

## Microfluidos: ¿cuánto hay de nuevo?

D. Fernández Rivas

Departamento de Ingeniería Nuclear, Facultad de Ciencias y Tecnología Nuclear, Instituto Superior de Tecnología y Ciencias Aplicadas. Ciudad de La Habana, Cuba; rivas@instec.cu

**Sumario.** La microfluídica agrupa un gran número de ramas de la física, desde la dinámica de fluidos, hasta la electrónica, y está estrechamente ligada a las ciencias biológicas. La interdisciplinariedad asociada a ella es una característica propia de la época en que vivimos. En los últimos diez años, con el desarrollo de la biotecnología, la microelectrónica, la ciencia de materiales y otras aplicaciones de avanzada, el uso de dispositivos microfluídicos ha ido incrementándose. Si bien en Cuba algunos científicos han realizado trabajos relacionados con esta temática, hasta el momento no existe ninguna referencia en que se divulgue esta actividad. En este artículo se introducirán algunos términos y se divulgarán aspectos básicos de los microfluidos. Por otra parte, se espera publicar en breve otro artículo relacionado fundamentalmente con las aplicaciones más importantes para Cuba.

**Abstract** Microfluidic groups many branches of Physics ranging from Fluid Dynamics to Electronics and closely linked with Biology Sciences. Its interdisciplinary character is a distinctive feature, as the times we are living today. In the last ten years, along with the development of biotechnology, microelectronics, materials science and many others, the use of microfluidic devices has increased remarkably. Few scientists in Cuba have worked in topics related with Microfluidics; nevertheless, there is no reference in which this activity has been pointed out explicitly. This article aims to introduce some terms and divulge basic aspects of Microfluidics; besides this, another article will be published with most applications of Microfluidics that could be of interest for Cuba.

### 1 Introducción

En este trabajo el lector no especializado en el tema podrá encontrar la definición de algunos términos que le permitirán comprender mejor los adelantos en esta ciencia. A partir de la sección 3, *Principios físicos, ecuaciones y dispositivos*, se explican con más detalle los aspectos fundamentales para los más avezados en la dinámica de fluidos u otras ramas relacionadas con la microfluídica. La definición más aceptada de lo que se conoce como microfluídica es que se trata de los dispositivos y métodos para controlar y manipular fluidos con escalas

de longitud menores a algunos milímetros<sup>1</sup>.

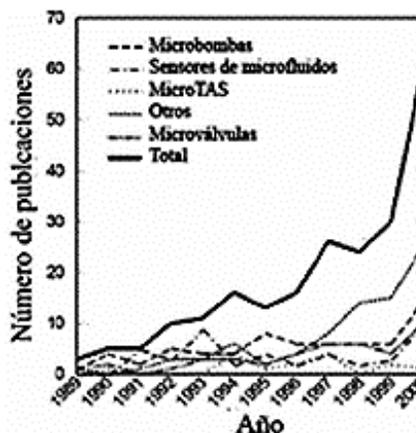


Figura 1. Relación del número de artículos asociados con microfluidos, (ref. [4]).

Otro término muy en boga es la nanofluídica. La frontera entre los microfluidos y nanofluidos (micro  $\sim 10^{-6}$ , nano  $\sim 10^{-9}$ ) aún no está clara, pero el prefijo de cada cual indica una diferencia de escala longitudinal de al menos tres órdenes de magnitud.

Varios autores han alertado sobre algunos impactos en la vida social, la salud, el medio ambiente, la seguridad y las consecuentes implicaciones éticas y morales de los microfluidos sobre la actividad humana<sup>2</sup>. Este artículo se centra en la microfluídica, que si bien aún se encuentra en estado incipiente de desarrollo, es un ejemplo evidente de cómo el desarrollo de diferentes ramas de la ciencia actual posibilitan aplicaciones hace poco imposibles, o muy difíciles de llevar a la práctica de una manera económicamente viable.

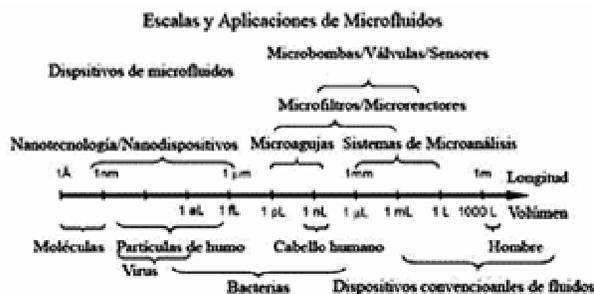


Figura 2. Escalas y ejemplos de dispositivos y otros objetos, (ref. [17]).

Se suele aceptar que se habla de microfluidos cuando las cantidades que se manipulan son pequeñas, independientemente de que alguna parte del dispositivo sea relativamente más grande. Dicho de otro modo, la microfluídica es el conjunto de actividades en que se aprovechan las ventajas que proporcionan el uso y control del fluido a escalas inferiores a la milimétrica, donde las

propiedades físicas pueden ser distintas de la escala convencional conocida por el hombre en su vida cotidiana, así como los fenómenos físicos (los efectos viscosos son más pronunciados, por ejemplo, la capilaridad).

Lógicamente cabría pensar que si conocemos todo lo concerniente a la mecánica de fluidos, podemos explicar de la misma forma los fenómenos que se producen en los microfluidos, pero no es así. En cierta ocasión Sir Edington planteó lo siguiente<sup>3</sup>:

“ Solíamos pensar que si conocíamos uno, conocíamos dos, puesto que uno y uno son dos. Estamos encontrando que debemos aprender mucho más todavía sobre el ‘y’ ”.

De modo que, aunque conozcamos bastante sobre las propiedades macroscópicas de un sistema, eso no implica que al miniaturizarlo se comporte igual

**Definición de algunos términos.** Hay autores que definen los Sistemas Micro-Electro-mecánicos MEMS (por sus siglas en inglés Micro Electro Mechanical Systems) como aquellos dispositivos que se crean en la actualidad con dimensiones en la escala micrométrica e inferiores. Sin embargo, este término se debe aplicar a los microdispositivos que se construyeron gracias al auge y los avances de la tecnología del silicio en la década de 1970. De modo que es más aceptado el término de Tecnologías de Microsistemas (MST, Microsystem Technology), que incluye, además de los dispositivos electrónicos, a los de microfluidos, ópticos y biológicos.

Una prueba de la importancia que ha cobrado la microfluídica es que esta temática se incluye cada vez más en las sesiones técnicas de casi todas las organizaciones científicas de todo el mundo (AIChE, American Institute of Chemical Engineers, e IEEE, Institute of Electrical and Electronic Engineers, entre otros). Por consiguiente, el número de publicaciones, congresos y reuniones ha crecido de manera casi exponencial en los últimos años<sup>4</sup>.

Además de las publicaciones tradicionalmente relacionadas con los fluidos, otras como Lab-on-a-Chip, Sensors and Actuators, y Analytical Chemistry han publicado numerosos trabajos sobre microfluidos, lo que confirma el carácter multidisciplinario de esta actividad. Su efervescencia se demuestra en el creciente número de publicaciones nuevas relacionadas con esta temática. Una metáfora interesante se publicó en el Editorial de la recién creada publicación *Microfluidics and Nanofluidics*, de Springer Verlag en el 2004<sup>5</sup>: “El flujo pequeño se convierte en corriente principal”.

**Ideas revolucionarias.** Con el desarrollo de la microfluídica surgió un concepto revolucionario: los Micro Sistemas de Análisis Total ( $\mu$ TAS, Micro Total Analysis Systems), que denotan la voluntad de realizar, en un mismo dispositivo, una serie de análisis consecutivos que se complementan y fue presentado por primera vez en la ref. [6]. Con este término se demuestra por ejemplo como en un mismo dispositivo microfluídico, la separación cromatográfica es más eficiente y rápida, que las separaciones electroforéticas son más rápidas y que

los tiempos de transporte son más cortos (teoría fomentada por las investigaciones y los trabajos con ADN). El ahorro de reaccionantes químicos demostró ser considerable y el tiempo de análisis mucho menor. La posibilidad de integrar varios canales en un mismo dispositivo permitió la integración de varios análisis al unísono.

En un artículo referido a la importancia de la mecánica de fluidos en aspectos relacionados con la seguridad, se destaca el papel de los microfluidos en la actualidad y en el futuro cercano<sup>7</sup>. Según el autor, la principal contribución sería una inmensa red de sensores muy baratos funcionando constantemente que permitiría predecir, por ejemplo, ataques con gases tóxicos, o detectar explosivos en equipajes de aviones. La ventaja de los sistemas de Laboratorio-en-un-chip (Lab-on-a-chip) en cuanto a su rapidez de análisis demuestra su efectividad, pues si el análisis demorara días, no ayudaría a detener la amenaza.

El concepto Laboratorio-en-un-chip al parecer es una extensión del  $\mu$ TAS y expresa el deseo de integrar en un solo dispositivo todos los componentes necesarios para realizar la síntesis química de compuestos, o bien el análisis (caracterización, identificación y separación), de reacciones complejas, pero con la menor cantidad de sustancia posible.

En Cuba el estudio y la aplicación de los microfluidos todavía no tiene un grupo bien definido de usuarios o investigadores. Se conocen al menos dos documentos que guardan alguna relación con la microtecnología y la nanotecnología.

El primero es el documento emitido por el Observatorio Cubano de Ciencia y Tecnología perteneciente al Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente en 2002<sup>8</sup>, en el que se establece una relación entre los antecedentes y los conceptos y se recogen las investigaciones importantes en aquellos años, elementos sobre el financiamiento, mercados, tecnologías, impacto, regulaciones y normas, así como el escenario cubano en lo referente a la nanociencia en general. Según este documento, el interés ha estado enfocado fundamentalmente al estudio de los materiales y se busca avanzar en la actividad de la biología y medicina.

El segundo es un artículo de la Revista Bohemia publicado en junio de 2006<sup>9</sup> en el que figura un resumen de los principales momentos y aplicaciones de la nanociencia y las nanotecnologías y en el que, con la frase: “Mírame sin temor... pero con dudas”, advierte sobre los aspectos medio ambientales, los intereses militares y otros asuntos derivados del empleo de las nanotecnologías. Sin embargo, no se ha podido encontrar ninguna referencia específicamente sobre microfluidos publicada en Cuba.

Es muy posible que haya científicos trabajando en esta temática sin saber que existe toda una revolución en el mundo en materia de microtecnología y nanotecnología. Por el momento, al menos en la microfluídica, el autor sabe que se han iniciado algunos pasos en el Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC), el Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo

Nuclear (CEADEN), así como en el Instituto Superior “José A. Echevarría” (ISPJAE), y presumiblemente en algunas dependencias del Polo Científico del oeste de la Habana.

El objetivo del presente artículo es dar divulgación al tema a fin de enriquecer los conocimientos de todos aquellos que de alguna manera necesiten o deseen adentrarse en esta fascinante rama de la ciencia.

## 2 Momentos históricos

Tal vez el suceso iniciador de lo que hoy es una realidad, a saber, la miniaturización de innumerables componentes (eléctricos fundamentalmente), fue la charla desafiante del Premio Nobel de Física, Richard Feynman, en diciembre de 1959 titulada “There is plenty room at the bottom” (Hay suficiente espacio en el fondo)<sup>10</sup>. Feynman definió su charla como una invitación a un nuevo campo de la física, no en la dirección de las partículas extrañas tan en boga por aquella época, sino en cuanto al control a muy pequeña escala, y lanzó al público una pregunta inquietante:

‘¿Por qué no escribimos los 24 tomos de la Enciclopedia Británica en la cabeza de un alfiler?’

La respondió valiéndose de experimentos mentales realizables en aquellos momentos. El principal mensaje de Feynman fue que solo se requería una imaginación fértil y pragmática para resolver problemas. Culminó su charla invitando a los presentes a que se motivara a las nuevas generaciones (preuniversitarias) a idear nuevos equipos, y por último ofreció un premio de 1 000 dólares de los Estados Unidos a quien miniaturizara el contenido de una página de un libro y fuera posible leerlo en un microscopio electrónico y otro premio por el mismo monto a quien construyera un motor eléctrico de 1/64 pulgadas cúbicas.

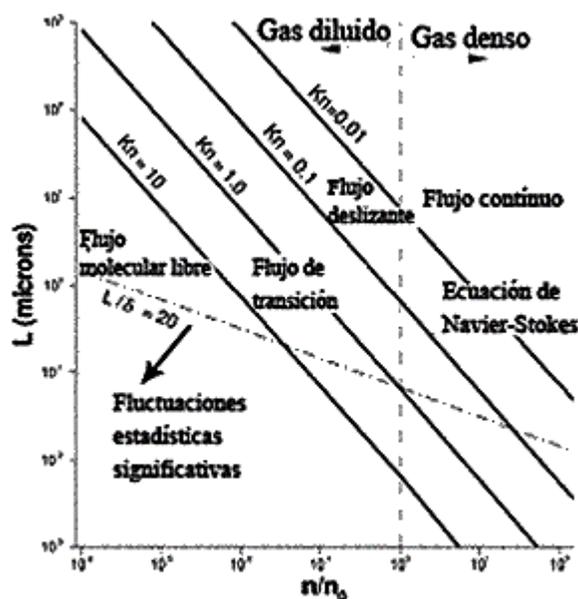
**Creación de un gran equipo.** Inicialmente los ingenieros electrónicos y mecánicos que trabajaban en la tecnología de los MEMS, posibilitaron la construcción de los dispositivos microfluídicos gracias a la experiencia ganada con la microelectrónica. Luego, los investigadores de la mecánica de fluidos fueron atraídos por los nuevos fenómenos que podían ser estudiados y empleados a esas pequeñas escalas. Los matemáticos y programadores tuvieron en poco tiempo enormes cantidades de modelos que programar y demostrar, con lo que se ampliaron aún más las posibilidades de códigos de modelación de fluidos. Para poder verificar los modelos fue necesario fabricar nuevos tipos de sensores y sistemas de medición, lo que incrementó el grupo de científicos consagrados a esta tarea. En poco tiempo los biólogos y químicos se percataron de cómo las fronteras de la ciencia se iban adentrando en senderos desconocidos hasta el momento, y descubrieron que podían realizar numerosas investigaciones, para lo cual se alistaron en la carrera de los microfluidos.

**¿Quién tiró la primera piedra?** Un buen número

de científicos considera que los trabajos fundamentales de microfluidos comenzaron alrededor del año 1846 con un artículo publicado por Poiseuille<sup>11</sup>. Los diámetros de los tubos empleados por él se encontraban entre los 30  $\mu\text{m}$  y 150  $\mu\text{m}$ , y aunque encontró ecuaciones y comportamientos de gasto másico, caída de presión, etc., todavía hoy utilizados, no tenía idea de la existencia de la viscosidad como propiedad física de los fluidos.

Knudsen investigó el flujo de gases en capilares y descubrió la transición al flujo molecular libre<sup>12</sup>. El primer experimento conocido de fluidos en microcanales fue realizado por Gaede en 1913<sup>13</sup>, quien logró ubicar dos placas paralelas a 4  $\mu\text{m}$  de separación para observar el flujo de hidrógeno. Descubrió un decrecimiento de un 50% del flujo al pasar del valor de flujo molecular libre, y un incremento posterior al elevar la diferencia de presión, lo cual contradecía los convencionalismos de la época. Recientemente, los primeros trabajos sobre flujos en microcanales fueron reportados con  $0.50 < \text{Re} < 20$ <sup>14</sup>,<sup>15</sup> (ver definición de Re más adelante). Desde entonces la complejidad e interconexión de la temática de los fluidos con otras ciencias ha ido incrementándose asombrosamente.

Los primeros trabajos relacionados con la transferencia térmica en microcanales para el enfriamiento de microchips (que datan de inicios de la década de 1980), develaron divergencias notables entre los trabajos de diversos autores<sup>16</sup>.



**Figura 3.** Límites de aproximaciones para la modelación de microflujos gaseosos. El eje de las x corresponde al número de densidad normalizado con respecto a las condiciones atmosféricas. Las líneas que definen los diversos números de Knudsen son para el aire en condiciones isotérmicas a T=273 K. Las fluctuaciones estadísticas son significativas por debajo de 20, (ref. [34]).

En realidad no existe un consenso sobre el momento

exacto en que se comenzó a hablar de microfluidos propiamente. No obstante, el esquema de la figura 3 puede dar una noción de las escalas y tamaños aproximados de los objetos que se comentan en este trabajo.

### 3 Principios físicos, ecuaciones y dispositivos

Hasta el 2002, las principales características del desarrollo de microfluidos estaban dadas por dos aspectos esenciales: el condicionado por las aplicaciones y las nuevas tecnologías de microfabricación (ref [4]). En los años ochenta y hasta mediados de los noventa, la estrategia en microfluidos era la miniaturización de equipos convencionales de control y bombeo de fluidos (bombas, válvulas, sensores, etc.). El material más empleado era el silicio dada la amplia experiencia en el maquinado y técnicas de fabricación adquiridas en la microelectrónica.

Ahora bien, a medida que se disminuyen las dimensiones de los microdispositivos, la relación superficie/volumen (que varía con inverso de la Longitud característica del sistema  $l/L$ , por ejemplo, el ancho del microcanal) crece considerablemente. Por lo tanto, las fuerzas viscosas comienzan a ejercer mayor influencia y es imposible lograr que una bomba o un actuador mecánico puedan realizar las mismas funciones que sus pares convencionales. Al encarar esta situación, y para poder suplir la demanda de aplicaciones biológicas, comenzaron a realizarse estudios de nuevos materiales de construcción compuestos por microdispositivos (por ejemplo, siliconas y plásticos compatibles con los sistemas biológicos), y surgieron nuevas formas de hacerlos funcionar.

De esta forma se estudian sistemas de bombeo no mecánicos con partes inmóviles o el tradicional gradiente de presión a partir de chorros, microcanales o fuerzas cortantes (como los acelerómetros)<sup>18</sup>. En estos casos, las principales pérdidas de energía no se deben a vibraciones o fatigas térmicas, sino a la fricción. Se comenzó también a utilizar el bombeo electrocinético (electroósmosis se entiende por fluido en movimiento relativo a cargas estacionarias; dielectroforésis: movimiento de una interfaz como puede ser una partícula cargada en un campo eléctrico; los primeros trabajos que revelaron los efectos electrocinéticos datan del siglo XIX en experimentos con arcilla porosa<sup>19, 20</sup>), y la electromojabilidad (variación de la tensión superficial al aplicar un campo eléctrico o magnético), condicionada por fuerzas de tensión o mojabilidad, fuerzas centrífugas, sonido y otras más (ref [1]). En la tabla I se resumen algunos de estos casos.

**Números adimensionales.** Una particularidad de los microfluidos es el valor pequeño que tiene el número adimensional de Reynolds:

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (1)$$

Donde  $U$  [ $m/s$ ] es la velocidad característica (por ejemplo la promedio),  $L$  [ $m$ ] es una longitud característica (ancho del canal) y  $\nu$  [ $m^2/s$ ] la viscosidad cinemática. Este número expresa la relación entre las fuerzas inerciales sobre las viscosas, y en las aplicaciones de microfluidos

el numerador suele ser muy pequeño, mientras que un valor típico de viscosidad cinemática como la del agua es  $10^{-6} m^2/s$ . Los valores de  $Re$  suelen ser del orden de la unidad o menores, lo que indica que el comportamiento laminar estará presente en la mayoría de los dispositivos de microfluidos (por ejemplo, perfil de velocidad parabólico en flujos debido a gradientes de presión y perfil plano en flujos electro-osmóticos).

Para ilustrar cómo las dimensiones en la microescala pueden influir en cuanto al modelo de cálculo de Dinámica de Fluidos presentamos la ecuación de Navier-Stokes en su forma diferencial:

$$\rho(x) \left( \frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu(x)(\nabla u + \nabla u^T)) + \rho(x)g \quad (2)$$

$$\forall \Omega \subset \mathbb{R}^2, x \in \Omega$$

**Tabla I**  
Fuerzas principales en microfluídica<sup>a</sup>

Fuerzas y campos	Subcategorización	Comentarios; Referencias representativas
Gradiente de presión $\nabla p$		Casos familiares, como fluidos en tubos, empleo de paredes deformables en bombas peristálticas.
Efectos capilares	Tensión superficial, $\gamma$	Diferencia de presión capilar
	Térmicos	b
	Eléctricos (electrocapilaridad)	c, d
	Gradiente de tensión superficial $\nabla \gamma$	Capas delgadas
	Químicos	e
	Térmicos	f
	Eléctricos	
Campo eléctrico $E$	Ópticos	Materiales fotosensibles
	CD electro-osmosis	Campo de velocidad uniforme
	CA electro osmosis	Fluidos rectificadores
Campo magnético y Fuerza de Lorentz	Dielectroforesis	Respuesta $\alpha \nabla E^2$
	Agitación magnetohidrodinámica	g
Rotación	Fuerzas centrífugas	h
Sonido	Corriente acústica	i

a) Tomado en parte de [4]; b) ref. [21]; c) ref. [22]; d) ref. [23]; e) ref. [24]; f) ref. [25]; g) ref. [26]; h) ref. [27]; i) ref. [28]

El primer término a la izquierda se refiere a la variación temporal y al término advectivo\* de la velocidad, multiplicados por la densidad en función de la posición. Al lado derecho de la ecuación se plantean inicialmente el gradiente de presión, el término de disipación viscosa

\* Término usado en matemáticas para indicar la variación de un escalar en un punto dado por efecto de un campo vectorial.

relacionado con el gradiente de velocidad y finalmente el término asociado a fuerzas volumétricas (como puede ser la gravitatoria). Evidentemente, el término advectivo (que tiene un peso elevado en flujos turbulentos y le da el carácter no-lineal a la ecuación de Navier-Stokes) y el término de fuerzas, si se habla de la gravitatoria apenas tienen influencia debido a los pequeños valores de velocidad (generalmente los efectos gravitatorios en la microfluídica son insignificantes, como se muestra más adelante). Solamente quedan el término de disipación viscosa, gradiente de presión y variación temporal. Lógicamente, si se modela por ejemplo, el caso de desplazamiento de microburbujas en capilares, aparecerán otros términos de fuerza como puede ser el de tensión superficial.

En los casos en que el fluido sea líquido, para la resolución de la ecuación de Navier-Stokes pueden aplicarse sin grandes problemas las condiciones iniciales y de frontera clásicas (incompresibilidad y condición de velocidad nula del fluido en las fronteras inmóviles). Ahora bien, se debe tener cuidado con las características de las superficies, pues mientras más estrecho sea el canal la rugosidad de las paredes puede afectar considerablemente las condiciones del flujo.

Sin embargo, cuando se trata de flujos de gases, hay fenómenos que no pueden ser descritos por las ecuaciones clásicas de la dinámica de fluidos, ni se pueden aplicar las condiciones de frontera habituales (velocidad cero en las paredes). Se sabe que las moléculas de los gases tienen un recorrido libre medio  $\lambda$  [m] considerablemente superior al de los líquidos. Por eso se emplea otro número adimensional que permite catalogar los flujos y determinar el cambio de comportamiento de la sustancia, del continuo al molecular. El número de Knudsen se calcula como la relación entre  $\lambda$  y una longitud característica (por ejemplo, ancho o largo del canal) L:

$$Kn = \frac{\lambda}{L} \quad (3)$$

En las aplicaciones de fluidos en conductos con dimensiones normales (conducto de aire acondicionado como ejemplo), el valor de Kn es cercano a cero. A medida que el diámetro del conducto disminuye,  $\lambda$  empieza a ser comparable y pudiera ocurrir que las moléculas pasen a través del microcanal sin interactuar entre sí o con las paredes del conducto (ver figura 3).

Se ha demostrado experimentalmente que la condición de velocidad cero en las paredes no es válida para flujos gaseosos en microcanales, entre otros sucesos anómalos. Por consiguiente, ha sido necesario introducir condiciones de deslizamiento del fluido en las paredes. El comportamiento anómalo de fluidos cercano a las fronteras ha sido corroborado además numéricamente a partir de simulaciones donde se demuestra que existe una distribución singular de densidad de moléculas debido a la interacción de las moléculas del líquido con las de las paredes.

**Fenómenos singulares.** Puesto que la influencia de la relación Superficie/Volumen aumenta a medida que

las dimensiones de los canales se reducen, se hace muy difícil realizar actividades tan comunes como la mezcla de dos sustancias o la dispersión de una en otra, debido fundamentalmente a las fuerzas viscosas que dificultan la mezcla de dos sustancias diferentes. Por lo tanto, se han desarrollado varios diseños de mezcladores que tratan de mejorar el mezclado entre dos sustancias (ref [1]). Existen mezcladores de burbujas, y otros que incluyen la modificación de las superficies de los canales al producir flujos en las tres dimensiones de características muy complejas, como se muestra en la figura 4.<sup>29</sup>

En lo referente a la modificación de superficies, se ha llegado a conocer la existencia de un efecto de “Fakir”, o super-hidrofobicidad, como se muestra en la figura 5.<sup>30</sup>

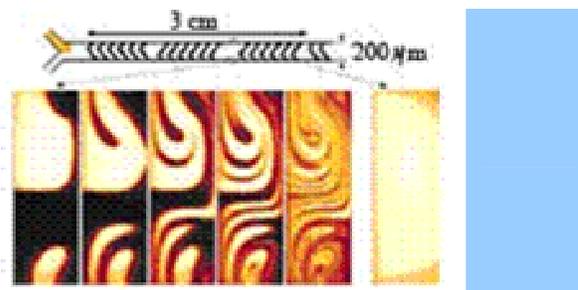
Por otro lado, el efecto de las fuerzas viscosas puede ser empleado en beneficio de aplicaciones específicas como los sensores “T”, que consisten en una geometría simple en la que dos canales se combinan a 90° y se pueden realizar múltiples experimentos, mediciones y aplicaciones.<sup>31</sup>

Para caracterizar las relaciones entre el movimiento convectivo y la difusión molecular se define el número de Peclet:

$$Pe = \frac{uL}{D_m} \quad (4)$$

Aquí  $D_m$  es el coeficiente de difusión molecular. Típicamente  $u=0.1-1$  cm/s,  $h=10^{-3}-10^{-2}$  cm, y  $D_m=10^{-7}-10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/s, donde los valores menores corresponden a las macromoléculas, como las proteínas. Así Pe oscila entre  $10-10^5$ . En los sensores “T” las sustancias se mezclarán fundamentalmente debido al movimiento difusivo en la interfaz. También puede ser empleada para estudiar reacciones químicas como el cambio de pH de una reacción<sup>32</sup>, e inclusive para la realización de análisis de inmunoensayos (DIA, Difusion Immunoassay).<sup>33</sup>

**Flujos multifásicos.** Al igual que en los sistemas macroscópicos, se emplea frecuentemente la mezcla de dos o más sustancias, ya sean líquido/gas, líquido/sólido, gas/sólido o líquido/líquido. Estos casos son sumamente complejos pues se pueden dar muchas combinaciones de situaciones difíciles de controlar.



**Figura 4.** Canal con paredes modificadas para lograr un mejor mezclado. Se aprecia el mismo fluido con tinte y sin él luego de fluir en contacto con las paredes, (ref [29]).

Muchas veces al bombear dos fluidos, en dependencia de la mojabilidad de estos, puede suceder que una de las

fases englobe completamente a la otra y se forme un flujo anular alrededor de una burbuja alargada. Generalmente en estos casos la superficie común es inestable, se rompe, y forma un tren de gotas (slug flow) <sup>35</sup> (ver la figura 7).

En estos casos el número adimensional que más se emplea para caracterizarlos es el número de capilaridad:

$$Ca = \frac{U\mu}{\gamma} \quad (5)$$

Donde  $\mu$  [kg/m.s] es la viscosidad dinámica y  $\gamma$  [N/m<sup>2</sup>] es la tensión interfacial. Otro número que en algunos casos puede ser importante es el número de Bond, que relaciona la diferencia de densidades ( $\Delta\rho$ ), la gravedad, la dimensión característica (que puede ser el diámetro de la burbuja) y la tensión superficial:

$$B = \frac{\Delta\rho g L^2}{\gamma} \quad (6)$$

Esta fórmula permite analizar los efectos gravitacionales sobre sistemas con diferentes densidades, aunque en la práctica los efectos de la gravedad en los sistemas de microfluidos pueden ser despreciados.

#### 4 Modelación de microfluidos

En la ref. [34] se puede apreciar todo lo referido a los fundamentos y elementos principales para la modelación de microfluidos y se hace una división evidente entre flujo de gases, líquidos y partículas.

- Gases: Se debe tener en cuenta el efecto de rarefacción, las condiciones de deslizamiento en las paredes a medida que el número de Kn crece, la compresibilidad, el calentamiento viscoso y la crepitación térmica (transpiración, moléculas que viajan de zonas cálidas hacia las más frías).

- Líquidos: No en todos los casos se puede utilizar modelos continuos y, por tanto, existen modelos atomísticos. Puesto que puede ocurrir deslizamiento en las paredes, hay que tener en cuenta los efectos de la mojabilidad (hidrofobicidad e hidrofiliidad), la adsorción y la electrocinética.

Incluso se debe tener en cuenta la deformación de los canales con el flujo, la variación de la temperatura o las propiedades de mojabilidad de la sustancia (siliconas que pueden hincharse al entrar en contacto con el agua).

Uno de los grandes retos para la solución numérica de las ecuaciones que describen el comportamiento de fluidos descrita por la ecuación de Navier-Stokes mencionada *supra*, es que en pocos casos hay una solución analítica <sup>36</sup>. Para la simulación de líquidos y gases hay varios métodos específicos y en ambos casos pueden ser atomísticos o continuos. En el caso de los gases, los métodos atomísticos más empleados son: DSMC (Direct Simulation Monte Carlo), Boltzmann, y Lattice Boltzmann. Los métodos continuos para líquidos y gases más empleados son: Spectral Elements, Finite Elements, Finite Volume, Boundary Element, Meshless y Force Coupling. Por último, para los líquidos según la concepción atomística se utilizan la Dinámica Molecular, Lattice

Boltzmann y Dissipative Particle Dynamics.

Las modelaciones pueden llevarse a cabo al nivel físico o al nivel de sistema. El primero busca resolver el comportamiento real en tres dimensiones del continuo a partir de discretizaciones masivas del dominio de que se trate.

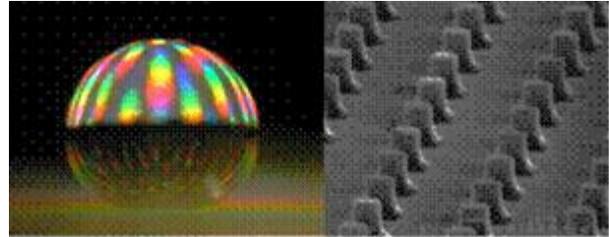


Figura 5. Efecto de super-hidrofobicidad y modificación de superficie con micropilares, (ref. [30]).

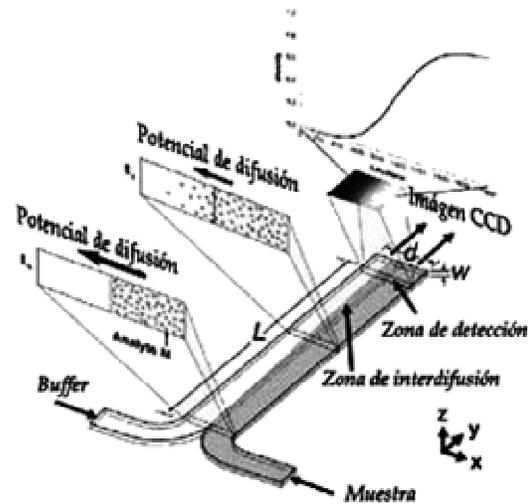


Figura 6. Esquema de difusión en un sensor "T" (ref. [31]).

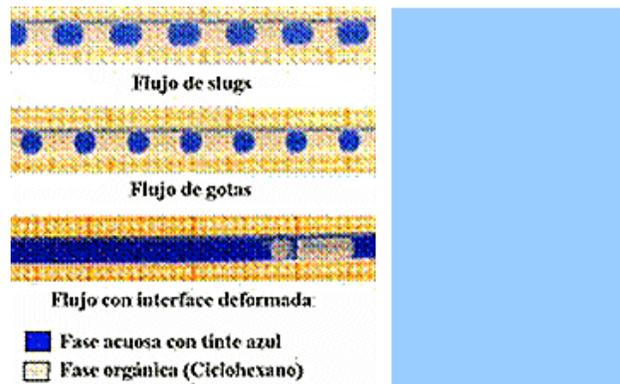


Figura 7. Patrones de fluido identificados en un capilar con escala milimétrica en el trasfondo (ref. [35]).

El nivel físico tiene muchos grados de libertad, su implementación es compleja y su resolución es numérica, pero suele ser muy precisa. Por ejemplo, en relación con la figura 8, empleando la Dinámica de Fluidos Computa-

cional DFC (CFD en inglés), se reproduce el patrón interno de flujo multifásico expuesto en la figura 7.

La simulación a nivel de sistema contempla los componentes como cajas interconectadas con una resolución y grados de libertad bajos, por lo que suelen ser fáciles de implementar y calcular en computadoras. Son modelos análogos a los circuitos eléctricos que pueden ser modelados como conjuntos de ecuaciones diferenciales. Existen varios tipos de dominios energéticos (véase la figura 9).

## 5 Mediciones

El avance en los microfluidos ha ido aparejado al desarrollo de técnicas y métodos de medición. Los métodos ópticos han tenido una importancia considerable desde 1990, y abarcan una gran variedad, desde la simple inspección óptica hasta el empleo de micropartículas, moléculas marcadas, tintes, radiotrazadores y otros que brindan información fundamentalmente de la velocidad del fluido (velocimetría). En ese sentido, cabe señalar las versiones microscópicas de Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV) o la Anemometría Láser Doppler (LDA), que difieren en varios aspectos de las versiones convencionales, como en cuanto al tamaño de las partículas empleadas que son del mismo tamaño que la longitud de onda visible. Para mayor información, sírvase consultar ref. [37] y [4].

## 6 Conclusiones

La principal conclusión sobre la microfluídica es que, al ser una actividad relativamente nueva, hay una gran cantidad de caminos por explorar. Desde los materiales y métodos de fabricación, diseño de dispositivos, estudios teóricos y numéricos, aplicaciones insospechadas para problemas acuciantes de la humanidad, como el descubrimiento de nuevas vacunas y cura de enfermedades como el cáncer, el paludismo, el SIDA y otras. La microfluídica representa un reto para los científicos de hoy y los que se preparan para el futuro.

Los problemas que se avecinan requieren un enfoque multidisciplinario e integrador, como ha quedado demostrado por los avances ya logrados. En un dispositivo microfluídico es típico encontrar tecnología empleada en la microelectrónica, diseños copiados de la naturaleza, con sondas y sensores desarrollados para reacciones químicas complejas, sistemas ópticos avanzados para visualizar, y la omnipresente computadora para controlar y procesar datos.

Es de esperar que los avances logrados en los microfluidos abran la puerta a las aplicaciones de nanofluídica (materiales porosos, autoensamblaje, nanomodificación de superficies, etc.) que comienzan a llamar la atención.

Los microfluidos sirven ya como interfaz entre los dispositivos con escalas nanométricas y los equipos convencionales que los humanos podemos manipular.

Los avances en lo que llamamos la microfluídica han servido para impulsar investigaciones detenidas por falta de tecnología capaz de sondear tales pequeñas escalas.

Al respecto cabe mencionar estudios indirectos llevados a cabo sobre la turbulencia y la resistencia hidrodinámica en fluidos no-Newtonianos, coloides, y otros<sup>38</sup>. Pero, evidentemente, en el campo de las ciencias biológicas es donde el avance ha sido más significativo, y donde todavía se esperan nuevos descubrimientos y aplicaciones sobresalientes.

Si bien pocos científicos se han pronunciado sobre el impacto de la actividad de los microfluidos en el medio ambiente, esto debe cambiar en la medida en que aumente el impacto de los dispositivos microfluídicos.

Volviendo a las ideas del Profesor Feynman, no estoy seguro de si alguien ganó el premio, o cuantos lo reclamaron a la vez. Lo que sí puedo asegurar es que sus retos ya fueron vencidos y las nanotecnologías viables y cotidianas ya están a la vuelta de la esquina.

## Agradecimientos

La realización de este artículo no hubiera sido posible sin la cooperación de varios profesores y amigos como: J.G.E. Gardeniers, R. Luttge, S. Raghu, K.R. Sreenivasan, A. Beskok, S.T. Werely, H. A. Stone, T. Thorsen y A. Batista. También agradezco el apoyo anónimo de los árbitros de la Revista Cubana de Física y sus integrantes.

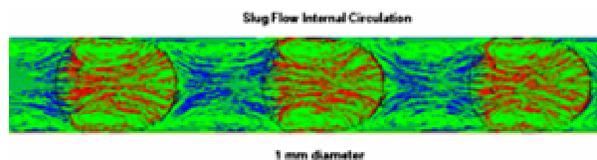


Figura 8. Resultados de cálculo de la circulación interna en burbujas (ref. [35]).

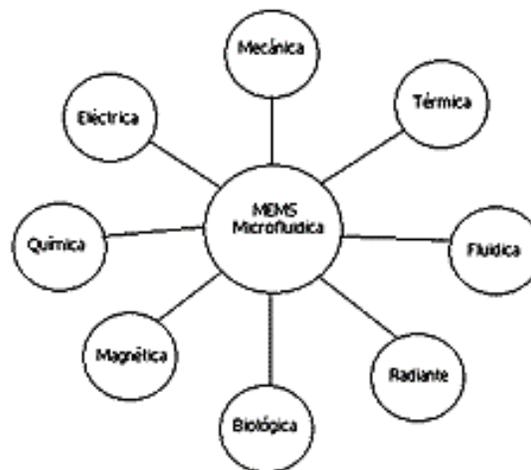


Figura 9. Dominios energéticos de la Microfluídica de Sistemas Micro-Electromecánicos, ref. [34].

## Referencias

1. H.A. Stone, Annu. Rev. Fluid Mech. 36:381–411 (2004).
2. A.P. Dowling, Nano Today, December, p.30. (2004).
3. A.S. Eddington in Nature of the Physical World. Cambridge Univ. Press (1928).

4. N.T. Nguyen and S.T. Wereley. *Fundamentals and Applications of Microfluidics*. Artech House microelectromechanical system series. (2002).
5. D.Li, *Microfluidics and Nanofluidics*, 1:1-1 (2004).
6. A. Manz, N. Graber and H. M. Widmer. *Sensors and Actuators*, BI 244-248 (1990).
7. G.S. Settles, *Annu. Rev. Fluid Mech.*38:87–110 (2006).
8. Proyecto Nanotecnología, *Elementos Iniciales para el Análisis sobre la Nanotecnología en Cuba*, OCCyT (2002).
9. I. Alonso y A. Avendaño, *Correteando entre átomos*, Bohemia, 6 de junio de 2006.
10. R.P. Feynman, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 1, No. 1: 60-66, (1992).
11. J.M.L. Poiseuille, *Sciences Mathématiques et Pyisiques*, 9:433-545, (1846).
12. M. Knudsen, *Ann. Phys.*, 33:1435-1448, (1909).
13. W. Gaede, *Annalen der Physik*, 41:289 (1913).
14. J. Pfahler, J. Harley, H. Bau and J. Zemel, *Am. Soc. Mech. Eng. J.* 32 49–59 (1991)
15. J.C. Harley, Y. Huang, H.H. Bau and J.N. Zemel, *J. Fluid Mech.*, 284:257-274 (1995).
16. C.B Sobhan and S.V. Garimella, *Microscale Thermophysical Engineering*, 5:293–311, (2001).
17. S.T. Wereley. *ICTP Short course on Microfluidics*. (2005).
18. A. Beskok, GE. Karniadakis, W. Trimmer. *J. Fluids Eng.* 118:448–56 (1996).
19. F.F. Reuss, *Sur un nouvel effet de lélectricité galvanique*. *Memóires de la Societé Imperiale de Naturalistas de Moscou*, 2:327-337 (1809).
20. G. Wiedmann, *Pogg. Ann.*, 87:321 (1852).
21. T.S. Sammarco and MA. Burns. *AIChE J.* 45:350–66 (1999).
22. M.G Pollack, Fair RB, and A.D..Shenderov, *Appl. Phys. Lett.* 77:1725–26 (2000).
23. M.W.J. Prins, WJJ. Welters and JW. Weekamp, *Science* 291:277–80 (2001).
24. B.S. Gallardo, V.K. Gupta, F.D. Eagerton, L.I. Jong, V.S. Craig, et al. *Science* 283:57–60 (1999).
25. D.E. Kataoka and S.M. Troian. *Nature* 402:794–97 (1999).
26. H.H. Bau, JH. Zhong, MQ. Yi. *Sens. Actuators B* 79:207–15 (2001).
27. R.D. Johnson, I.H.A. Badr, et al. *Anal. Chem.* 73:3940–46 (2001).
28. P. Marmottant, *J. Fluid Mech.*, 568, 109–118 (2006).
29. A.D. Stroock, Dertinger SKW, Ajdari A, Mezic I, Stone HA, Whitesides GM. *Science* 295:647–51 (2002).
30. J. Bico, C. Marzolin and D. Quéré, *Europhys. Lett* 47, 220 (1999).
31. A. Hatch, E. Garcia and P. Yager, *Proc.IEEE* 92, 126-139 (2004).
32. B. H.Weigl, y Yager, P. *Sensors and Actuators B-Chemical* 39: 452-457 (1997).
33. A. Hatch, Kamholz, A.E., Hawkins, K.R., Munson, M.S., Schilling, E.A., Weigl, B.H. and P. Yager, *Nature Biotechnology*, 19(5): 461- 465 (2001).
34. G. Karniadakis, Beskok, A., Aluru, N., *Microflows and Nanoflows, Fundamentals and Simulation. Interdisciplinary Applied Mathematics*. Springer Verlag. (2005).
35. M. N. Kashid, D. Fernandez Rivas, D.W. Agar and S. Turek, *Asia-Pac. J. Chem. Eng.* 3: 151–160 (2008).
36. *Research in Fluid Dynamics: Meeting National Needs*. A report of the U.S. National Comitee on Theoretical and Applied Mechanics ([www.usnctam.org](http://www.usnctam.org)) Winter (2006).
37. D. Sinton, *Microscale flow visualization, Microfluid Nanofluid* 1: 2-21 (2004).
38. D. Fernández Rivas, *Transición temprana a la turbulencia debido a la adición de polímeros*, Master Thesis, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, InSTEC, Havana, Cuba (2006).