

4. Tipos de dispositivos

Dentro de los dispositivos nebulizadores flow focusing existen dos tipos, los nebulizadores simples y los múltiples.

4.1. Dispositivos simples

Consisten en un solo cilindro y un solo orificio de placa de salida. En este caso, se enfoca un solo chorro. Engloba tanto la producción de partículas simples, como de partículas complejas.

Como ejemplo de nebulizadores simples, podemos ver los realizados, por ejemplo, en acero mediante técnicas convencionales de mecanizado, los realizados en silicio mediante técnicas de fabricación microelectrónica, y los realizados en polímeros. A continuación se pasa a comentar cada uno de ellos, mostrando sus ventajas y sus principales inconvenientes.

a) Tipos de nebulizadores simples en función del proceso de fabricación.

a.1. Mediante técnicas convencionales de mecanizado

Mediante las técnicas convencionales de mecanizado, por ejemplo, taladrado, fresado, etc. Es posible hacer dispositivos simples de acero y polímeros para la generación de micropartículas. En la figura siguiente, Fig.6, se observan algunos de estos dispositivos.



Fig.6.A la derecha un nebulizador simple flow focusing de acero con sus conectores. A la izquierda 8 nebulizadores simples realizados en un polímero. Ambos han sido fabricados mediante técnicas convencionales de mecanizado

Ventajas:

- 1) La principal ventaja en la realización de estos dispositivos es el extenso conocimiento y experiencia que se tiene hoy en día en las técnicas convencionales de mecanizado.
- 2) La utilización de máquinas de control numérico que hacen posible la automatización de la fabricación reduciendo el tiempo de producción.
- 3) Son dispositivos desmontables, es decir, pueden ser abiertos para su limpieza por ejemplo, en caso de obturación.

Inconvenientes:

- 1) Puesto que la realización del dispositivo se hace por partes, es necesario alinear con mucha precisión el cilindro con el orificio de la placa de salida, del orden de unas pocas micras. Esta alineación hay que hacerla manualmente, por lo que el tiempo de realización aumenta considerablemente. Además de la alineación es necesario hacer el montaje completo del dispositivo, no sólo se trata de la parte fabricada, posteriormente es necesario acoplarle los elementos comentados en la figura anterior.
- 2) Son dispositivos grandes comparados con las dimensiones con las que trata la microfluídica. Es decir, podrían ser teóricamente más pequeños, pero las técnicas convencionales de mecanizado hacen que esta tarea sea difícil.

a.2. Mediante técnicas microelectrónicas.

En este apartado nos centramos en la fabricación en silicio. Utilizando técnicas microelectrónicas como la fotolitografía, el RIE, el DRIE, etc. es posible la realización de dispositivos simples generadores de micropartículas en régimen monodisperso. En la siguiente figura, Fig.7, puede observarse la foto de un chip que contiene varios dispositivos flow focusing.

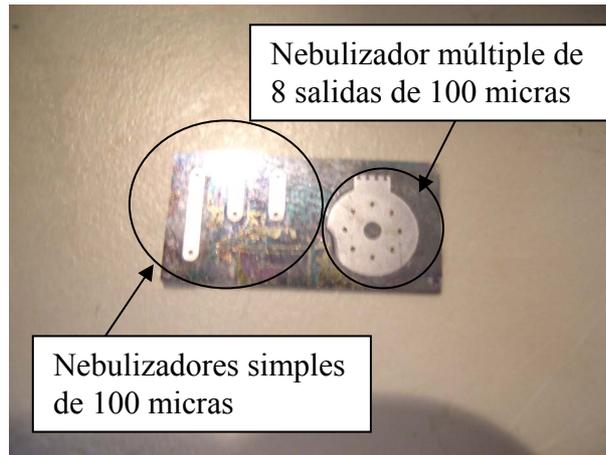


Fig.7. En el chip rectangular se pueden ver, a la izquierda, tres nebulizadores simples realizados en silicio. Dos de ellos con la misma longitud de cámara de remanso y otro con una cámara de remanso mayor. A la derecha se observa un nebulizador múltiple de 8 salidas distribuidas en círculo. A todos estos dispositivos les falta la placa de salida.

Ventajas:

- 1) La posible realización de gran cantidad de dispositivos al mismo tiempo, gracias al aprovechamiento de una oblea de silicio, en la que mediante un mismo proceso de fabricación es posible definir todos los dispositivos que en ella quepan, lo que provoca una reducción en el tiempo de producción. Además, el coste de realizar un solo dispositivo es exactamente el mismo que el coste de rellenar la oblea completa de dispositivos. Por ejemplo, el coste de hacer un dispositivo simple sería el mismo que el de realizar 500 dispositivos de exactamente las mismas características.
- 2) Debido a que la microelectrónica, y centrándonos en la tecnología MEMS, trata desde sus comienzos con dimensiones del orden de las micras, el acabado dimensional que tiene el dispositivo es muy bueno, superando al del acero. Y además, el tamaño del dispositivo final puede ser reducido.
- 3) Al igual que con las técnicas convencionales de mecanizado, existe una amplia experiencia en el desarrollo de estos tipos de procesos de fabricación, aunque bien es cierto que dichos procesos no están tan extendidos y no son usados por el mismo número de laboratorios que en el caso de mecanizado convencional.
- 4) El problema de la alineación, en este caso, se reduce a la buena alineación de máscaras durante el proceso de fabricación. Por tanto, se elimina el hecho del alineamiento manual, uno a uno, de los nebulizadores.

Inconvenientes:

- 1) La realización de estos dispositivos en masa, hace que sea de vital importancia no cometer errores de diseño, puesto que no se estaría desperdiciando un solo dispositivo, se estaría desperdiciando la oblea completa. Además, habría un gasto en la realización de la máscara, por ser errónea. Y el consiguiente retraso de toda la producción.
- 2) Aunque los resultados obtenidos en laboratorio del dispositivo simple de silicio son alentadores, todavía no se ha visto el comportamiento de tales dispositivos en grandes tiradas.
- 3) El silicio es un material relativamente caro y con un proceso de fabricación bastante exigente, en cuanto a material necesario para realizar los nebulizadores. Esto hace que se este buscando nuevos materiales para su desarrollo.

a.3 Realización con materiales poliméricos.

La realización de dispositivos simples flow focusing en materiales poliméricos mediante técnicas no convencionales no está muy extendida hoy en día. A continuación se muestran algunas fotos de este tipo de nebulizadores [11-12].

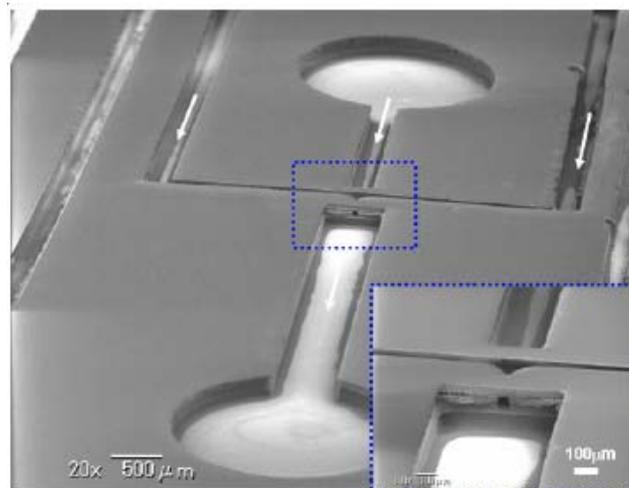


Fig.8. Nebulizador simple 3D flow focusing realizado en un polímero.

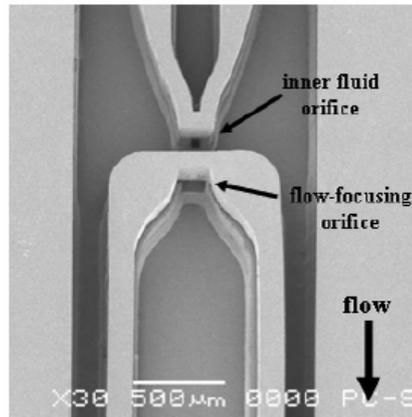


Fig.9. Nebulizador flow focusing de partículas complejas 3D realizado en un polímero

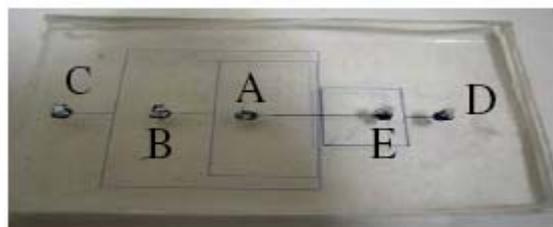


Fig.10. Otro ejemplo de nebulizador flow focusing realizado en polímero

Los nebulizadores simples mostrados en la figura son los correspondientes a flow focusing tanto tridimensional como plano. Sin embargo, todas esas configuraciones son difícilmente integrables en un dispositivo múltiple mediante un mismo proceso de fabricación, lo que le daría valor en el aspecto económico.

Ventajas:

- 1) La posibilidad de realizar dispositivo en masa aprovechando el área de la oblea. Esta ventaja es compartida con los dispositivos de silicio.
- 2) La fabricación de estos dispositivos es de un tiempo menor que las anteriormente vistas.
- 3) El acabado de los bordes de las paredes, podría ser en principio un problema, pero para algunos polímeros se pueden utilizar unos dispositivos en su proceso de fabricación que dan un acabo muy bueno, comparable al del silicio.
- 4) La alineación sigue siendo un problema que se reduce a la alineación entre máscaras.

- 5) Al ser algunos de los polímeros biocompatibles, pueden ser utilizados en aplicaciones médicas.
- 6) Los materiales de este tipo son de bajo coste y suponen una buena alternativa como material de fabricación para sustituir al silicio.

Inconvenientes:

- 1) Poca investigación. De momento existe poca investigación sobre materiales poliméricos para la tecnología MEMS, lo que provoca que algunos de ellos estén poco desarrollados. Como por ejemplo el FL55GN.
- 2) Menor resistencia a disolventes orgánicos. Ésta es la gran desventaja de los materiales poliméricos, son muy sensibles a los disolventes orgánicos.

4.2. Dispositivos múltiples

Los dispositivos nebulizadores múltiples son aquellos en los que se produce el enfoque de más de un chorro. El esquema general de un dispositivo múltiple es una extensión, por repetición de nebulizadores simples. La idea es que su elaboración se realice en un único proceso de fabricación. Dicha configuración se puede ver en la figura siguiente:

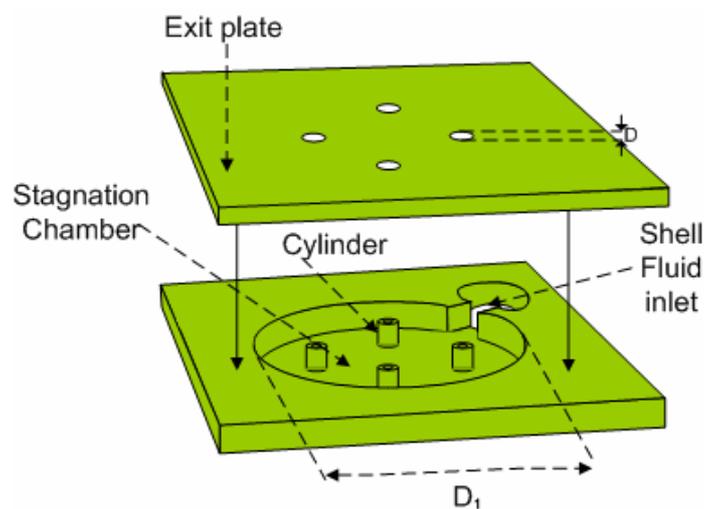


Fig.11. Esquema de un nebulizador múltiple flow focusing. En la figura pueden verse todas las partes de la que consta el nebulizador

En el caso de los dispositivos múltiples, debido a su escaso desarrollo, se centran, de momento, únicamente en generación de partículas simples.

La ventaja fundamental de este tipo de nebulizadores es la posibilidad de realizar una producción masiva de partículas. Pero tiene el inconveniente de ser poco estable, entendiendo dicha inestabilidad, como la producida por las diferencias dimensionales entre los parámetros característicos de los “nebulizadores simples” dentro del propio dispositivo múltiple. Es decir, cada cilindro, cada diámetro de placa de salida, y cada longitud H , serán distintas de un “nebulizador simple” a otro dentro del dispositivo múltiple. Esta diferencia vendrá determinada por las tolerancias del proceso de fabricación con el que se desarrolle el múltiple, y podrá hacer que los tamaños de gota producidos por cada cilindro sean diferentes, o incluso podrían provocar el no enfoque del chorro, debido a que el fluido enfocante se introduce en la cámara que alimenta los cilindros de fluido enfocado. Ambos efectos serán analizados más adelante.

En un principio se dijo que el diámetro de la partícula producida mediante la técnica flow focusing no dependía de la geometría, y así es para un dispositivo simple. En cuanto al múltiple, también se cumple esto, pero es necesario introducir en su diseño un sistema estructural como se verá cuando se analicen en detalle los efectos provocadores de las inestabilidades.

Al igual que en el caso de dispositivos simples, el múltiple ha sido realizado mediante técnicas convencionales de mecanizado y por técnicas de fabricación microelectrónica.

a) Estudio de la estabilidad en dispositivos múltiples.

En primer lugar, definimos inestabilidad en el dispositivo como el hecho por el que los diámetros de las gotas generadas son distintos entre salidas, o bien, porque no se produzca enfoque en alguno de los chorros de enfocado.

Esta inestabilidad será analizada en primer lugar mediante simulaciones para el caso del no enfoque del chorro, y posteriormente mediante experimentación para el caso en que los tamaños de las partículas son diferentes. Finalmente se verá la solución a la inestabilidad, y también se verá tanto en simulación como experimentalmente como se estabiliza el dispositivo.

a.1. Estudio mediante simulaciones (No enfoque)

Se considera un múltiple de cuatro salidas como el de la figura:

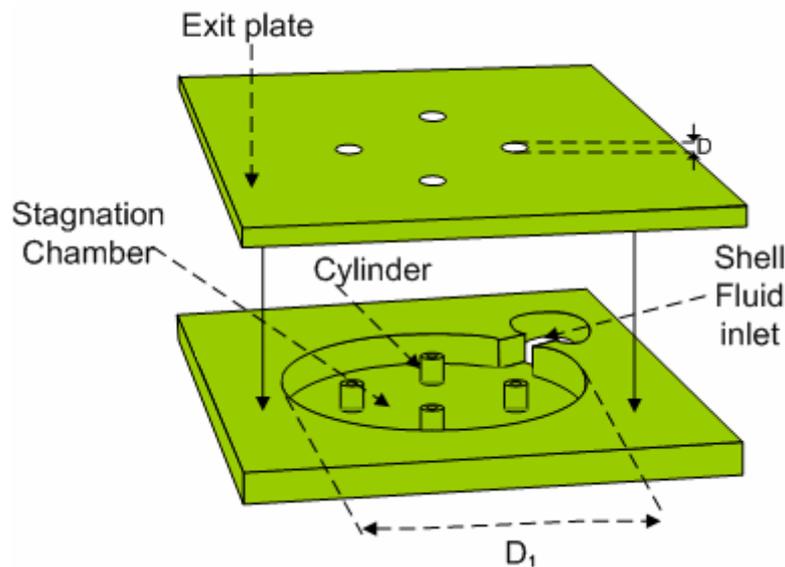


Fig.12. Esquema de un nebulizador múltiple flow focusing. En la figura pueden verse todas las partes de la que consta el nebulizador

En las simulaciones a realizar se introducen imperfecciones geométricas, en este caso, se varían los diámetros de la placa de salida, se les da valores de 90, 95, 100, 110 micras. Siendo el valor de diseño 100 micras y suponiendo un peor caso de tolerancia dimensional del 10%. Y se consideran los dos fluidos como líquidos.

Haciendo un barrido de simulaciones, se puede determinar la zona de transición entre comportamiento típicamente estable, y comportamiento inestable.

A continuación se puede ver una simulación en el que el comportamiento es estable, en el sentido de que se produce el enfoque de todos los chorros.

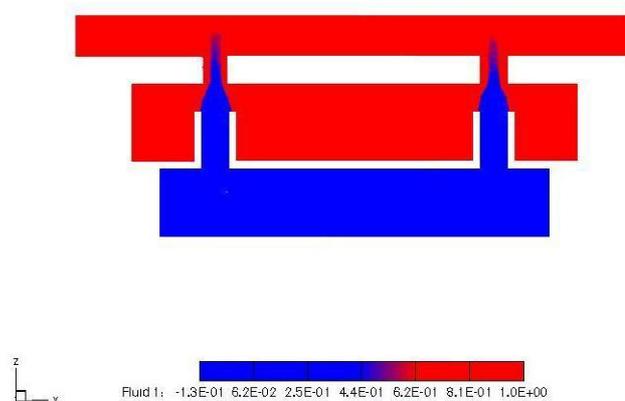


Fig.13. Sección de la simulación del comportamiento estable del dispositivo múltiple de la Fig.12. En azul se representa el enfocado y en rojo el enfocante.

En dicha simulación se representa el fluido enfocado en color azul y el enfocante en color rojo. Se comprueba que para los caudales introducidos se produce el enfoque de los dos chorros simultáneamente. Es preciso aclarar que la figura de la simulación se corresponde con una sección que corta dos cilindros, en particular, se representa el cilindro de menor diámetro D a la izquierda y el de mayor diámetro D a la derecha. Representando la sección correspondiente a los otros dos cilindros, se obtiene una figura idéntica a la anterior, comprobándose de esta forma que el enfoque se produce en todos los cilindros.

El comportamiento típicamente inestable de los dispositivos, puede verse en esta otra simulación.

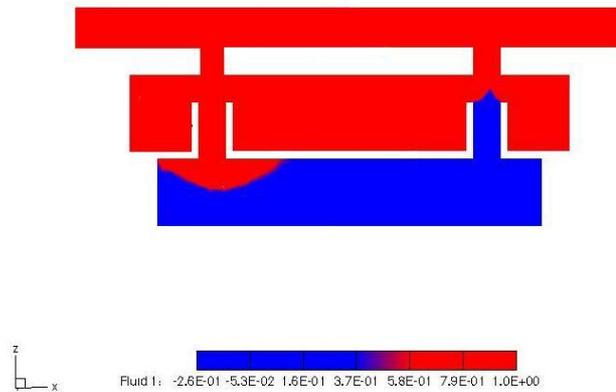


Fig. 14. Sección de la simulación del comportamiento inestable del dispositivo múltiple de la Fig. 12. En azul se representa el enfocado y en rojo el enfocante.

Al igual que en la simulación anterior, el cilindro de la derecha se corresponde con el de mayor diámetro $D = 110$ micras, y el de la izquierda con el de 90 micras. En este caso puede verse como el fluido enfocante, en rojo, se introduce en la cámara de reparto de fluido enfocado. Por otro lado, en el cilindro de la derecha puede verse como se produce el enfoque del chorro. El “no enfoque” se debe a que el enfocante encuentra más resistencia fluidica a salir por el orificio de la placa de salida que a introducirse por el cilindro por el que debería salir el enfocado, y por tanto el enfocante fluye por el interior del cilindro al encontrar menor oposición. Debido a esto, no sólo no se produce el enfoque, sino que en la cámara común de enfocado hay un volumen de enfocante. Este último hecho, junto con el recorrido que realiza el enfocante en la cámara de enfocado, esto es, el enfocante tiende a salir por el cilindro de mayor diámetro, hace que aunque se produzca el enfoque en dicho cilindro, no se tengan las gotas esperadas de enfocando en

el seno de enfocante puesto que el chorro estaría compuesto por enfocado y enfocante. Además, el desconocimiento de la cantidad de enfocante que se introduce por el cilindro agrava el problema, puesto que la determinación teórica tampoco sería posible. Por tanto, se puede concluir que dicha circunstancia, es decir, en no enfoque de un solo chorro produce la inutilidad de todo el dispositivo.

Haciendo más simulaciones se puede obtener la gráfica siguiente, en la que, entre las líneas azules se encuentra la zona de funcionamiento flow focusing, es decir, la zona de la gráfica entre las líneas de $We=8$ y $We=40$, la zona en la que la perturbación es axilsimétrica y la rotura de la gota es monodispersa.

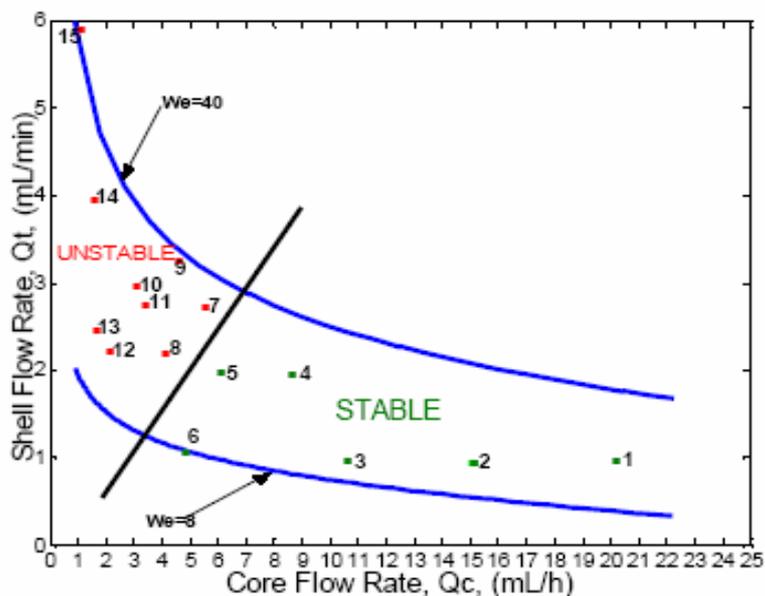


Fig.15. Gráfica de estabilidad del funcionamiento flow focusing del dispositivo de la Fig.12. La línea negra separa la zona de comportamiento estable e inestable.

En esta gráfica, en el eje X se representa el caudal de enfocado en mL/h, y en el eje Y el caudal de enfocante en mL/min. Los puntos de color verde, a la derecha de la línea negra, representan puntos de funcionamiento estable, es decir, en ellos se produce el enfoque de los 4 chorros. En particular el punto 1 se corresponde con la simulación de la figura-13. Por otro lado, los puntos de color rojo, a la izquierda de la línea negra representan la zona inestable, en la que en al menos unos de los cilindros no se produce el enfoque. El punto 10 es el representado en la simulación de la figura-14.

Puede observarse en la gráfica como, partiendo de la zona estable, a medida que se reduce el caudal de enfocado para un mismo caudal de enfocante el punto de

funcionamiento se mueve hacia la izquierda, acercándose a la zona inestable. Según la ecuación que relaciona el caudal con el salto de presiones, $\Delta P = \frac{128 \cdot \mu \cdot L}{\pi \cdot D^4} \cdot Q$, una reducción de caudal, manteniendo todo lo demás constante conlleva un decremento de presión. Por tanto, para llevar los puntos inestables a la zona estable es necesario aumentar esta diferencia de presiones para caudales de trabajo en los que inicialmente se tiene comportamiento inestable. Para ello se debe aumentar la resistencia fluidica. Dicho de otro modo, para impedir que el fluido enfocante penetre por el cilindro hacia la cámara de enfocado, es necesario aumentar la resistencia fluidica en dicho camino. Consiguiendo al mismo tiempo reducir la interacción entre las entradas de los cilindros. La solución propuesta [13] consiste en realizar una red de canales, en forma de estrella para aumentar de esa forma la resistencia fluidica. En la figura siguiente, Fig.16, se puede ver dicha red de canales.

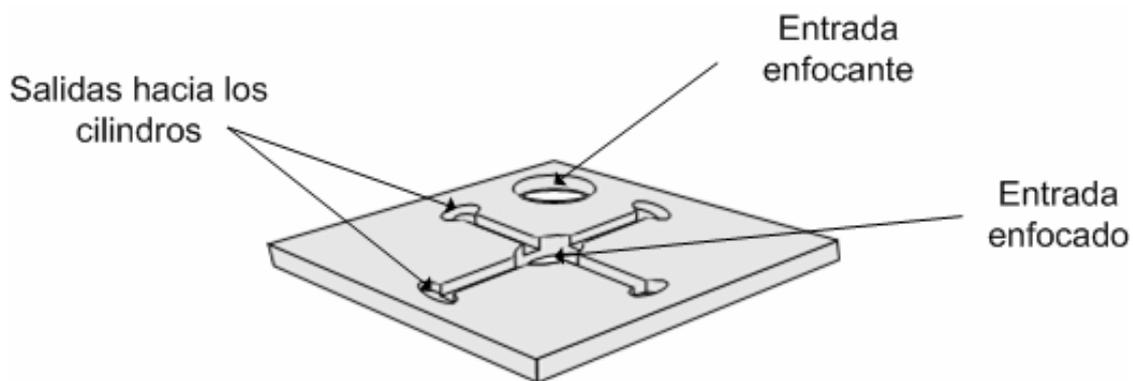


Fig.16. Solución propuesta para la mejorar la estabilidad del dispositivo de la Fig.12.

Esta figura va soldada a la parte inferior de la estructura de la Fig.12. El orificio central representa la entrada común de enfocado, dicho enfocado fluye por el sistema de distribución hasta llegar a la salida del mismo, que coincide con la entra de los cilindros de la Fig.12. El orificio de la parte superior es la entrada de enfocante y coincide con la entrada de enfocante de la Fig.12. Todo el conjunto forma el dispositivo múltiple completo.

Introduciendo esta estructura en la fabricación del dispositivo, se puede comprobar mediante simulaciones que la inestabilidad se suaviza. La simulación del comportamiento del dispositivo con la distribución de canales es la siguiente:

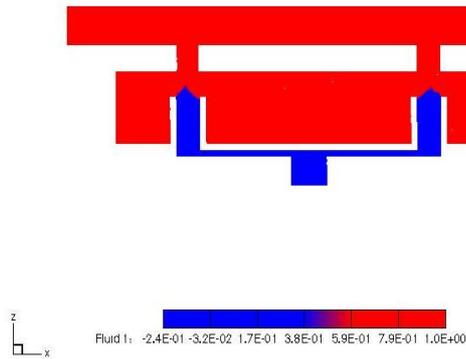


Fig.17. Sección de la simulación del comportamiento estable del dispositivo múltiple de la Fig.12 con la solución propuesta. En azul se representa el enfocado y en rojo el enfocante.

Dicha simulación corresponde al punto 10 de la gráfica. En este caso puede verse como se produce el enfoque de los dos chorros, y por tanto nos encontramos en una nueva zona estable gracias al sistema de distribución de caudal de enfocado. Es conveniente aclarar en esta simulación que, al tratarse de unos caudales de enfocando pequeños y de enfocante grandes el diámetro de chorro es muy pequeño, tan pequeño que para poder verlo en la simulación es necesario un mallado muy fino, y el consiguiente gasto en tiempo de simulación. Este gasto no merece la pena puesto que se está interesado en la consecución del enfoque en los cilindros, y esto se puede ver claramente en la simulación de la figura-17.

Por tanto, tras hacer las mismas simulaciones que en el caso de la gráfica que se vio anteriormente correspondiente en la figura 15 se puede comprobar que dicha gráfica se transforma en esta otra que se observa a continuación, Fig.18:

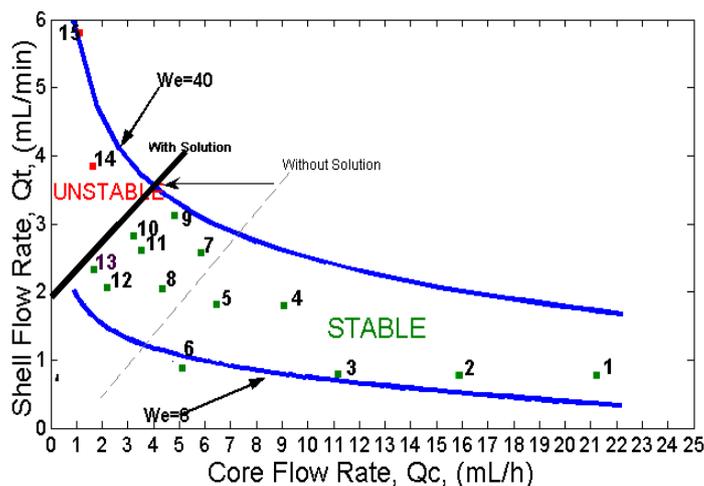


Fig.18. Gráfica de estabilidad del funcionamiento flow focusing del dispositivo de la Fig.12 con la solución propuesta. La línea negra separa la zona de comportamiento estable e inestable. La línea gris se corresponde con la antigua separación sin la solución.

En la gráfica, el caudal de enfocado se representa en el eje X y el de enfocante en el Y. Puede verse como la línea de separación entre la zona estable y la inestable se desplaza hacia la izquierda con respecto al de la figura-15. De esta forma, los puntos del 7 al 13 pasan a ser estables y los correspondientes del 1 al 6 se mantienen estables, y por tanto se produce un aumento de la zona de funcionamiento flow focusing en cuanto a enfoque, y sería posible la generación de partículas de menor tamaño.

a.2. Estudio experimental (Tamaños de gota)

A continuación se estudia el hecho en que, produciéndose enfoque de todos los chorros, los diámetros de las partículas difieren de una salida a otra. El estudio se realiza para generación de gotas, es decir, el enfocado es un líquido, agua destilada en este caso, y el enfocante es aire.

Para realizar estos experimentos se toma un dispositivo múltiple de silicio con dos salidas. Se miden los tamaños de gota, para una presión de 215 mbar, y un rango determinado de caudales. Los resultados experimentales obtenidos fueron los siguientes:

Q (mL/h)	da (micras)	dt (micras)	db (micras)	%A	%B	da/db
2	drip	-	-	-	-	
3	16.71	24.03	24.70	69.53	97.28	0.677
4	21.26	27.75	31.75	76.61	87.40	0.669
5	26.79	31.02	35.44	86.36	87.53	0.756
6	29.14	33.98	37.65	85.76	90.25	0.774
7	32.45	36.71	49.67	88.39	73.90	0.6533
8	36.50	39.24	41.30	93.01	95.01	0.8837
9	39.58	41.62	43.34	95.10	96.03	0.9132
10	41.52	43.87	46.29	94.62	94.77	0.8970
12.5	47.43	49.05	52.28	96.70	93.82	0.9072
15	53.15	53.33	58.31	99.66	91.46	0.9115
17.5	57.19	58.04	63.17	98.53	91.88	0.9005
20	62.86	62.04	68.88	98.70	90.07	0.9120
22.5	71.85	65.81	74.41	91.59	88.44	0.9656
25	74.33	69.37	76.75	93.33	90.38	0.9685

En esta tabla, la primera columna es el caudal de enfocado que circula por un cilindro individual, en este caso se supone que circulan caudales iguales por los dos cilindros. El parámetro *da*, es el diámetro de gota medido por uno de los orificios (Orificio-A), mientras que *db*, es el diámetro de gota medido por el otro orificio (Orificio-B). El valor

d_t es el diámetro de gota teóricamente esperado. %A representa como se aproxima d_a al valor teórico, %B representa lo mismo para el orificio-B. d_a/d_b , es la relación entre los tamaños de gota medido por los dos orificios. Los números con color naranja representan una desviación mayor del 10% en los tamaños de gota con respecto al teórico, aunque sólo tres de ellos se separan apreciablemente. En color rojo se representa, como puede verse en la gráfica, un punto de mucha desviación con respecto al teórico, este hecho puede deberse a un error experimental en la toma de la medida. Y la palabra “*drip*” expresa que para valores de caudal iguales o menores que los de la fila en que se encuentra, se produce un fenómeno llamado *dripping*. Este fenómeno consiste en la no formación continuada del chorro debido a efectos de la tensión superficial, que en estos casos tiene un peso considerable y hace que haya recuperaciones del chorro hacia la boca del cilindro.

Representando gráficamente los resultados anteriores se obtiene la siguiente gráfica:

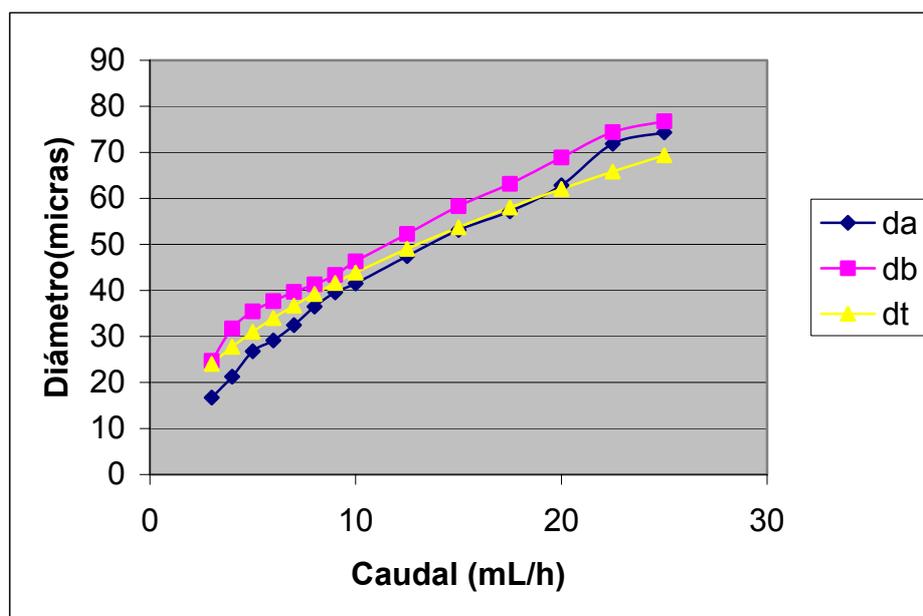


Fig.19. Representación de los diámetros de gotas de agua en aire para un nebulizador múltiple de dos salidas sin estabilizar

En esta gráfica, en el eje X se representa el caudal en mL/h por los orificios y en el eje Y los diámetros de gota en micras. La línea azul representa los diámetros de gota medidos que salen por el orificio-A, la rosa los diámetros de gota medidos a través del orificio-B, y la amarilla se corresponde con la línea teórica que relaciona el caudal con los diámetro de gota para una presión constante. Se puede comprobar que hasta aproximadamente 20mL/h la línea rosa siempre permanece por encima de la teórica, y

la azul por debajo. Esto quiere decir que las gotas que salen por el orificio-B son siempre mayores que las que salen por el orificio-A.

Dicha descompensación puede ser debida a dos situaciones. Por un lado a una diferencia en la dimensión H entre ambos dispositivos, y por otro lado a una diferencia en los diámetros interiores o de la forma de las salidas de los cilindros.

Debido a que el cilindro tiene unas dimensiones tales que no puede considerarse que el flujo este completamente desarrollado, en principio no son aplicables las ecuaciones de hagen-poiseuille en régimen laminar para determinar el caudal. Sin embargo, si hacemos despreciable el hecho de que los cilindros tengan distinto diámetro introduciendo una pérdida de carga tal, que por los dos orificios se consiga tener el mismo caudal, es evidente que la inestabilidad no se debe a la diferencia de H . En el caso de hacer la pérdida de carga muy grande y no llegar, en ningún caso, a obtener una relación 50%-50% en los caudales, se podría decir que la inestabilidad está influenciada por la diferencia de H .

Haciendo ese experimento, es decir, midiendo el caudal que salía por cada orificio sin la introducción de la pérdida de carga, se obtuvo el siguiente resultado.

Por el orificio-B salía el 59% del caudal introducido, mientras que por el orificio-A lo hacía el resto, es decir, el 41%. La medida de dichos caudales se realizó vaciando una jeringa de 10mL, a través del dispositivo múltiple de dos salidas, en funcionamiento flow focusing, en dos vasos. Posteriormente se mediría la relación de caudales, que en este caso se realizó a través de la relación de los pesos del fluido de ambos vasos, puesto que se trata de un mismo fluido, y la densidad por tanto es la misma, así como por ambos orificios salió el fluido durante el mismo tiempo. En tal caso, como se ha dicho, la relación de pesos es la misma que la relación de caudales. Obviamente, antes de pesar los vasos con el agua, es necesario conocer el peso de ambos vasos.

Teniendo en cuenta dicho resultado, es posible ajustar los diámetros teóricos que se esperarían para cada caudal. Tomando esos diámetros teóricos, la tabla anterior se transforma en esta otra. Los diámetros están en micras.

Qa (mL/h)	da	dat	%A	Qb (mL/h)	db	dbt	%B
2.46	16.21	21.76	74.49	3.54	24.70	26.10	94.64
3.28	21.26	25.13	84.56	4.72	31.75	30.14	94.93
4.10	26.79	28.09	95.37	5.90	35.44	33.70	95.09
4.92	29.14	30.77	94.70	7.08	37.65	36.91	98.03
5.74	32.45	33.24	97.62	8.26	49.67	39.87	80.27
6.56	36.50	35.53	97.34	9.44	41.30	42.63	96.88
7.38	39.58	37.69	95.22	10.62	43.34	45.21	95.86
8.20	41.52	39.73	95.69	11.80	46.29	47.66	97.13
10.25	47.43	44.42	93.65	14.75	47.43	53.28	89.02
12.30	53.15	48.66	91.55	17.70	53.15	58.37	91.06
14.35	57.19	52.55	91.89	20.65	57.19	63.04	90.72
16.40	62.86	56.18	89.37	23.60	62.86	67.40	93.26
18.45	71.85	59.59	82.93	26.55	71.85	71.48	99.49
20.50	74.33	62.81	84.50	29.50	74.33	75.35	98.65

Si ahora se representan por separado como se ajustan los diámetros experimentales a los teóricos, se puede ver como hay un ajuste prácticamente perfecto, y por tanto, como se dijo antes, la inestabilidad de debe a la descompensación en los caudales. Las gráficas de ajuste son las siguientes, en las que en el eje X se tiene el caudal en mL/h y en el eje Y los diámetros de las partículas en micras:

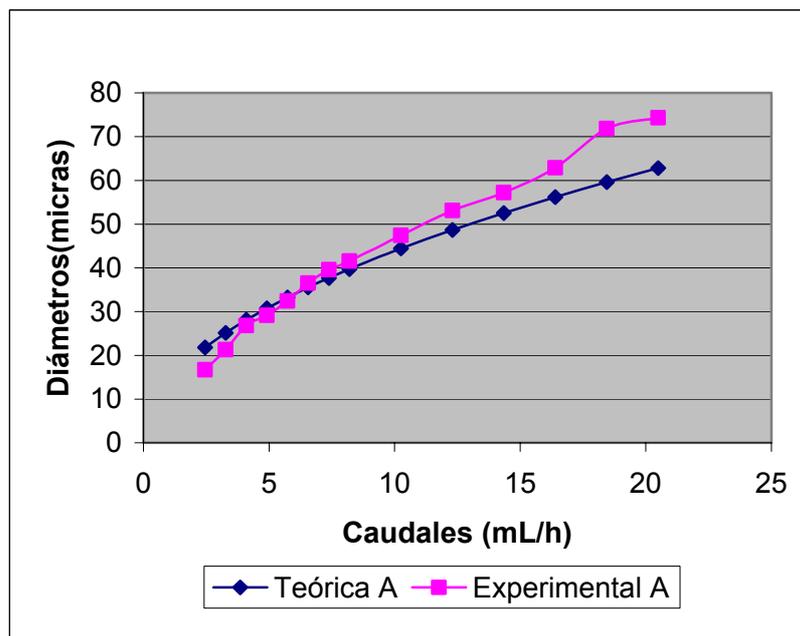


Fig.20. Representación de los diámetros de gotas de agua en aire para un nebulizador múltiple de dos salidas sin estabilizar, para una de las salidas y ajustando el diámetro de gota al caudal que atraviesa dicho orificio del nebulizador. En este caso, el orificio-A.

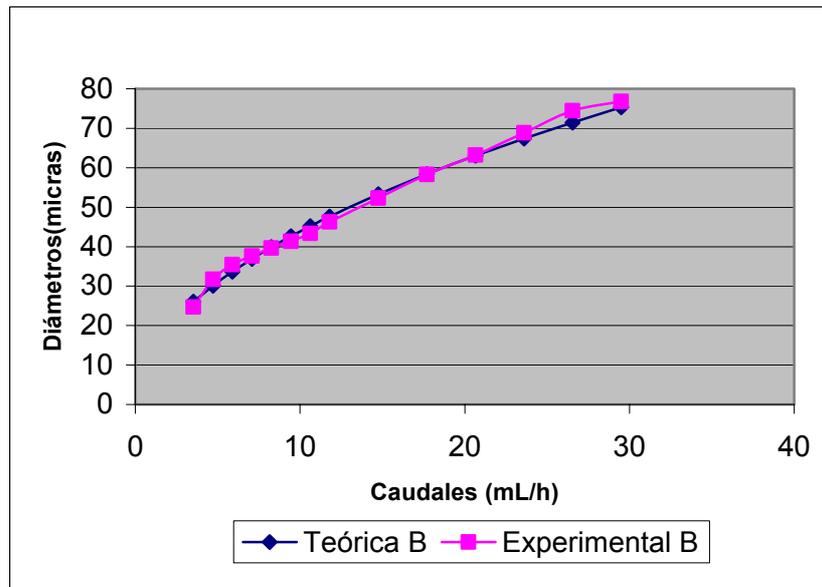


Fig.21. Representación de los diámetros de gotas de agua en aire para un nebulizador múltiple de dos salidas sin estabilizar, para una de las salidas y ajustando el diámetro de gota al caudal que atraviesa dicho orificio del nebulizador. En este caso, el orificio-B.

Realizando estos experimentos, es decir, introduciendo una pérdida de carga grande en la entrada a los cilindros, se consiguió llegar a una relación 50%-50%, en particular, dicha relación se consiguió para un valor de pérdida de carga de:

$$D=100\mu\text{m}, L=2\text{cm}$$

que para un caudal medio de 10mL/h se tiene una pérdida de carga de 22.6 KPa.

Realizando las medidas con las pérdidas de carga incorporadas al montaje, se obtiene la siguiente tabla:

Q (mL/h)	da(micras)	dt(micras)	db(micras)	%A	%B	da/db
3	25.40	24.03	24.96	98.08	96.27	98.26
4	26.88	27.75	26.18	96.86	94.34	97.39
5	28.92	31.02	28.87	93.23	93.07	99.82
6	30.32	33.98	31.23	89.22	91.91	97.08
7	31.89	36.71	33.00	86.87	89.89	96.63
8	33.75	39.86	35.68	84.67	89.51	94.56
9	34.98	41.62	37.35	84.04	89.74	93.65
10	41.56	43.87	40.42	94.73	92.14	93.10
12.5	47.62	49.05	51.15	97.08	95.89	97.03
15	53.82	53.33	54.87	99.09	97.19	98.09
17.5	58.32	58.04	57.31	99.52	98.74	98.27
20	60.41	62.04	60.67	97.37	97.79	99.57
22.5	65.47	65.81	63.67	99.48	96.74	97.25
25	75.49	69.37	70.44	91.89	98.48	93.31

Y representando dicha tabla gráficamente se ve como ahora, en el caso de pérdida de carga introducida, se consigue un ajuste muy bueno de los diámetros experimentales a los teóricos. La gráfica es la siguiente, en la que los diámetros están en micras y los caudales en mL/h:

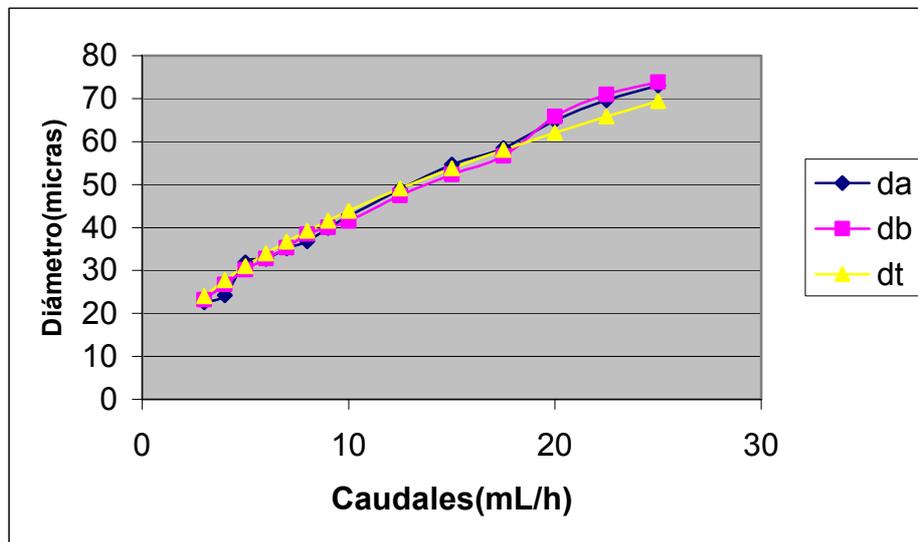


Fig.22. Representación de los diámetros de gotas de agua en aire para un nebulizador múltiple de dos salidas estabilizado.

Se concluye por tanto, que la inestabilidad de los dispositivos realizados bajo ese proceso de fabricación se corrige mediante la introducción de la pérdida de carga suficiente como para conseguir que los caudales salgan iguales, y por tanto, se consigan tamaños de gota iguales. Según esto, a la hora de diseñar el dispositivo mediante polímeros también habrá que tener en cuenta dicha circunstancia, y diseñar de algún modo la distribución de canales.

b) Tipos de nebulizadores múltiples en función del proceso de fabricación

b.1. Mediante técnicas de fabricación convencionales.

Los dispositivos múltiples realizados mediante las técnicas convencionales de mecanizado tienen las mismas ventajas e inconvenientes que los dispositivos simples, si bien en este caso se agrava el problema de la alineación entre cilindro y orificio de la placa de salida, por disponerse en este caso de más cilindros. Además, el volumen ocupado por el dispositivo múltiple se escala considerablemente con el número de salidas. En las figuras siguientes puede verse las partes y el montaje del nebulizador múltiple, en este caso, de 13 orificios de salida.

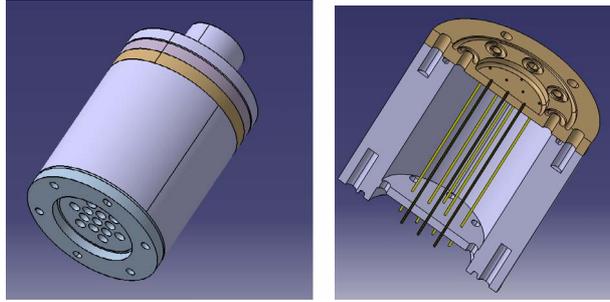


Fig.23. Diseño en Catia de un nebulizador múltiple de 13 salidas. A la derecha el dispositivo completo sin las conexiones. A la izquierda una sección en la que se puede ver la configuración interna.

b.2. Mediante técnicas microelectrónicas.

También se han desarrollado mediante técnicas microelectrónicas, en silicio, dispositivos múltiples, aunque esto dispositivo se encuentran en una fase muy experimental, al igual que los anteriores del punto b.1. En este caso, volvemos a tener las mismas ventajas que con los simples de silicio, y los mismos inconvenientes, a los que se le añade el pegado de una tercera oblea de silicio para conseguir el sistema de distribución de enfocado, y por tanto, también la alineación de tres obleas.

En el caso del silicio, el aumento de volumen debido al sistema de distribución no es significativo.

En las figuras siguientes se pueden observar distintos tipos de nebulizadores múltiples, de 8 y 64 salidas, así como simples de dos tipos, con cámara de remanso larga y cámara de remanso corta. En una de ellas puede verse el dispositivo de dos salidas funcionando en régimen flow focusing.

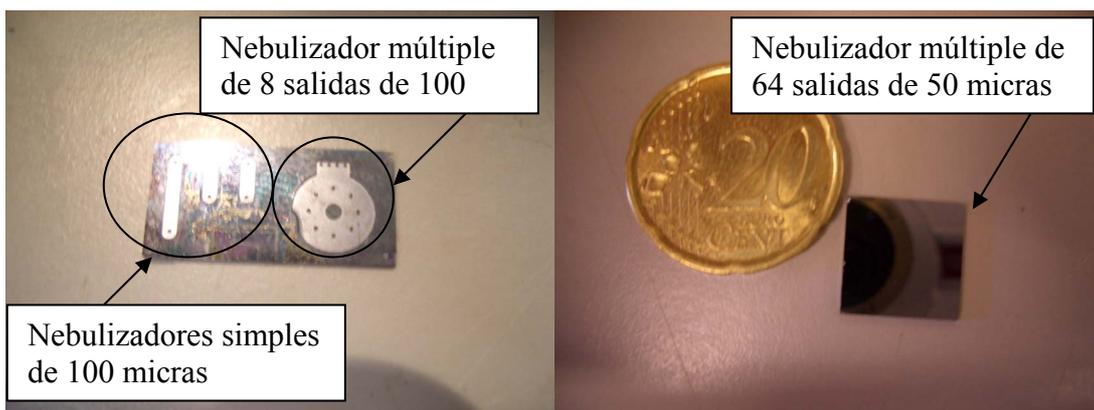


Fig.24. A la derecha, un el chip rectangular se pueden ver, a la izquierda, tres nebulizadores simples realizados en silicio. Dos de ellos con la misma longitud de cámara de remanso y otro con una cámara de remanso mayor. A la derecha se observa un nebulizador múltiple de 8 salidas distribuidas en círculo. A todos estos dispositivos les falta la placa de salida. A la izquierda, un chip cuadrado, es un nebulizador múltiple de 64 salidas realizado en silicio [3].

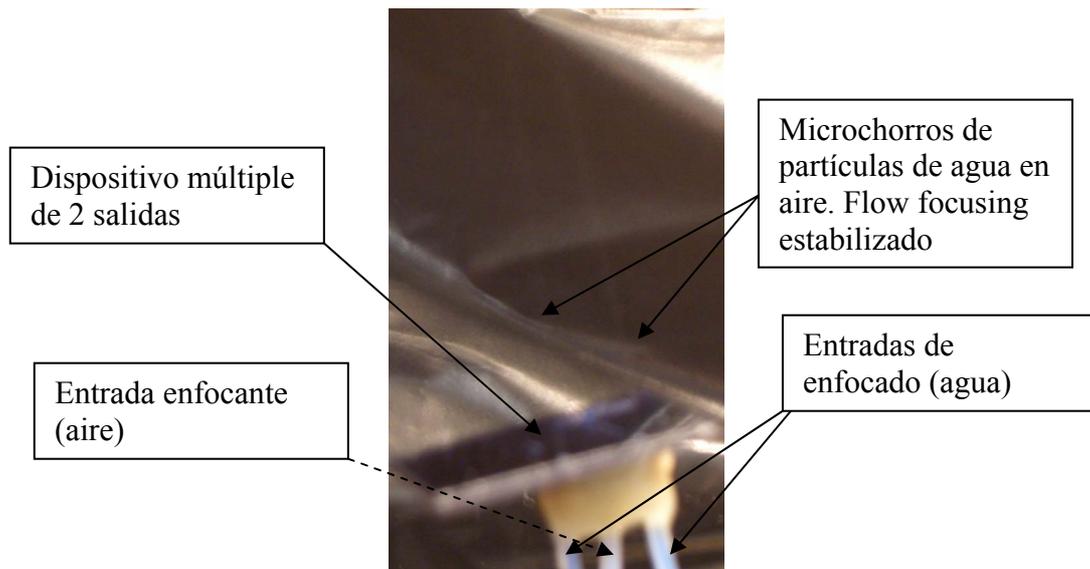


Fig.25. El chip de la figura es un nebulizador múltiple de 2 salidas realizado en silicio funcionando en régimen flow focusing estabilizado.

b.3. Realización con materiales poliméricos.

En el caso de nebulizadores múltiples realizados en polímeros cabe decir que no se tiene constancia de que existan físicamente, aunque si haya diseños realizados [14].