la mayor precisión en la medición para los menores valores de presión diferencial presentes en las entradas de los sensores. El sistema ha sido diseñado de modo que permita medir diferencias de presión en las estructuras microfluídicas sensoras de flujo con una precisión mejor que 207.8 μbar .

TABLA III
RESOLUCIÓN EN LA MEDICIÓN DE PRESIÓN DIFERENCIAL CON EL SENSOR
26PC01K0DSMT

Intervalo de Tensión de Salida del CAS			
G	0 V a 50 mV	50 mV a 500 mV	500 mV a 5 V
1000	R: 0.3 nbar IPD: 0 – 10 μbar	R: 3 nbar IPD: 10 μbar – 0.1 mbar	R: 31 nbar IPD: 0.1 mbar – 1 mbar
100	--	--	R: 0.3 μbar IPD: 1 mbar – 10.1 mbar
10	--	--	R: 3 μbar IPD: 10.1 mbar – 101 mbar
1	--	--	R: 31 μbar IPD: 101 mbar – 1 bar

G: Ganancia, R: Resolución, IPD: Intervalo de Presión Diferencial, bar = baria, V = volt.

TABLA IV
RESOLUCIÓN EN LA MEDICIÓN DE PRESIÓN DIFERENCIAL CON EL SENSOR
26PC02K0D6A

Intervalo de Tensión de Salida del CAS			
G	0 V a 50 mV	50 mV a 500 mV	500 mV a 5 V
1000	R: 0.62 nbar IPD: 0 – 20.2 μbar	R: 6.2 nbar IPD: 20.2 μbar – 0.2 mbar	R: 61.7 nbar IPD: 0.2 mbar – 2 mbar
100	--	--	R: 0.6 μbar IPD: 2 mbar – 20.2 mbar
10	--	--	R: 31.5 μbar IPD: 20.2 mbar – 202 mbar
1	--	--	R: 61.7 μbar IPD: 202 mbar – 2 bar

G: Ganancia, R: Resolución, IPD: Intervalo de Presión Diferencial, bar = baria, V = volt.

TABLA V
RESOLUCIÓN EN LA MEDICIÓN DE PRESIÓN DIFERENCIAL CON EL SENSOR
26PC05K0D6A

Intervalo de Tensión de Salida del CAS			
G	0 V a 50 mV	50 mV a 500 mV	500 mV a 5 V
1000	R: 2 nbar IPD: 0 – 68 μbar	R: 21 nbar IPD: 68 μbar – 0.68 mbar	R: 0.2 μbar IPD: 0.68 mbar – 6.8 mbar
100	--	--	R: 2 μbar IPD: 6.8 mbar – 68.1 mbar
10	--	--	R: 20.8 μbar IPD: 68.1 mbar – 680.8 mbar
1	--	--	R: 207.8 μbar IPD: 680.8 mbar – 5 bar

G: Ganancia, R: Resolución, IPD: Intervalo de Presión Diferencial, bar = baria, V = volt.

La topología del CAS elegida permitirá al sistema realizar la operación de autoajuste del intervalo de presión de entrada. Para ello serán ajustados, por programación, el intervalo de tensión de entrada de la TAD y la ganancia del amplificador de ganancia programable.

V. PROGRAMA DE CARACTERIZACIÓN Y CONTROL

A. Instrumentación Virtual Remota

La Instrumentación Virtual Remota será la herramienta empleada por el grupo de trabajo para realizar el proceso de caracterización de las estructuras microfluídicas. Esta técnica permite la manipulación de un instrumento virtual (IV) vía Internet. Para su implementación es necesario empotrar el IV en una página web, lo cual permite gobernar desde una computadora cliente el IV que se encuentra en ejecución en otra computadora de la red que realiza la función de servidor. Entre las tecnologías disponibles a tal efecto en *LabView* se utilizó la tecnología *Remote Panels*. Esta tecnología permite acceder desde una computadora remota a un IV que se ejecuta en otra computadora de la red mediante la visualización del mismo en un navegador de internet (*Internet Explorer 4.0* o superior). En este navegador se visualiza, exactamente, el mismo panel frontal que se ejecuta en el servidor con la posibilidad de interactuar activamente con todos los comandos de control del mismo.

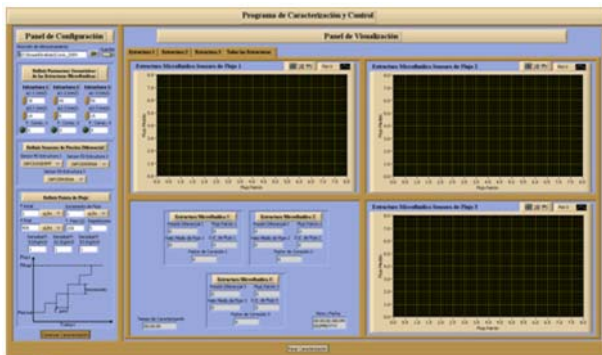
B. Instrumento Virtual

El panel frontal del Programa de Caracterización y Control se muestra en la figura 3a. El mismo está dividido en dos secciones, un Panel de Configuración y un Panel de Visualización. Entre las funciones que debe realizar el PCC se encuentran:

- Controlar la Estación de Bombeo para lograr la ejecución del patrón de flujo de caracterización especificado por el usuario en el Panel de Configuración.
- Configurar las señales de selección del bloque de multiplexación en función de los sensores de

presión diferencial que el usuario defina para la caracterización.

- Configurar la ganancia del amplificador de ganancia programable del CAS y el intervalo de tensión de entrada de la TAD en función del nivel de presión diferencial presente en las entradas de los sensores.
- Obtener los valores de flujo medios, la desviación estándar de los mismos y el factor de corrección para cada estructura sometida al proceso de caracterización.
- Graficar los valores de flujo medio experimental contra los valores establecidos por el patrón de flujo.
- Almacenar en disco los resultados de las mediciones realizadas.



(a)

Definir Parámetros Geométricos de las Estructuras Microfluidicas		
Estructura 1	Estructura 2	Estructura 3
A1-1 (mm ²)	A1-2 (mm ²)	A1-3 (mm ²)
30	40	50
A2-1 (mm ²)	A2-2 (mm ²)	A2-3 (mm ²)
10	5	15
F. Correc.-1	F. Correc.-2	F. Correc.-3
0	0	0

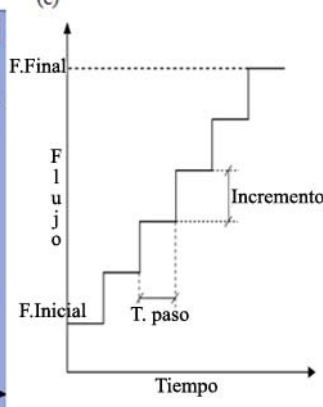
(b)

Definir Sensores de Presión Diferencial	
Sensor PD Estructura 1	Sensor PD Estructura 2
26PC01K0D5MT	26PC02K0D6A
Sensor PD Estructura 3	
26PC05K0D6A	

(c)

Definir Patrón de Flujo			
F inicial	Incremento de Flujo		
2	1		
F final	T. Paso (s)	Repeticiones	
500	200	5	
Densidad F. E1 (kg/m ³)	Densidad F. E2 (kg/m ³)	Densidad F. E3 (kg/m ³)	
1	1	1	

(d)



(e)

Previo al proceso de caracterización el usuario primeramente configura el experimento, lo que puede realizar en el Panel de Configuración. En este panel primeramente define cuáles son las características geométricas de las estructuras que serán caracterizadas, figura 3b. Los valores de las áreas A1 y A2 serán empleados para obtener el valor de flujo medido experimentalmente a partir de la diferencia de presión en la restricción según (1). El campo Factor de Corrección en este paso de la configuración será empleado solamente con el fin de verificar, en una segunda etapa, la calidad del proceso de caracterización realizado. Como un segundo paso de la configuración el usuario debe informar al sistema el sensor que será empleado en cada una de las estructuras, figura 3c. Por último se define el patrón de flujo a ser empleado como se muestra en la figura 3d. El patrón de caracterización será básicamente una escalera de flujo, figura 3e, que se repetirá en el tiempo cuantas veces el usuario decida por medio de un control dedicado a tal efecto. Para definir el patrón se introducirán informaciones como el flujo inicial y final, el valor de incremento de flujo entre un paso de la escalera y otro, así como el tiempo en que debe permanecer cada valor de flujo antes de ser incrementado. En este campo también se definen los valores de densidades de los fluidos que serán utilizados para caracterizar cada una de las estructuras.

Una vez configurado e iniciada la caracterización, el PCC calcula el valor de flujo de fluido que debe circular por cada estructura y configura la EB con dicho valor. En este proceso de caracterización la EB es reconfigurada cada vez que el PCC calcula un nuevo valor de flujo.

Por cada valor de flujo calculado por el PCC que se hace llegar a las estructuras bajo prueba a través de la EB, el PCC adquiere 300 valores de presión diferencial en cada una de las estructuras. Con estos valores de presión diferencial se calculan 300 valores de flujo según (1) por cada estructura. Por último se realiza un análisis estadístico de modo que se obtiene para cada valor de flujo patrón un valor de flujo medio experimental y su desviación estándar. Estos datos son almacenados en disco y se grafica el valor de flujo medio experimental contra el flujo patrón para cada estructura.

A la ecuación (1) se llega después de asumir que sobre el fluido no actúa la fricción (lo que implica cero viscosidad), y que la densidad del fluido es constante (implica que el fluido es incompresible) lo cual se cumple para gran variedad de fluidos. Debido a las suposiciones anteriores, se deben tener en cuenta determinados coeficientes o parámetros de compensación al emplear las ecuaciones en aplicaciones prácticas [11]. Estos parámetros de compensación por lo general afectan al término que se encuentra multiplicando a la raíz. A partir del punto expuesto con anterioridad, en el PCC se calcula un Factor de Corrección por estructura para evaluar la calidad del proceso de caracterización y adicionarlo a las mediciones futuras de flujo que sean realizadas con cada una de ellas. En una segunda etapa del proceso de caracterización estos Factores de Corrección son introducidos en los campos correspondientes del Panel de Configuración, figura 3b, y se repite el proceso. En esta ocasión los valores de flujo medio

experimental son calculados teniendo en cuenta los Factores de Corrección. Como resultado, la desviación del valor de pendiente respecto al valor unitario, de cada una de las graficas de flujo medio experimental contra flujo patrón, será una medida de la calidad del proceso de caracterización llevado a cabo.

VI. CONCLUSIONES

En esta contribución se presentó y discutió una propuesta de diseño de una estación de trabajo para la caracterización de estructuras microfluídicas sensoras de flujo, cuyo principio de funcionamiento se basa en la medición de la presión diferencial desarrollada en una restricción de un canal microfluídico. Se mostraron las diferentes partes que componen la estación de trabajo y se abordó el diseño del Circuito Acondicionador de Señal utilizado, así como del Programa de Caracterización y Control.

El Circuito Acondicionador de Señal diseñado permitirá realizar mediciones de presión diferencial con resolución mejor que 400 μ bar. El CAS fue diseñado para realizar mediciones con ganancias variables automáticamente en dependencia del intervalo de presión diferencial de trabajo, lo que permitirá aprovechar al máximo la resolución de la Tarjeta de Adquisición de Datos. Esta táctica hace posible la distribución de las mayores resoluciones o mejores precisiones en la medición para los menores valores de presión diferencial.

El Programa de Caracterización y Control, diseñado en *LabView*, dará la posibilidad de realizar el proceso de caracterización remotamente vía internet. Para ello se utilizará la tecnología *Remote Panels* disponible en *LabView*. Este programa, que dirige el funcionamiento de todo el sistema, presenta una interfaz gráfica de usuario que permite la configuración del experimento con facilidad, y la visualización de los resultados. También se llevan a cabo análisis estadísticos de las mediciones realizadas y se determinan factores de corrección para cada una de las estructuras caracterizadas.

Actualmente los circuitos que forman parte de la propuesta de diseño presentada están en fase de construcción, ajuste y puesta a punto. Igualmente los programas deben ser puestos a punto. Una vez finalizada esta etapa, el sistema será caracterizado y sometido a pruebas funcionales.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos al grupo de Microtecnología y Microfluídica del Centro de Tecnología de Procesos y Productos del Instituto de Pesquisas Tecnológicas del Estado de São Paulo, Brasil.

REFERENCIAS

- [1] D. F. Rivas, "Microfluidos: ¿cuánto hay de nuevo?," *Revista Cubana de Física*, vol. 25, pp. 142 - 149, 2008.
- [2] M. R. Gongora-Rubio, M. R. d. Cunha, A. P. d. O. Costa, R. M. R. Costa, and M. I. Ré, "Microfluidic devices for micro & nanoparticle fabrication using LTCC technology," in *3rd Microfluidics French Conference, SHF - Microfluidics 2006, Toulouse* Toulouse, 2006.
- [3] M. R. Gongora-Rubio, P. Espinoza-Vallejos, L. Sola-Laguna, and J. J. Santiago-Avilés, "Overview of low temperature co-fired ceramics tape technology for meso-system technology (MsST)," *Sensors and Actuators A*, vol. 89, pp. 222-241, 2001.
- [4] K. W. Oh and C. H. Ahn, "A review of microvalves," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 16, pp. R13-R39, May 2006.
- [5] L. J. GOLONKA, "Technology and applications of Low Temperature Cofired Ceramic (LTCC) based sensors and microsystems," *Bulletin Of The Polish Academy Of Sciences Technical Sciences*, vol. 54, pp. 221-231, 2006.
- [6] M. R. Gongora-Rubio and J. J. S. Aviles, "LTCC an Enabling Technology for Meso-Systems " 2000_después.
- [7] M. R. Gongora-Rubio, E. W. Simões, M. B. A. Fontes, R. Furlan, I. Ramos, M. T. Pereira, and J. Santiago-Avilés, "LTCC hybrid technology for microfluidic systems in analytical chemistry " 2002.
- [8] N. Ibanes-Garcia, M. B. Mercader, Z. M. d. Rocha, C. A. Seabra, M. R. Gongora-Rubio, and J. A. Chamarro, "Continuous Flow Analytical Microsystems Based On Low-Temperature Co-Fired Ceramic Technology. Integrated Potentiometric Detection Based On Solvent Polymeric Ion-Selective Electrodes," *Analytical Chemistry*, vol. 78, pp. 2985 - 2992, 2006.
- [9] T. R. Pan, S. J. McDonald, E. M. Kai, and B. Ziaie, "A magnetically driven PDMS micropump with ball check-valves," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 15, pp. 1021-1026, 2005.
- [10] I. Sinclair, *Sensors and Transducers*, 3rd edition ed., 2001.
- [11] J. G. Webster, *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook CRCnetBase 1999*: CRC Press LLC, 1999.
- [12] J. S. Wilson, *Sensor Technology Handbook*: Newnes, 2005.
- [13] H. Cobas, M. R. d. Cunha, I. D. Alvim, J. E. E. Izquierdo, S. P. Oliver, and M. R. Góngora-Rubio, "Diseño de una estación de bombeo controlada por computadora para la caracterización de estructuras microfluídicas," in *Iberchip XVI Workshop Iguazu Falls, Brasil* enviado para publicación.
- [14] Harvard_Apparatus, "Guide to Microfluidic & Nanofluidic Products," Harvard Apparatus, 2009.
- [15] Cole_Palmer, "KH-74900-20 Cole-Parmer® dual-syringe infusion/withdrawal pump, 115 VAC." vol. 2009: Cole Palmer, http://www.coleparmer.com/catalog/product_view.asp?sku=7490020&px=KH, [cited 14/11/2009 2009].
- [16] SensorTechnics, "26PC SMT Series (mbar). Temperature compensated and calibrated pressure sensors," 2005.
- [17] SensorTechnics, "26PC Series (mbar). Temp. compensated and calibrated pressure sensors," 2005.
- [18] Texas_Instruments, "LM285-2.5, LM385-2.5, LM385B-2.5. Micropower voltage references.," 2003.
- [19] Intersil, "DG408, DG409. Single 8-Channel/Differential 4-Channel, CMOS Analog Multiplexers," 2004.
- [20] Texas_Instruments, "TLC04/MF4A-50, TLC14/MF4A-100. Butterworth fourth-order low-pass switched-capacitor filters.," 1995.
- [21] Texas_Instruments, "PGA202/203. Digitally controlled programmable-gain instrumentation amplifier.," 1993.
- [22] Texas_Instruments, "INA114. Precision instrumentation amplifier.," 1993.
- [23] Analog_Devices, "Precision, Very Low Noise, Low Input Bias Current, Wide Bandwidth JFET Operational Amplifier," 2004.
- [24] National_Instruments, "DAQ NI 6013/6014 User Manual. Multifunction I/O Devices for PCI Bus Computers," 2002.