

# FABRICACIÓN DE MICRORROBOTS: MEMSLAB DE LA UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA

Paloma Rodríguez, Enrique Mancha-Sánchez, Almudena Bravo, Cristina Nuevo-Gallardo, Inés Tejado, Blas Vinagre  
Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura, Avda. de Elvas s/n, 06006 Badajoz  
{palomard, emancha, abravoi, cnuevog, itejbal, bvinagre}@unex.es

## Resumen

*La microrrobótica es un campo emergente de investigación con innumerables aplicaciones en el ámbito de la industria, la biología y la medicina. A pesar de los avances en el campo, todavía existen retos considerables entre los que se encuentra el de la fabricación de robots a escala micrométrica. La fabricación de microrrobots se beneficia de los avances en la fabricación de sistemas microelectromecánicos (MEMS). En este trabajo se presentan los equipos que forman el laboratorio de fabricación de MEMS de la Universidad de Extremadura (UEX), así como ejemplos de fabricación de microrrobots que se han realizado.*

**Palabras clave:** microrrobots, sistemas microelectromecánicos, fotolitografía.

## 1. INTRODUCCIÓN

El término microrrobótica suele referirse a los sistemas robóticos formados por componentes de dimensiones que varían desde los cientos micrómetros hasta unos pocos milímetros [4]. Se ha conseguido un progreso considerable en los últimos 30 años en este campo emergente de investigación, que está recibiendo gran atención por parte de la comunidad investigadora debido a sus potenciales aplicaciones [2].

La tecnología desarrollada puede ser utilizada en diversas áreas. En la industria, estas incluyen tareas de ensamblado, caracterización, inspección y mantenimiento y microóptica [9], ya que numerosas de estas aplicaciones requieren el manejo y ensamblaje de piezas pequeñas con una precisión en el rango de las micras. Otro campo relevante es el biológico, en el que los avances en microrrobótica permiten la manipulación, captura y combinación de células.

En medicina y cirugía, la microrrobótica promete un gran abanico de posibilidades, ya que el tamaño reducido de los dispositivos permitirá acceder a regiones complejas y estrechas del cuerpo humano, hasta ahora inaccesibles. Estas aplicaciones médicas, abarcan desde los procedimientos quirúrgicos

de forma no invasiva hasta la administración de medicamentos y las herramientas de diagnóstico y monitorización [10]. Es precisamente en este tipo de aplicaciones en las que se va a centrar este trabajo.

A pesar de todos los avances que se han producido en el campo de la microrrobótica, existen considerables desafíos en el desarrollo de robots con aplicaciones biomédicas en la escala micrométrica. Cambios relevantes en el comportamiento físico con respecto a la macroescala hacen necesario un estudio exhaustivo de las formas de locomoción, en las que las fuerzas de superficie como la viscosidad dominan con respecto a las fuerzas de volumen como la inercia. En este contexto de bajo número de Reynolds, el movimiento de los nadadores tiene que ser específico. Concretamente, es necesario que el nadador realice una secuencia de movimientos no simétrica e irreversible en el tiempo que suele referirse como movimiento no recíproco [8].

Este movimiento necesita de alguna fuente de energía para poder realizarse, otro de los retos de la microrrobótica. Los métodos convencionales en robótica para la obtención de energía no son aplicables, ya que, por el momento, no existe posibilidad de almacenar la suficiente energía eléctrica a estas escalas. Es por esto, que el enfoque mayoritario en la investigación es el de proporcionar la energía de forma externa. Existen varios métodos a la hora de propulsar microrrobots de forma inalámbrica, ya sea mediante energía acústica, eléctrica, térmica, química, magnética u óptica [13].

Como último aspecto clave, resaltar la fabricación, una parte crucial del desarrollo de la microrrobótica, ya que los diseños y funcionalidades que pueden lograrse dependen directamente de las técnicas disponibles de manufactura para la escala micrométrica. La mayor parte de técnicas de microfabricación están basadas en métodos desarrollados para la industria de los semiconductores. Algunos de los procesos convencionales de microfabricación incluyen litografía, deposición de películas delgadas, técnicas de grabado químico y electrodeposición [9].

Sin embargo, están emergiendo un buen número de tecnologías de microfabricación muy adecuadas para la fabricación de sistemas microelectromecánicos (MEMS, de su terminología inglesa) [5]. Estos nuevos procesos están basados en la deposición de tintas para formar estructuras en 2D o 3D y también procesos que utilizan láser, rayos de iones, rayos de electrones o sondas de exploración para depositar o eliminar material y formar microestructuras.

Es precisamente en este último grupo que se encuadra la descripción de los equipamientos disponibles en la Universidad de Extremadura (en adelante, UEX) para la fabricación MEMS. Este laboratorio está dotado de una impresora 3D de fotolitografía de dos fotones y por una impresora de inyección de tinta. Además, consta de un software para el diseño y la simulación de MEMS. En este contexto, la fabricación de microrrobots puede hacer uso de la tecnología de producción de MEMS que se ha descrito.

En este trabajo, se va a realizar la descripción de cada uno de los dispositivos nombrados, así como ejemplos de fabricación de microrrobots realizados en la impresora de fotolitografía.

## 2. MEMSLab de la UEX

En este apartado se van a describir los equipos que integran el MEMSLAB de la UEX. Conviene señalar que se realizará una descripción más detallada del Photonic Professional GT2 de Nanoscribe al ser el equipo principal del laboratorio, y más concretamente el que se ha utilizado para fabricar microrrobots.

### 2.1. PHOTONIC PROFESSIONAL GT2

La impresora Photonic Professional GT2 (Nanoscribe GmbH & Co. KG) es un equipo para la fabricación de estructuras en 3D a partir de resina fotopolimerizable. La particularidad de este equipo radica tanto en su resolución como en el rango de tamaños de las piezas que es capaz de fabricar: desde los cientos de nanómetros hasta los milímetros.

Esta resolución es posible gracias a la tecnología de fabricación de polimerización basada en DLW (Direct Laser Writing). En particular, este equipo realiza la fotopolimerización mediante dos fotones con longitudes de onda cercanas al infrarrojo. Una condición necesaria para que los dos fotones sean absorbidos de forma simultánea por la resina es que la intensidad lumínica sea lo suficientemente alta, por lo que utiliza un rayo pulsado láser de femtosegundo. Gracias a las características ópti-

cas de la absorción, solo se alcanza la intensidad suficiente para la fotopolimerización en el foco en el que se concentran los dos fotones [11]. Este volumen mínimo de polimerización se conoce como vóxel.

La fabricación de estructuras y piezas se conseguirá moviendo el láser en una trayectoria en tres dimensiones mediante sistemas de posicionamiento [6]. Las trayectorias en tres dimensiones pueden realizarse o bien moviendo el rayo láser o bien moviendo la muestra de resina. En la práctica, el sistema de posicionamiento del dispositivo es una combinación de las dos posibilidades de movimiento, como en la mayoría de sistemas de DWL [12].

El movimiento del láser se realiza mediante galvanómetros de escaneo, mientras que el movimiento de la muestra se consigue mediante etapas de posicionamiento en  $xyz$  de alta resolución, en concreto, con un sistema piezoeléctrico de precisión 3D. La utilización híbrida de estas dos posibilidades permite aprovechar la gran velocidad de los galvanómetros de escaneo (que alcanzan los m/s) con la mayor amplitud de movimiento de las etapas de posicionamiento de la muestra. Además, existe una etapa de posicionamiento lateral 2D, bastante más lenta en comparación con los sistemas ya nombrados, pero que permite movimientos extensos. Los diferentes elementos mencionados se encuentran representados en la Figura 1.

Las altas intensidades necesarias para la fotolitografía mediante dos fotones requiere la utilización de objetivos típicamente utilizados en microscopios que sean capaces de concentrar el láser. La gran desventaja de la utilización de este tipo de objetivos es que estos presentan una distancia de trabajo bastante pequeña, de valores típicos entre los  $170\ \mu\text{m}$  y  $1\ \text{mm}$ , que limita la altura de las estructuras fabricadas.

Para resolver este problema, se utiliza la litografía "Dip-in" [3], una modificación de DLW en la que el objetivo está inmerso directamente en la resina. Como se puede observar en la Figura 1, la impresión se realiza desde la superficie del sustrato hacia abajo para que el objetivo y la resina estén en contacto. De esta forma, la distancia de trabajo del objetivo se convierte en un factor irrelevante. La apertura numérica del objetivo será uno de los factores que determinarán el tamaño del vóxel.

Según las características de la pieza que se quiera fabricar, hay disponibles tres sets de impresión como se muestra en la Figura 2. El set de características pequeñas es el de mayor resolución permite una resolución mínima de unos  $200\ \text{nm}$ . Esta resolución es a costa de un mayor tiempo de impresión y volumen máximo menor que el resto de

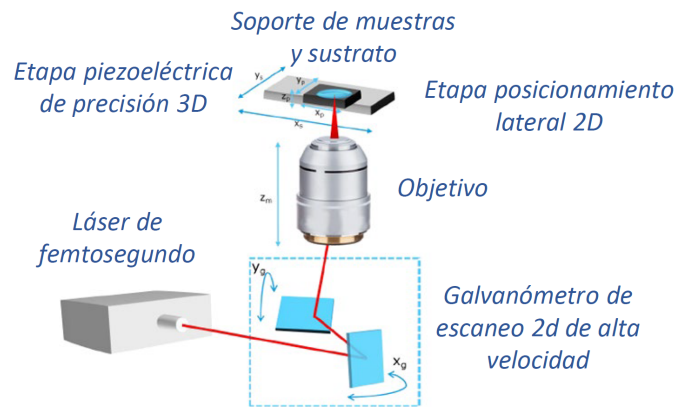


Figura 1: Esquema de los elementos principales de la impresora Photonic Professional GT2

los sets de hasta  $0,1 \text{ mm}^3$ . El set de características medianas imprime volúmenes de hasta  $50 \text{ mm}^3$ , con elementos estables de  $10 \mu\text{m}$  y estructuras de hasta  $8 \text{ mm}$  de altura. Por último, el set de características grandes permite unas resoluciones no tan finas, con elementos estables a partir de  $20 \mu\text{m}$  pero el tiempo de impresión es más reducido y el volumen de impresión es de hasta  $400 \text{ mm}^3$ .



Figura 2: Sets de impresión disponibles de la impresora Photonic Professional GT2

Cada set está compuesto por un objetivo, una resina y un sustrato diferente, que deben utilizarse en conjunto para obtener las características descritas.

### 2.1.1. FLUJO DE TRABAJO

El uso de la impresora lleva aparejado un flujo de trabajo específico; la secuencia de pasos está representada en la Figura 3. El proceso comienza creando un modelo 3D de la estructura que se quiera fabricar en un programa informático adecuado. A continuación, este modelo debe exportarse en formato STL. Este archivo STL será a partir del cual se generen los archivos GWL, para lo cual se importará en el software de DeScribe desarrollado por Nanoscribe GmbH & Co. KG. Una descripción más detallada del funcionamiento del programa se encuentra en la sección 2.1.2.

Una vez generados los archivos GWL, se deberá

introducir el objetivo en la máquina y preparar la muestra. El objetivo, el sustrato y la resina deberán escogerse conforme al set de características que vaya a utilizarse. Se colocará el objetivo en el microscopio de la máquina y la cantidad de resina necesaria sobre el sustrato.



Figura 3: Esquema del flujo de trabajo de la impresora

A continuación, se encenderá el programa Nanowrite en el ordenador de la impresora, momento en el que el sistema realizará una calibración automática. Utilizando el programa Nanowrite, se deberá encontrar la interfaz y cargar los archivos correspondientes al trabajo. Desde Nanowrite se podrá ordenar el inicio de la impresión. En la sección 2.1.3, se describen las diferentes partes que componen el programa. El último paso para la obtención de una pieza, es la inmersión del sustrato en los líquidos de postprocesado. Primero, en un baño de acetato de 2-metoxi-1-metiletilo (PGMEA), para pasarlo a otro de isopropanol. Los tiempos de cada uno de los baños variarán en función del set de impresión utilizado y del tamaño de la pieza.

**2.1.2. DESCRIBE**

Describe es el software de preparación de la impresión de Nanoscribe GmbH & Co. KG. Su función es la de asistir en la generación de los archivos GWL necesarios para la realización de un trabajo. Los archivos GWL describen las trayectorias que debe seguir el láser y configura los parámetros de impresión del sistema. Estos archivos pueden ser generados a partir de un archivos STL mediante un asistente de importación o directamente programados.

El asistente de importación sigue un proceso específico para procesar los archivo STL de la pieza. Primero, el programa divide la pieza en capas, de forma similar a como se realiza en una impresora 3D convencional. Después de este paso, se divide cada capa en líneas, que corresponderán con la trayectoria que seguirá el láser. Por último, si el tamaño de la pieza sobrepasa el campo de impresión que pueden abarcar los sistemas de posicionamiento más precisos, es necesario dividir el sólido en bloques. Cada bloque se imprimirá utilizando los sistemas de posicionamiento finos, es decir, el galvanómetro de escaneo o la etapa piezoeléctrica, mientras que el movimiento entre bloques se realizará mediante la etapa de posicionamiento lateral 2D.

Es importante añadir que el tamaño de las capas, las líneas y los bloques en los que se divide el objeto 3D dependen directamente del set de impresión utilizado. Cuanto mayor sea el set de impresión, más grandes serán las capas, las líneas y los bloques, lo que llevará a un menor tiempo de impresión, pero con una resolución menor.

Describe permite la previsualización del proceso de impresión de la pieza, mostrando al usuario el tiempo y el procedimiento que se va a seguir para cada trabajo. Además, tiene una función de depuración del código GWL que ayuda a comprobar la sintaxis de los programas generados y visualizar el efecto que tiene cada línea escrita sobre la impresión.

**2.1.3. NANOWRITE**

Nanowrite es la interfaz gráfica de usuario para la utilización de la impresora Photonic Professional GT2. Si bien el programa permite un control manual de las diferentes partes de la máquina, su propósito es el de automatizar y posibilitar la visualización del proceso de impresión.

En la Figura 4, se presenta la ventana principal de Nanowrite. Se han añadido rectángulos de colores para dividir en partes la pantalla del programa y facilitar su explicación. En la sección del rectángulo rojo se encuentran los botones utiliza-

dos en una impresión estándar. El indicador rectangular que ocupa la posición superior indica el estado del sistema en el momento mostrado en la Figura 4, en este caso, en reposo. El siguiente pulsador es “*Exchanger Position*”, que permite abrir la impresora e introducir una muestra. El pulsador “*Approach Sample*” ejecuta la orden de encontrar la interfaz de la muestra colocada en el interior de la impresora. Pulsando el indicador “*Load job*” se abre una ventana secundaria que permite cargar un archivo de tipo GWL para su impresión. El siguiente botón es “*Find interface*” que permite, también, encontrar la interfaz. La siguiente opción es “*Start Job*”, que se volverá disponible una vez se haya cargado un archivo mediante “*Load Job*”, seleccionando el botón comienza la impresión del archivo cargado. Por último, presionando “*Abort*” se finaliza la impresión.

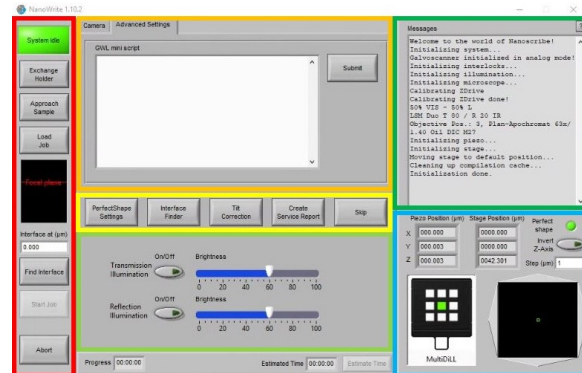


Figura 4: Ventana principal de Nanowrite

Dentro rectángulo naranja, está la sección GWL miniscript que permite ejecutar comandos GWL directamente en la impresora sin tener que cargar un archivo de este tipo. En la parte amarilla, se encuentran botones que corresponden con un uso avanzado de la impresora. La división verde clara contiene los controles de la iluminación de la impresión. Se puede elegir entre iluminación transmitida, utilizada para sustratos transparentes, e iluminación reflejada para sustratos no transparentes. Se puede regular, además, la intensidad de cada una de ellas. En verde oscuro está la ventana de mensajes, donde aparecen las diferentes notificaciones del sistema. Por último, en el interior del recuadro azul se localizan tanto las coordenadas del sistema piezoeléctrico como el del sistema de posicionamiento lateral 2D (en la Figura 4 identificada como “*Stage Position*”). Además, se puede visualizar la posición del sistema sobre el sustrato.

## 2.2. EQUIPAMIENTO ADICIONAL

### 2.2.1. DIMATIX DMP-2850: IMPRESORA DE INYECCIÓN DE TINTA PARA LA DEPOSICIÓN DE MATERIALES FLUIDOS

La impresora Dimatix DMP-2850 de Fijifilm es un sistema de sobremesa que permite la deposición de materiales sobre diferentes tipos de superficies planas de hasta 25 mm de grosor y de tamaño A4. Está diseñada para inyectar con microprecisión una gran variedad de fluidos funcionales sobre prácticamente cualquier superficie, como plástico, vidrio, cerámica y silicio, así como sustratos flexibles, desde membranas, geles y películas finas hasta productos de papel. Emplea cartuchos intercambiables que pueden rellenarse con materiales fluidos fabricados por el usuario.

Su funcionamiento está basado en la modificación de los impulsos electrónicos enviados al dispositivo piezoeléctrico de eyección de tinta y la observación a través de una cámara con el fin de conseguir que se genere una gota con características óptimas para la impresión. De esta manera, se pueden depositar gotas de hasta un diámetro mínimo de 20  $\mu\text{m}$ .

La gran versatilidad en el uso de sustratos y tintas en este equipo facilita en gran medida el desarrollo de prototipos de productos, desde circuitos flexibles, etiquetas RFID o pantallas, hasta matrices de ADN.

### 2.2.2. COVENTOR

Coventor es una plataforma software avanzada que resuelve los retos de modelado de procesos, automatización de diseños e integración de sistemas microelectromecánicos. La suite está formada por MEMS+, para una simulación compacta, ideal para diseñar y optimizar dispositivos MEMS que dependen de la electroestática para la actuación y sensorizado, y CoventorWare que ofrece características específicas para el diseño de MEMS que lo diferencian de otras herramientas de análisis de elementos finitos de propósito general.

## 3. EJEMPLOS DE FABRICACIÓN

A continuación, se van a presentar varios ejemplos de fabricación de microrrobots realizados con la impresora Photonic Professional GT2.

### 3.1. MICRORROBOT DE TIPO ESPERMATOZOIDE CON CABEZA FERROMAGNÉTICA

Se han fabricado microrrobots de tipo flagelo plano. Las dimensiones del microrrobot se han elegido a partir de las proporciones del microrrobot fabricado en [7], escalando las medidas al tamaño conveniente en cada caso. La Figura 5 representa un esquema del microrrobot.

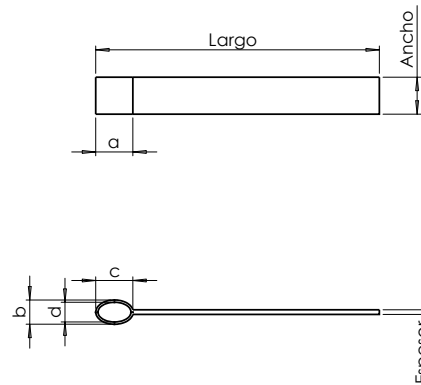


Figura 5: Modelo de un microrrobot espermatozoide de tipo flagelo plano

Estos dispositivos están pensados para ser actuados mediante campos magnéticos variables. El campo magnético oscilatorio provocará un movimiento fluctuante en la cabeza del microrrobot que moverá el flagelo, ya que este es solidario a la cabeza. Este movimiento del flagelo será el que propulse el microrrobot. Al diseño se le ha añadido una apertura en la cabeza para introducir un elemento ferromagnético que posibilitará la propulsión. Es importante señalar la forma elipsoidal del elemento ferromagnético que permitirá que el eje largo de la cabeza sea el que se alinee con el campo magnético generado [1].

Se han imprimido dos versiones del mismo prototipo, de longitudes de 15 y 4 mm, en adelante Prototipo 1 y Prototipo 2, respectivamente. En la Tabla 1, se reflejan las medidas de cada uno de los prototipos.

La fabricación se ha realizado utilizando el set de impresión mediano, el objetivo de 25 aumentos, el sustrato ITO y la resina IP-S. Las Figuras 6 y 7 muestran imágenes reales de los microrrobots ya fabricados.

El postprocesado de los microrrobots de 15 y 4 mm es idéntico. Se les somete a un baño de 20 minutos de PGMEA seguido de otro baño de isopropanol

Tabla 1: Dimensiones del microrrobot tipo flagelo de 15 mm

Dimensiones	Prototipo 1 (mm)	Prototipo 2 (mm)
Largo	15	4
Espesor	0,24	0,064596
Ancho	1,95	0,521739
a	1,98	0,529193
b	1,28	0,342857
c	1,78	0,46
d	1,08	0,27

de 6 minutos de duración.

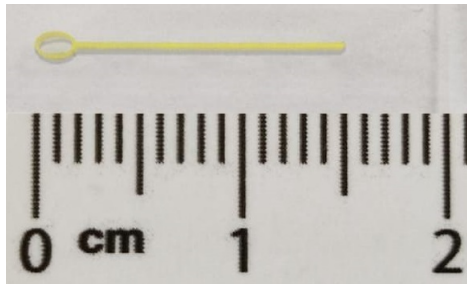


Figura 6: Fotografía del Prototipo 1

Además, al flagelo de 15 mm se le ha introducido una mezcla de nanopartículas con resina IP-S, con una alta concentración en nanopartículas. Las nanopartículas son de óxido de hierro ( $Fe_3O_4$ ) de una pureza del 99,55 % y un tamaño de entre 14-29 nm. Debido a la alta concentración, no se consigue que la resina polimerice. Para lograr que el material depositado en la cabeza no se disperse, se cierra la superficie mediante resina epoxi.

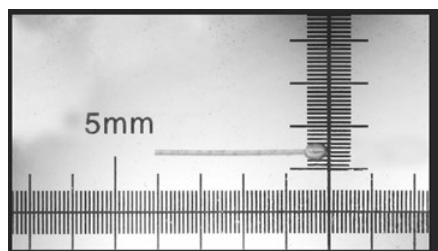


Figura 7: Fotografía del Prototipo 2

En la fabricación de estos microrrobots se han encontrado varios problemas. El más evidente es la dificultad para dotar de un elemento magnético al microrrobot de prototipo 2 de 4 mm. Debido a las dimensiones de la cabeza, es extremadamente complicado rellenar la cavidad de nanopartículas de forma manual, como se hizo en el caso del microrrobot de 15 mm.

Otro problema resultó derivado de las características de la resina. A pesar de las dimensiones reducidas del microrrobot, este terminó partiéndose

durante el manejo debido a su poca flexibilidad y relativa fragilidad.

Por último, a pesar de que se acabó utilizando resina epoxi para conseguir que las nanopartículas quedaran fijas en la cabeza del microrrobot de 15 mm, inicialmente se utilizó cianoacrilato, que terminó por no ser la opción más adecuada. Esto es debido a que el agua, en la que estaba inmersa el microrrobot, acabó disolviendo el pegamento.

### 3.2. MICRORROBOT TIPO ESPERMATOZOIDE PARA ESTUDIO DE INTERACCIÓN CON FLUIDO

El siguiente ejemplo de fabricación es un microrrobot de flagelo de sección circular de la Figura 8. Como se puede observar, la longitud total del microrrobot es de 1 mm, siendo el diámetro del flagelo 20  $\mu m$ . Además de la cabeza en forma de elipsoide y el flagelo, la pieza está formada por dos soportes de 300  $\mu m$  de alto y 20  $\mu m$  de diámetro.

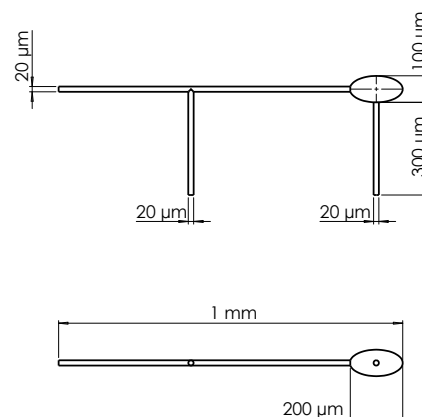


Figura 8: Modelo de un microrrobot de tipo espermatozoide para estudio de interacción con fluido

A partir de esta pieza, se va a realizar un estudio experimental para observar la interacción del



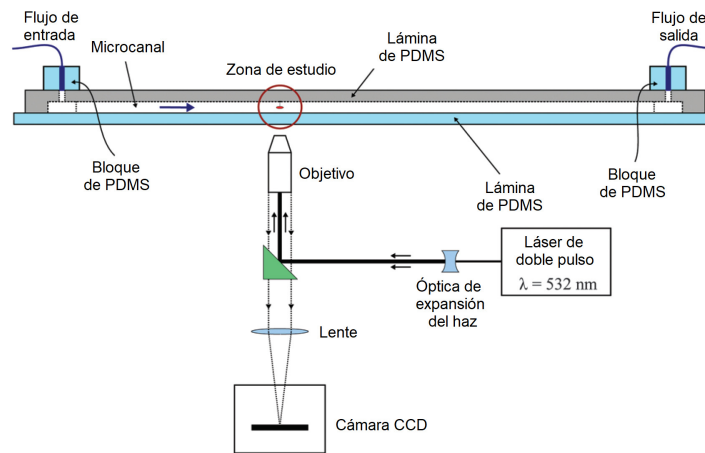


Figura 9: Esquema de la disposición del experimento

microrrobot con un fluido. El esquema de la disposición del experimento en el que se va a colocar el microrrobot está en la Figura 9. El robot se localizará en la zona de estudio, en el interior de un microcanal por el que se hará circular un fluido. La zona de estudio estará monitorizada mediante varios sistemas de visualización. Los soportes estarán unidos a la lámina de PDMS superior. Gracias a ellos se consigue un posicionamiento fijo en el experimento, intentando minimizar las posibles perturbaciones que la fijación a la lámina de PDMS pueda generar.

La fabricación se ha realizado utilizando el set de impresión pequeño, el objetivo de 63 aumentos y la resina IP-Dip. En cuanto al sustrato, el correspondiente al set de impresiones pequeñas sería el de sílice, sin embargo, para tratar de aumentar la adherencia de los soportes al sustrato, esta impresión se ha realizado sobre un sustrato de resina fabricado en una máquina convencional de impresión 3D de resina. Una fotografía del resultado se puede visualizar en la Figura 10, una vista en planta del resultado.

El postprocesado consistió en un baño de 12 minutos de PGMEA seguido de otro baño de isopropanol de 30 segundos de duración.



Figura 10: Fotografía del microrrobot de 1 mm

La fabricación de este microrrobot conllevó, también, una serie de problemas. En primer lugar, se

trató de utilizar el objetivo mediano, pero los soportes eran demasiado pequeños para este set y su fabricación no lograba ser estable. Por ello, se decidió realizar la impresión con el set de características pequeñas.

El flagelo es un gran desafío, al tratarse de una estructura que debe imprimirse en voladizo. Las primeras impresiones no conseguían que se fabricara correctamente, ya que parte del flagelo no quedaba correctamente conectado al resto de la estructura y se desprendía de la misma en los baños del postprocesado. Se consiguió realizar la impresión de forma correcta disminuyendo el tamaño de los bloques en el eje longitudinal del microrrobot, lo cual consigue que la cantidad de material que se imprima en voladizo en cada bloque disminuya, confiriendo estabilidad mecánica.

Por último, la impresión con un sustrato de resina no estandarizado ha dificultado la impresión, ya que la máquina no puede encontrar la interfaz entre el sustrato y la resina de forma automática, por lo que debe realizarse de forma manual.

#### 4. CONCLUSIONES

El equipamiento que se ha descrito ofrece gran versatilidad en la fabricación de microrrobots y otros tipos de sistemas microelectromecánicos. En el futuro, se espera utilizar estos recursos para continuar la fabricación de microrrobots y otros tipos de MEMS.

#### Agradecimientos

Este artículo ha sido financiado por la Consejería de Economía, Ciencia y Agenda Digital de la Junta de Extremadura mediante el proyecto IB18109 y la “Ayuda a Grupos” GR18159, por la Agencia Estatal de Investigación mediante el proyecto PID2019-111278RB-C22 / AEI /

10.13039/501100011033, y por los Fondos Europeos de Desarrollo Regional “Una manera de hacer Europa”.

### English summary

## MICROROBOT MANUFACTURING: MEMSLAB AT UNIVERSITY OF EXTREMADURA

### Abstract

*Microrobotics is an emerging field of research with countless applications in industry, biology and medicine. Despite advances in the field, there are still considerable challenges including that of micrometer-scale robot manufacturing. The fabrication of microrobots benefits from advances in microelectromechanical systems (MEMS) manufacturing. This paper presents the equipment that forms the MEMS fabrication laboratory at Universidad de Extremadura (UEX), as well as examples of microrobot fabrication that have been carried out.*

**Keywords:** Microrobot, MEMS, two-photon polimerization.

### Referencias

- [1] J. J. Abbott, O. Ergeneman, M. P. Kummer, A. M. Hirt, and B. J. Nelson. Modeling magnetic torque and force for controlled manipulation of soft-magnetic bodies. *IEEE Transactions on Robotics*, 23(6):1247–1252, dec 2007.
- [2] G. Adam, A. Benouhiba, K. Rabenorosoa, C. Clévy, and D. J. Cappelleri. 4D Printing: Enabling Technology for Microrobotics Applications. *Advanced Intelligent Systems*, 3(5):2000216, may 2021.
- [3] T. Bückmann, N. Stenger, M. Kadic, J. Kaschke, A. Frölich, T. Kennerknecht, C. Eberl, M. Thiel, and M. Wegener. Tailored 3D Mechanical Metamaterials Made by Dip-in Direct-Laser-Writing Optical Lithography. *Advanced Materials*, 24(20):2710–2714, may 2012.

- [4] P. Dario, R. Valleggi, M. C. Carrozza, M. C. Montesi, and M. Cocco. Microactuators for microrobots: A critical survey, 1992.
- [5] A. C. Fischer, M. Mäntysalo, and F. Niklaus. Inkjet Printing, Laser-Based Micromachining and Micro 3D Printing Technologies for MEMS. In *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies: Second Edition*, pages 550–564. Elsevier Inc., jan 2015.
- [6] V. Hahn, P. Kiefer, T. Frenzel, J. Qu, E. Blasco, C. Barner-Kowollik, and M. Wegener. Rapid Assembly of Small Materials Building Blocks (Voxels) into Large Functional 3D Metamaterials. *Advanced Functional Materials*, 30(26):1907795, jun 2020.
- [7] I. S. Khalil, H. C. Dijkslag, L. Abelmann, and S. Misra. MagnetoSperm: A microrobot that navigates using weak magnetic fields. *Applied Physics Letters*, 104(22):223701, jun 2014.
- [8] E. Lauga and T. R. Powers. The hydrodynamics of swimming microorganisms. *Reports on Progress in Physics*, 72(9):96601, aug 2009.
- [9] B. J. Nelson, L. Dong, and F. Arai. Micro/nanorobots. In *Springer Handbook of Robotics*, pages 671–711. Springer International Publishing, jan 2016.
- [10] B. J. Nelson, I. K. Kaliakatsos, and J. J. Abbott. Microrobots for minimally invasive medicine, aug 2010.
- [11] S. K. Saha, C. Divin, J. A. Cuadra, and R. M. Panas. Effect of proximity of features on the damage threshold during submicron additive manufacturing via two-photon polymerization. *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*, 5(3), sep 2017.
- [12] A. Selimis, V. Mironov, and M. Farsari. Direct laser writing: Principles and materials for scaffold 3D printing, jan 2015.
- [13] Y. Tu, F. Peng, and D. A. Wilson. Motion Manipulation of Micro- and Nanomotors. *Advanced Materials*, 29(39):1701970, oct 2017.



© 2021 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).