

## Desarrollo de una máquina bobinadora semiautomática para la microfabricación de bobinados, antenas y solenoides micrométricos

Gabriel Villalba-Alumbreros<sup>1</sup>, Miguel Fernandez-Munoz<sup>1</sup>, Diego Lopez-Pascual<sup>1</sup>, Ignacio Valiente-Blanco<sup>1</sup>, Alberto Lastra-Sedano<sup>2</sup>, Efen Díez-Jimenez<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Área de Ingeniería Mecánica, Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad de Alcalá, España.

<sup>2</sup>Departamento de Física y Matemáticas, Universidad de Alcalá, España.

### Resumen

Los MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) tienen multitud de aplicaciones en campos de ciencia e ingeniería tan variados como la robótica, biomedicina, electrónica o espacio y comunicaciones. Muchos de estos dispositivos emplean antenas, capaces de recibir y emitir señales de radiofrecuencia, y bobinados o solenoides, capaces de interactuar con otras fuentes de campo electromagnético de tamaños micrométricos. Los métodos de fabricación usuales de estos microcomponentes tienen limitaciones que afectan al desempeño de la máquina de la que forman parte. En este artículo, se propone un nuevo sistema semiautomático que permite fabricar solenoides y microantenas por bobinado de cable de cobre en tamaños micrométricos. Asimismo, se describe el sistema completo, su modo de operación y métodos propuestos para la fabricación. Por último, se muestran resultados de fabricación y la caracterización de los microcomponentes logrados. Estos componentes son antenas cilíndricas helicoidales flexibles de 6.1mm de largo y 352  $\mu\text{m}$  de diámetro, e inductores de hasta 5 capas, con una longitud de 680  $\mu\text{m}$ , y un diámetro total de 300  $\mu\text{m}$ .

**Palabras clave:** Máquina bobinadora, sistema de microbobinado, microinductores, microantenas.

### Abstract

MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) have many applications in fields of science and engineering as varied as robotics, biomedicine, electronics or space and communications. Many of these devices employ antennas, capable of receiving and emitting radiofrequency signals, and coils or solenoids, capable of interacting with other micrometric-sized sources of electromagnetic fields. The usual manufacturing methods of these microcomponents have limitations that affect the performance of the machine of which they are a part. This article proposes a new semi-automatic system that allows microinductors and microantennas to be manufactured by winding copper wire in micrometric sizes. Furthermore, the complete system, its mode of operation and proposed methods for manufacturing are described. Finally, manufacturing results and the characterization of the microcomponents achieved are shown. These components are flexible helical cylindrical antennas 6.1mm long and 352  $\mu\text{m}$  in diameter, and inductors of up to 5 layers, with a length of 680  $\mu\text{m}$ , and a total diameter of 300  $\mu\text{m}$ .

**Keywords:** winding machine, microwinding system, microinductors, microantennas.

## 1. Introducción

### 1.1. Motivación

Los sistemas microelectromecánicos o MEMS son dispositivos de tamaño submilimétrico. Estos dispositivos pueden ser sensores, transductores, actuadores, o componentes de sistemas milimétricos más grandes. Los campos de aplicación de estos dispositivos se extienden desde aplicaciones biomédicas (cirugías mínimamente invasivas [1], endoscopias de cavidades estrechas [2] o

monitorización mediante implantes [3]), electrónicas [4], de comunicaciones y espacio [5]–[7], hasta robóticas [8].

La naturaleza de los MEMS es muy variada. En el caso de los actuadores, existen de diversos tipos: piezoeléctricos [9], electromagnéticos [10], fluido-mecánicos [11] o electrostáticos [12]. Dentro de los transductores y sensores, existen de deformación [13], químicos [14], ópticos [15], capacitivos [16], piezoeléctricos [17] o electromagnéticos [18].

En los MEMS se requieren subsistemas y componentes capaces de generar o recibir señales electromagnéticas. En el caso de los actuadores electromagnéticos, son necesarios elementos inductores capaces de generar el campo magnético necesario para actuar mecánicamente sobre imanes permanentes de alta calidad [19]-[20], que han demostrado ser reducibles a la escala microscópica [21]-[22]. En el caso de los transductores electromagnéticos, es necesario emitir y recibir señales de radiofrecuencia a través de antenas con la suficiente potencia y ganancia, y bajo coeficiente de reflexión.

Los inductores se componen de núcleos ferromagnéticos, generalmente de sección circular o cuadrada, en los cuales se encuentra bobinado de forma compacta un elemento conductor eléctrico con aislante que previene de derivaciones eléctricas. Las antenas tienen formas muy diversas, pero las que tienen forma cilíndrica generalmente están formadas por un conductor enrollado en un núcleo dieléctrico.

En aplicaciones de transmisión de energía inalámbrica en escala macroscópica, las antenas helicoidales permiten combinaciones emisor-receptor más eficientes, y también combinaciones cuya frecuencia de resonancia sea independiente del diámetro [23]. Se ha demostrado que la transferencia de energía inalámbrica es viable para dispositivos MEMS de  $1\text{mm}^3$ . En el caso de los inductores, como componente básico de motores y actuadores lineales, se busca que sean capaces de generar la mayor densidad de campo magnético posible por potencia consumida [24]-[26]. Esto hace que los motores con bobinas multicapa, con la posibilidad de incluir un núcleo de hierro que mejora sus características, tengan mejor desempeño que los motores de bobinas planas. Así, la fabricación de antenas helicoidales y bobinas en escalas microscópicas abre nuevas oportunidades en el desarrollo de dispositivos MEMS.

## 1.2. Estado del arte

En la escala macroscópica, las antenas e inductores planos usualmente se fabrican por deposición con máscara o por mecanizado con CNC. Los inductores tridimensionales, tanto cilíndricos como con otras formas, se realizan por técnicas de bobinado tradicionales [27]. Estas técnicas han sido desarrolladas ampliamente en industria, e incluso incorporan sistemas automáticos [28] en los cuales se pueden fijar parámetros de diseño para producción en masa de sistemas, como estátores de motores eléctricos. Estos métodos requieren de sistemas de posicionamiento y tensores mecánicos.

Las antenas cilíndricas como las helicoidales, espirales y otras formas se fabrican, en escala macroscópica, por técnicas de impresión de circuitos conductores sobre

polímeros flexibles. Posteriormente, se enrollan en un cilindro rígido dieléctrico y paramagnético para darle la forma de diseño [29]. También, se construyen las antenas con láminas o cables de cobre y quedan embebidas en resina para aportar rigidez [30].

En la microescala, es bastante común la fabricación de espiras planas complejas y con varias vueltas por métodos litográficos de deposición [31]. Sin embargo, para abordar la complejidad de estructuras de antenas tridimensionales, e inductores con núcleos ferromagnéticos, son necesarias otras técnicas. Para la construcción de microantenas cilíndricas se emplea la fotolitografía de estructuras en polímeros flexibles enrollables [32]. También se emplea impresión 3D para creación de estas microestructuras. Sin embargo, en ambos métodos existen limitaciones de forma o relación de aspecto de los circuitos de las antenas. En la fabricación de microinductores con núcleos ferromagnéticos, se emplean técnicas de electrodeposición con diferentes máscaras para producir estructuras tridimensionales en las que insertar núcleos ferromagnéticos. Estas técnicas proporcionan la posibilidad de estructuras complejas, pero no compactas. Tampoco permite la creación de inductores circulares, y como la deposición de material ferromagnético es compleja, es necesaria la inserción de piezas ferromagnéticas completas. Existen ejemplos de electrodeposición sobre sustratos cilíndricos, creando solenoides cilíndricos, aunque de bajo desempeño y sin núcleos ferromagnéticos [33].

Una alternativa a las técnicas de deposición comentadas es escalar las técnicas de bobinado tradicionales a escalas micrométricas, empleando cables y núcleos micrométricos. Algunas ventajas del microbobinado por cable son que se puede conseguir un factor de llenado superior al 80%, que se pueden escoger como núcleo materiales con las propiedades eléctricas o magnéticas requeridas tanto para antenas como inductores, y que se requiere de equipamiento menos específico y de procesos menos complejos que en métodos por deposición. Sin embargo, tiene algunos inconvenientes: se necesitan más etapas de integración y ensamblaje en sistemas de los que forman parte los bobinados individuales.

En trabajos anteriores, se han logrado microbobinados con núcleos ferromagnéticos con diámetros de entre 0.8 y 2 mm con 40 vueltas para aplicaciones de transformadores [34]. Existen compañías que proveen de microbobinados comerciales tan pequeños como 0.5mm de diámetro [35], [36], logrando factores de llenado entre 70% y 85%. Tanto en la macro como en la microescala se usan topes laterales para facilitar el montaje de capas superiores. Microbobinados con longitudes entre 1 y 2 mm, y diámetros tan pequeños como 0.5mm se han logrado empleando topes [37], [38]. Sin embargo, el alineamiento entre dos topes

laterales en sistemas de bobinado micrométrico es una dificultad.

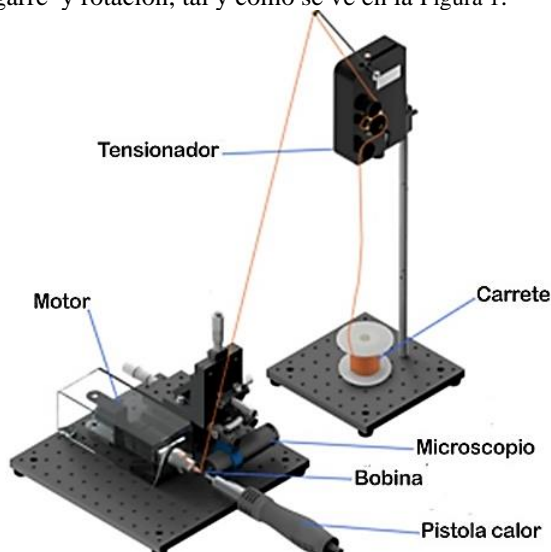
Existen nuevas aplicaciones de MEMS que implementan transformadores bobinados que demuestran nuevas posibilidades en componentes electromagnéticos MEMS [34]. No obstante, no se han encontrado estudios enfocados en sistemas bobinadores para la creación de componentes micrométricos de estas características.]

Los sistemas bobinadores industriales actuales pueden llegar a bobinar componentes de hasta varios milímetros. Existen varios tipos según su mecanismo de bobinado: los que bobinan sobre núcleos toroidales, los que lo hacen sobre armaduras ferromagnéticas de motores eléctricos, y los que lo hacen sobre núcleos axiales. Haciendo énfasis en los últimos, son sistemas semiautomáticos con dos grados de libertad; con dos motores se accionan el giro del bobinado y el desplazamiento de la guía del cable a través de un tornillo sin fin, respectivamente. Los actuadores se pueden manejar manualmente a través de una consola con botones y display. Esta consola también permite programar los parámetros de una operación de bobinado: velocidad de bobinado, número de vueltas, número de capas, paso del bobinado y velocidad de la guía.

## 2. Descripción del sistema

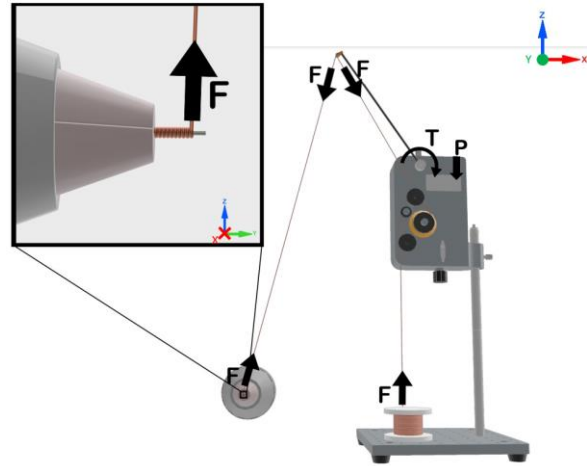
### 2.1. Descripción del sistema mecánico

El sistema se compone de una serie de estructuras estáticas y móviles que hacen posible la sujeción de un núcleo en torno al cual se puede bobinar un cable. Mecánicamente se compone de dos subsistemas principales: el tensionador del cable y el sistema de agarre y rotación, tal y como se ve en la Figura 1.



**Figura 1.** Montaje CAD del sistema de microbobinado.

El modelo del tensor es el YMH-00 de Tailkuke, que permite ajustar la tensión entre 2.5 and 14 cN. Este dispositivo permite tensar el cable con un par de torsión ajustable, generado por un peso también ajustable. El par de torsión junto con la longitud del brazo generan la fuerza de tensión. Esta es la aplicada en el cable por la polea sobre la que reposa en el extremo del brazo. A través de una serie de poleas y fijaciones se logra mantener fijo el cable mientras se le aplica la tensión y a su vez se desenrolla del carrete. Las tensiones están representadas en la Figura 2.



**Figura 2.** Diagrama de fuerzas del montaje mecánico.

El material del núcleo bobinado debe de ser lo suficientemente rígido para aguantar el esfuerzo de torsión provocado por la tensión del cable. Por ello es fundamental emplear materiales rígidos como soporte del bobinado.

El cable empleado es el HSP15 Solabond de Elektrisola un cable de cobre de 20  $\mu\text{m}$  de diámetro, con dos capas de 3  $\mu\text{m}$ ; una capa base de poliuretano y una de autoadhesivo de poliamida termo activable que permite la adhesión de las capas de cable entre sí mientras permanecen aisladas eléctricamente. La adhesión de las espiras se logra calentando el adhesivo del cable con una pistola de aire caliente a partir de 150°C. Experimentalmente, se ha determinado que la tensión mínima de 2.5 cN es la más adecuada para asegurar el bobinado sin romper el cable.

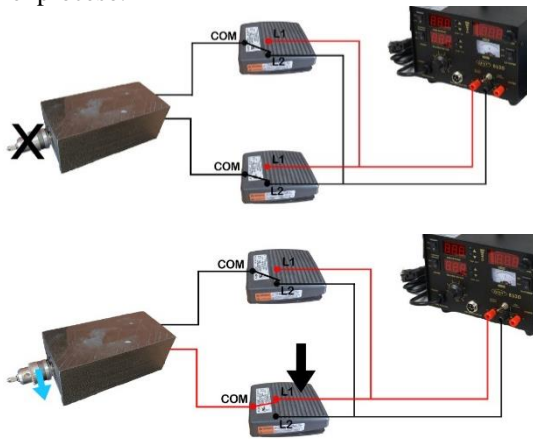
Por otro lado, el sistema de agarre y rotación lo forman un motorreductor DC con reducción 1:65, cuyo sentido y velocidad de giro se puede controlar a través del voltaje de alimentación, y el conjunto de portabrocas. El primer portabrocas, de SAN OU (China), está acoplado al eje y permite sujetar diámetros de 0.6-6 mm. El segundo, modelo 162A de Starrett (Reino Unido), está acoplado al primer portabrocas y aloja

diámetros ente 0-1 mm. Esta disposición permite bobinar núcleos sujetándolos únicamente por un extremo, eliminando problemas de alineamiento.

## 2.2. Descripción del sistema eléctrico y de control

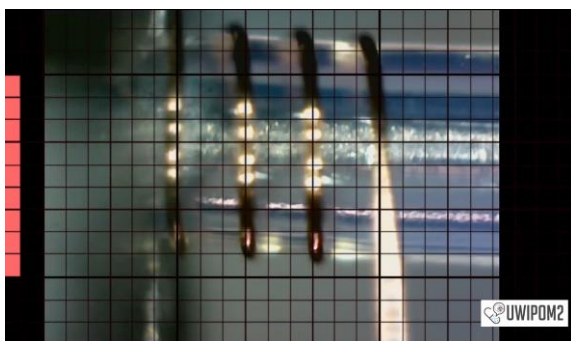
El motor está alimentado por una fuente de alimentación de tensión continua en un rango entre 4.6 y 6 V, lo que equivale a un rango de velocidad de giro entre 8.57 y 13.64 rpm, respectivamente.

Para controlar la activación y el giro del motor se emplean dos pedales. Cada uno cierra el circuito eléctrico en una dirección mientras se mantienen pulsados, tal y como se muestra en la Figura 3. Esto permite bobinar en una dirección u otra y deshacer las vueltas en el caso de que se haya detectado algún error en el proceso.



**Figura 3.** Diagrama del accionamiento eléctrico del sistema.

Para tener una realimentación visual se emplea un microscopio digital Wifi RS PRO-600X de RS-Components conectado a un PC. Este sistema de visión asistida se completa con el uso del programa OBS, que permite la integración de una cuadrícula calibrada. Con este sistema se puede visualizar una imagen con marcas de 20µm de resolución, como la de la Figura 4.



**Figura 4.** Visión amplificada calibrada con cuadrícula de medición.

Este sistema de control se complementa con una pistola de aire caliente integrada con la fuente y que sirve para activar el adhesivo de los cables en la fabricación de microinductores. Mediante el sistema de visión asistida el usuario podrá visualizar y medir el resultado de la fabricación.

## 3. Fabricación y construcción del sistema

La integración de los diferentes subsistemas de la máquina se ha realizado a través de bancadas, postes y tornillos para montajes ópticos de precisión.

El sistema de tensión se fija verticalmente a una bancada, de manera que el peso ajustable cree la tensión necesaria por gravedad.

En una bancada diferente, se instalan los demás dispositivos: el sistema rotativo queda fijo horizontalmente, y cubierto por una carcasa impresa en 3D para proteger al usuario del sistema de rotación, la pistola de aire caliente queda fijada con un soporte de manera que el flujo de aire se dirige sobre la zona de la muestra, y el sistema de visión asistida que se monta encima de dos mesas de desplazamiento. El microscopio dispone de desplazamiento en el eje perpendicular al eje del núcleo para poder calibrar el patrón del microscopio. También dispone de desplazamiento en eje paralelo al del núcleo para poder visualizar los diferentes tramos del bobinado. Se muestra la bancada de fabricación en la Figura 5.



**Figura 5.** Montaje real del puesto.

El coste total de los elementos del puesto asciende a aproximadamente 1500€.

## 4. Uso de la máquina y proceso de microbobinado

### 4.1. Preparación del puesto

Antes de iniciar el proceso de bobinado es necesario preparar el puesto de fabricación.

Primero se coloca el material que servirá como soporte rígido del bobinado. En el caso de los solenoides, una barra de material ferromagnético o de acero no magnético, según lo requiera la aplicación del sistema del que formará parte. En el caso de las antenas, el soporte será una funda tubular flexible de teflón (PTFE) en la que se inserta un eje de acero para aportar rigidez. El núcleo en cada caso se ajusta en el portabrocas de menor diámetro. Y después se acopla este portabrocas al de mayor tamaño.

Una vez el núcleo del bobinado se encuentra firmemente ajustado, de manera que su eje queda paralelo al eje de rotación, se procede con el cable. El cable de 20  $\mu\text{m}$  de cobre desde el carrete que está sujeto a la bancada, aunque su giro es libre para permitir desenrollar el cable. Después, éste recorre el sistema del tensionador, de manera que queda por encima de la polea final del brazo móvil del tensionador. Después, se fija el cable a la parte móvil del motor con cinta adhesiva, pasando el cable por debajo del núcleo del inductor o la antena. Esto se hace desde un lado u otro según el sentido deseado de bobinado. El tramo de cable entre el núcleo hasta la polea del tensor es el que se mantendrá en tensión y ejercerá la fuerza tractora. Seguidamente, se ajusta el tensor para aplicar al cable la tensión necesaria para el bobinado.

Después, se configura la fuente de alimentación con un voltaje entre 4.6 y 6V, para ajustar la velocidad de giro. También se establece la temperatura de la pistola de aire caliente a 150 °C, suficiente para la activación del adhesivo del cable, en el caso de los inductores.

El último paso en la preparación del puesto es colocar el microscopio en la posición deseada, e iniciar el programa OBS con la configuración de rejilla que permite, comparando con el diámetro conocido de los núcleos, saber el tamaño de cada celda para así fabricar inductores de diferentes tamaños o controlar el paso de cada vuelta en las antenas.

### 4.2. Proceso de fabricación

Tanto para la fabricación de inductores como de antenas, se parte del paso 1 de la Figura 6. En este se muestra el cable que ha sido pegado con cinta adhesiva al motor, pasando por debajo de los núcleos. El cable se encuentra tensionado y apoyado en el portabrocas, permitiendo un inicio controlado y ayudando en el caso

de los inductores multivuelta a comenzar la siguiente capa.

El bobinado se realiza a 20 rpm aproximadamente. Durante la fabricación de solenoides es necesario aplicar calor constantemente mientras se hace el bobinado, como se puede observar en la Figura 7; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, para así poder asegurar la adhesión entre espiras (paso 2, Figura 6, izquierda). En la fabricación de inductores multivuelta, a 2-3 vueltas del final de cada capa, la pistola de aire caliente se desconecta y se montan las primeras vueltas de la siguiente capa (paso 3, Figura 6, izquierda). Entonces, se reactiva el aire caliente y se procede como en la capa anterior (paso 4, Figura 6, izquierda).

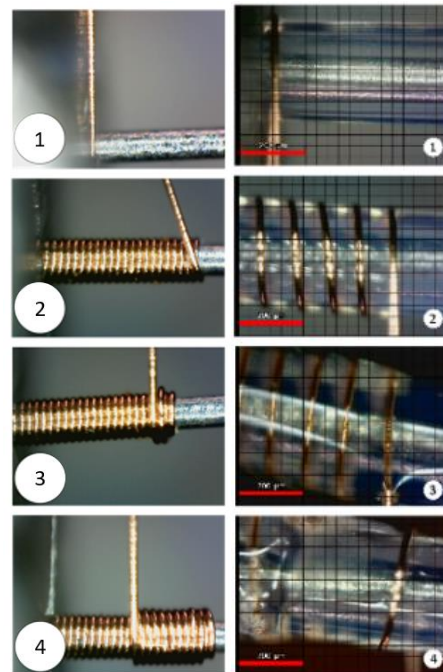


Figura 6. Pasos en la fabricación de inductores (izquierda) y antenas (derecha).



**Figura 7.** Aplicación de calor durante el proceso de bobinado de inductores.

Al cambiar de capa se mantiene el sentido de giro, pero se guía el cable para avanzar las espiras en sentido contrario. Esto impide que las capas queden contrapeadas, pero el nivel de compactación que se logra es alto incluso desarrollando varias capas.

En el caso de las antenas, el paso inicial (paso 1, Figura 6, izquierda) se complementa con la aplicación de una imprimación y posterior aplicación de adhesivo, ya que el adhesivo del cable no se fija bien al teflón. La adhesión al núcleo se hace por adhesivo de cianocrilato Loctite SF 770, que compatible con teflón.

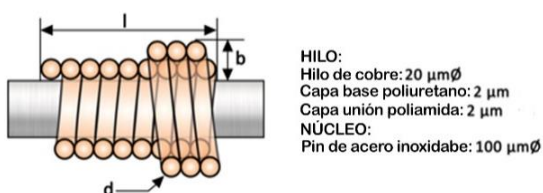
Mientras se realiza el bobinado el cable a baja velocidad se guía manualmente. No es necesario un movimiento automático de la guía en el proceso de bobinado de inductores, ya que, el mismo cable tiende a pegarse a la espira anterior y basta con forzar el cambio de sentido del bobinado en los extremos. En el proceso de bobinado de antenas tampoco es necesario un guiado automático, la cuadrícula calibrada en la pantalla permite alcanzar la precisión suficiente mientras se guía el cable manualmente. Se comprueba visualmente en el ordenador que el paso entre espiras es el adecuado (paso 2, Figura 6, derecha). Las antenas pueden estar compuestas por tramos eléctricamente independientes. Si este es el caso, una vez finalizado cada tramo se le aplica una capa de pegamento (paso 3, Figura 6, izquierda) y tras secarse se corta el cable con la longitud suficiente. Después se inicia un nuevo tramo, pegando las primeras vueltas, y repitiendo los pasos del primer tramo (paso 4, Figura 6, izquierda).

Una vez finalizado el proceso, se corta el cable dejando cierta longitud extra para tener mayor flexibilidad en las futuras integraciones. Después, se retira el núcleo del portabrocas y se almacena.

## 5. Resultados

### 5.1. Microinductores multicapa

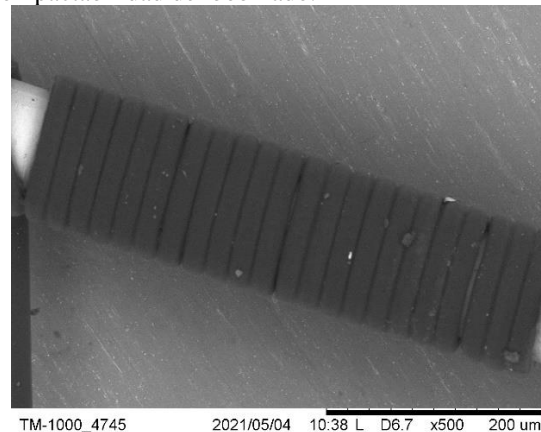
Los parámetros de diseño del inductor bobinado son: la longitud del inductor, el diámetro del núcleo, diámetro exterior, y la sección del conductor, según la disposición de la Figura 8.



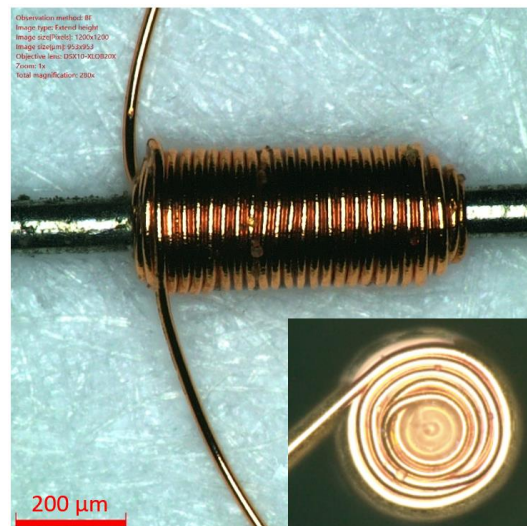
**Figura 8.** Parámetros de diseño de un solenoide.

Para núcleos de acero inoxidable 304 de  $100\ \mu\text{m}$  de diámetro se ha logrado fabricar microinductores de hasta 5 capas con 125 vueltas consecutivas, de entre  $577$  y  $680\ \mu\text{m}$  de longitud, diámetro exterior de entre  $150$  y  $300\ \mu\text{m}$  y con un factor de llenado medio del 85%. Las capas permanecen adheridas, correctamente alineadas y aisladas eléctricamente.

Se han tomado imágenes en microscopios ópticos y de barrido electrónico para la comprobación de los resultados en diferentes etapas del proceso. En la Figura 9 se muestra la captura de un bobinado de una capa. Se puede apreciar el buen nivel de compactación de espiras. En la Figura 10 se muestra una fotografía de un inductor fabricado con 5 capas. Se puede apreciar la calidad del proceso de fabricación, la precisión geométrica que se puede alcanzar y el nivel de compactabilidad del bobinado.



**Figura 9.** Fotografía en microscopio de barrido electrónico de un solenoide de una capa.

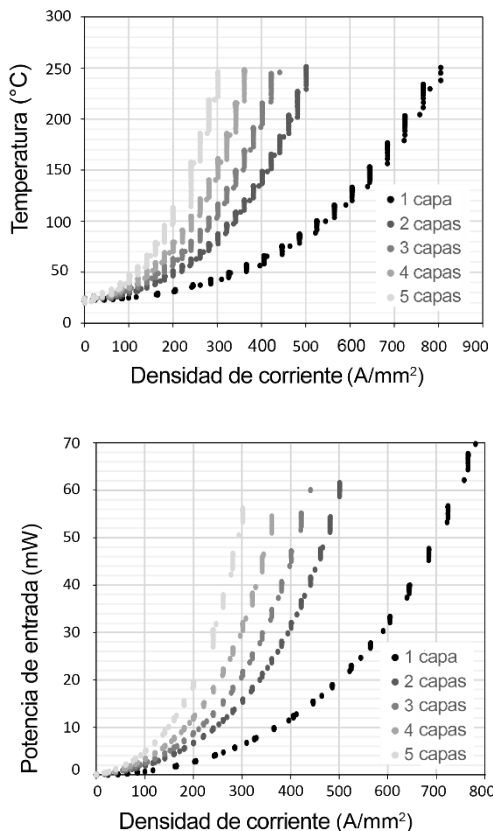


**Figura 10.** Vista frontal y lateral de un inductor de 5 capas en un microscopio óptico.

En los inductores, la densidad de campo magnético generada es proporcional a la cantidad de corriente que

circula por el conductor. Sin embargo, por el efecto Joule el conductor se calienta debido a la circulación de dicha corriente. Esto puede llevar a que debido al exceso de temperatura no sean seguros para usarse en determinados entornos, como el interior del cuerpo humano, o bien que se rompa el inductor por las tensiones inducidas en el calentamiento.

Se han realizado ensayos térmicos que buscaban identificar los límites de operación de los inductores. En la Figura 11 se muestran los ensayos de microinductores de entre 1 y 5 capas en aire a temperatura ambiente, incrementando la densidad de corriente a saltos de 20 A/mm<sup>2</sup> hasta el fallo. El fallo del bobinado ocurre a los 250°C, cuando la resistencia medida cae abruptamente indicando cortocircuito. A través de la resistencia se calcula la temperatura indirectamente, en función de la resistencia a temperatura ambiente y la medida durante operación.



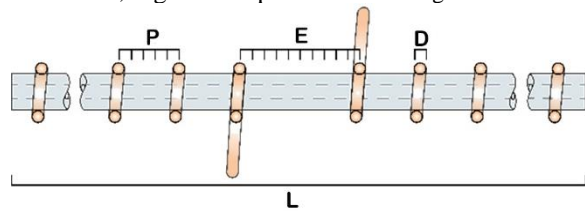
**Figura 11.** Ensayos térmicos para inductores bobinados de 1 a 5 capas de temperatura (arriba) y potencia consumida (abajo) en función de la densidad de corriente.

También, se han medido la potencia y la temperatura en función de la densidad de corriente. La densidad de corriente máxima admisible dependerá de la capacidad de disipación térmica del entorno de la

bobina. Sin embargo, aún para el caso de peor capacidad de disipación, que es el ensayo en aire, los valores de densidad de corriente alcanzados son 2 órdenes de magnitud mayores a los vistos en máquinas macroscópicas [38]. A medida que crece el número de capas la densidad de corriente máxima admitida se reduce. Tanto la temperatura como la potencia aumentan cuadráticamente con la densidad de corriente.

### 5.2. Microantenas

Los parámetros de diseño de la antena helicoidal bobinada son: la longitud de la antena, el diámetro del núcleo, el paso entre vueltas, y la sección del conductor, según la disposición de la Figura 12.

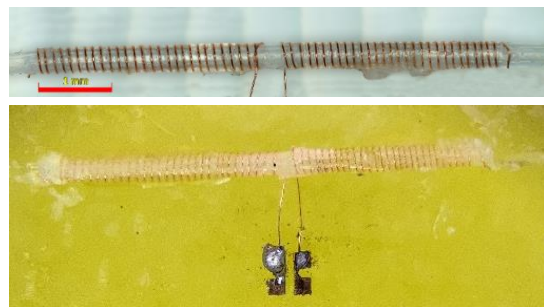


**Figura 12.** Parámetros de fabricación de una antena helicoidal.

Se han fabricado antenas con la siguiente configuración: longitud (L) de 6.1mm, diámetro exterior e interior del núcleo flexible de 300 μm y 100μm respectivamente, paso (P) de 100μm entre vueltas, un espacio entre las secciones (E) de 200 μm, y un diámetro de cable (d) de 26 μm.

De este modo, se han fabricado antenas helicoidales flexibles de 352 μm de diámetro total, con alta precisión en el paso entre las vueltas. La tasa de fiabilidad del proceso es de más de un 90%.

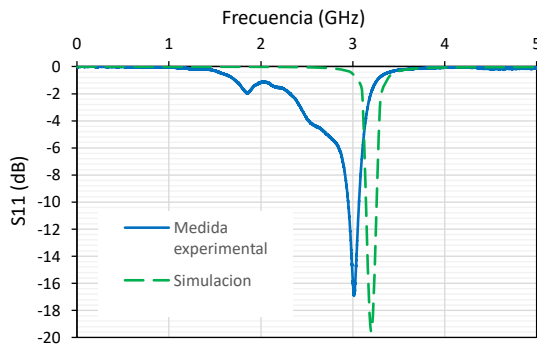
Para poder medir la señal de la antena fabricada se necesitan terminales que afectan al comportamiento frecuencial de la antena. En la Figura 13 se muestran la antena fabricada y los terminales soldados para la medida.



**Figura 13.** Antena fabricada (arriba) y antena con terminales de medida (abajo).

Por otro lado, se realizan simulaciones de elementos finitos con la herramienta HFSS del programa Ansys Electronics Desktop 2020 de la antena con los terminales. De este modo, se determinan la frecuencia de resonancia, coeficiente de reflexión y ganancia de la antena.

El modelo de la antena simulada con los terminales auxiliares tiene una frecuencia de resonancia de 3.2 GHz, donde el coeficiente de reflexión es de -19.6 dB, y la ganancia es de -10.87 dBi. En las mediciones experimentales realizadas, la frecuencia de resonancia es encontrada en 3 GHz, con un coeficiente de reflexión de -17 dB, mostrando una buena correlación entre los datos obtenidos por el modelo de simulación y los ensayos. Estos resultados son visibles en la gráfica de la Figura 14.



**Figura 14.** Comparación de medida y simulación del coeficiente de reflexión de la antena fabricada.

La diferencia entre los resultados medidos y simulados potencialmente se debe a la diferencia entre la impedancia de las sondas de medida y los terminales de la antena. Sin embargo, las mediciones quedan validadas, de manera que la antena sin los terminales auxiliares de medida tendrá la misma respuesta que su equivalente en el modelo, que tiene una frecuencia de resonancia de 4.7 GHz, coeficiente de reflexión de 25.1 dB, y ganancia de -4.7 dBi.

Las antenas fabricadas son prototipos finales de antenas flexibles de alta ganancia para aplicaciones de transferencia de energía inalámbrica. Sus materiales son biocompatibles, esto las hace componentes integrables en herramientas médicas, como catéteres o dispositivos implantables.

## 6. Conclusiones

Se ha desarrollado un sistema de fabricación micrométrica para bobinado de microcomponentes electromagnéticos. Se ha logrado fabricar antenas cilíndricas flexibles con núcleos dieléctricos de 6.1 mm

de largo y con un diámetro de 352  $\mu\text{m}$ , e inductores multicapa (hasta 5 capas) sobre núcleos no magnéticos con alto factor de llenado, con una longitud de 680  $\mu\text{m}$  y un diámetro de 300  $\mu\text{m}$ . Se consiguen fabricar antenas de alta ganancia y microinductores con niveles, ambos aptos para su integración como subsistemas en MEMS para uso biomédico entre otros. Los componentes obtenidos se han probado para validar su diseño y construcción. Las dimensiones y características logradas de los bobinados no tienen precedentes en la literatura, y los resultados obtenidos se han realizado por métodos poco explorados y explotados con un coste inicial bajo, y sin necesidad de entornos especiales como cámaras limpias.

## 7. Agradecimientos

Esta investigación está respaldada por el programa europeo Horizon 2020 de investigación e innovación, bajo el acuerdo de cesión No 857654–UWIPOM2. Además, este trabajo ha sido parcialmente respaldado por el Ministerio Español de Ciencia, Innovación y Universidades bajo el acuerdo de cesión RYC-2017-23684 del programa Ramon & Cajal.

Este trabajo también ha sido financiado por la Universidad de Alcalá en el marco de los Contratos Predoctorales para la Formación de Personal Investigador (2021). Especial agradecimiento a Carlos Morón, Héctor Cruz, y Alba Martínez por su aportación al desarrollo.

## 8. Referencias

- [1] V. R. C. Kode and M. C. Çavuşoğlu, "Design and characterization of a novel hybrid actuator using shape memory alloy and DC micromotor for minimally invasive surgery applications," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 12, no. 4, pp. 455–464, 2007.
- [2] T. Wang *et al.*, "Development of a high-speed synchronous micro motor and its application in intravascular imaging," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 218, pp. 60–68, 2014.
- [3] E. Y. Chow, S. P. Sanghani, and M. M. Morris, *Wireless MEMS-based implantable medical devices for cardiology*. Elsevier Ltd., 2017.
- [4] D. Terasawa, D. F. Wang, T. Kizaki, T. Itoh, and R. Maeda, "Developing MEMS DC electric current sensor for end-use monitoring of DC power supply: Part IV - Cantilever-based magnetic field sensor device," *DTIP 2014 - Symp. Des. Test, Integr. Packag. MEMS/MOEMS*, no. April, pp. 25–28, 2014.
- [5] A. H. Zahr *et al.*, "Long-term actuation demonstration of RF-MEMS switches for space applications," *Symp. Des. Test, Integr. Packag. MEMS/MOEMS, DTIP 2018*, vol. 2, pp. 1–4, 2018.
- [6] J. Serrano-Tellez *et al.*, "Experience on a



- cryogenic linear mechanism based on superconducting levitation,” in *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2012, vol. 8450.
- [7] J. L. Perez-Diaz, E. Diez-Jimenez, I. Valiente-Blanco, C. Cristache, M.-A. Alvarez-Valenzuela, and J. Sanchez-Garcia-Casarrubios, “Contactless mechanical components: Gears, torque limiters and bearings,” *Machines*, vol. 2, no. 4, 2014.
- [8] P. Dario, M. C. Carrozza, C. Stefanini, and S. D’Attanasio, “A mobile microrobot actuated by a new electromagnetic wobble micromotor,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 3, no. 1, pp. 9–16, 1998.
- [9] M. Kurosawa, T. Morita, and T. Higuchi, “Cylindrical ultrasonic micro motor based on PZT thin film,” *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, vol. 1, pp. 549–552, 1994.
- [10] S. Merzaghi, C. Koechli, and Y. Perriard, “Development of a hybrid MEMS BLDC micromotor,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 1, pp. 3–11, 2011.
- [11] E. Hendarto and Y. B. Gianchandani, “Marangoni-driven micromotor in liquid medium,” pp. 246–249, 2011.
- [12] A. Azzam Yasseen, J. N. Mitchell, J. F. Klemic, D. A. Smith, and M. Mehregany, “A rotary electrostatic micromotor  $1 \times 8$  optical switch,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 5, no. 1, pp. 26–32, 1999.
- [13] K. E. Wojciechowski, B. E. Baser, and A. P. Pisano, “A MEMS resonant strain sensor operated in air,” *Proc. IEEE Int. Conf. Micro Electro Mech. Syst.*, pp. 841–845, 2004.
- [14] D. Sparks *et al.*, “Embedded MEMS-based concentration sensor for improved active fuel cell performance,” *TRANSDUCERS EUROSENSORS '07 - 4th Int. Conf. Solid-State Sensors, Actuators Microsystems*, pp. 1911–1914, 2007.
- [15] R. Seto *et al.*, “Development and use of a micro optical blood flow sensor based on system in package (SiP) technology that fuses optical MEMS and integrated circuit to detect avian influenza,” *TRANSDUCERS EUROSENSORS '07 - 4th Int. Conf. Solid-State Sensors, Actuators Microsystems*, pp. 1955–1958, 2007.
- [16] G. Bosetti, J. Manz, U. Krumbein, and G. Schrag, “Full-system simulation of airborne capacitive MEMS transducers,” no. June, pp. 837–840, 2019.
- [17] K. Suzuki, Y. Nakayama, N. Shimizu, T. Mizuno, Y. Mita, and T. Yoshimura, “Supersensitive Ultrasound Probes for Medical Imaging by Piezoelectric MEMS with Complemented Transmitting and Receiving Transducers,” *IEEE Int. Ultrason. Symp. IUS*, vol. 2020-Septe, pp. 2020–2023, 2020.
- [18] R. Hadizadeh, A. Laitinen, D. Molinero, S. Cunningham, C. Vockerberger, and G. Weis, “Embedded Component Packaging for Wafer-Level Encapsulated and Integrated RF Mems,” *2019 20th Int. Conf. Solid-State Sensors, Actuators Microsystems Eurosensors XXXIII, TRANSDUCERS 2019 EUROSENSORS XXXIII*, no. June, pp. 1615–1618, 2019.
- [19] E. Diez-Jimenez *et al.*, “Magnetic and morphological characterization of Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B magnets with different quality grades at low temperature 5–300 K,” *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 451, 2018.
- [20] E. Diez-Jimenez, R. Sanchez-Montero, and M. Martinez-Muñoz, “Towards miniaturization of magnetic gears: Torque performance assessment,” *Micromachines*, vol. 9, no. 1, p. 16, Dec. 2017.
- [21] M. Martinez-Muñoz, E. Diez-Jimenez, R. Sanchez-Montero, P. L. Lopez-Espi, and J. A. Martinez-Rojas, “Analysis of the geometric parameters influence in PCB fixtures for 2D multipole magnetization patterning of thin layer micro-magnets,” *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, vol. 61, no. 1, 2019.
- [22] M. Martinez-Muñoz, E. Diez-Jimenez, G. V. Villalba-Alumbreros, M. Michalowski, and A. Lastra-Sedano, “Geometrical dependence in fixtures for 2D multipole micromagnets magnetization patterning,” *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.*, vol. 34, no. 7, 2019.
- [23] G. Lijiao, L. Xinheng, L. Yang, L. Hui, and C. Honglei, “Comparison of two structural magnetic coils for wireless power transfer,” *2017 20th Int. Conf. Electr. Mach. Syst. ICEMS 2017*, no. 51675354, 2017.
- [24] J. A. Martínez Rojas, J. L. Fernández, R. S. Montero, P. L. L. Espí, and E. Diez-Jimenez, “Model-based systems engineering applied to trade-off analysis of wireless power transfer technologies for implanted biomedical microdevices,” *Sensors*, vol. 21, no. 9, 2021.
- [25] G. Villalba-Alumbreros, C. Moron-Alguacil, M. Fernandez-Munoz, I. Valiente-Blanco, and E. Diez-Jimenez, “Scale Effects on Performance of BLDC Micromotors for Internal Biomedical Applications: A Finite Element Analysis,” *J. Med. Device.*, vol. 16, no. 3, Sep. 2022.
- [26] E. Diez-Jimenez, C. Alén-Cordero, R. Alcover-Sánchez, and E. Corral-Abad, “Modelling and test of an integrated magnetic spring-eddy current damper for space applications,” *Actuators*, vol. 10, no. 1, pp. 1–

- 18, 2021.
- [27] F. Sell-Le Blanc, J. Hofmann, R. Simmler, and J. Fleischer, “Coil winding process modelling with deformation based wire tension analysis,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 65, no. 1, pp. 65–68, 2016.
- [28] J. Luo, P. Cao, B. Yu, M. Zhang, and W. Xu, “The Coil Auto-lifting System of Intelligent Winding Machine,” *2021 4th Int. Conf. Robot. Control Autom. Eng. RCAE 2021*, pp. 246–250, 2021.
- [29] Y. Han *et al.*, “Design of Combined Printed Helical Spiral Antenna and Helical Inverted-F Antenna for Unmanned Aerial Vehicle Application,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 54115–54124, 2020.
- [30] D. Co and C. Rosit, “A Spaceborne Telemetry Loaded Bifilar Helical Antenna for LEO Satellites,” pp. 741–745, 1894.
- [31] R. E. Pawinanto, J. Yunas, M. M. Said, M. M. Noor, and B. Y. Majlis, “Design and fabrication of PCB based planar micro-coil for magnetic MEMS actuator,” *IEEE Int. Conf. Semicond. Electron. Proceedings, ICSE*, pp. 487–490, 2014.
- [32] D. Karanushenko, T. Kang, and O. G. Schmidt, “Shapeable Material Technologies for 3D Self-Assembly of Mesoscale Electronics,” *Adv. Mater. Technol.*, vol. 4, no. 4, 2019.
- [33] S. Uchiyama *et al.*, “Novel MEMS-based fabrication technology of micro solenoid-type inductor,” *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 23, no. 11, 2013.
- [34] A. Moazen-zadeh, F. Suarez Sandoval, N. Spengler, V. Badilita, and U. Wallrabe, “3-D microtransformers for DC-DC on-chip power conversion,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 9, pp. 5088–5102, 2015.
- [35] Benatav, “Benatav: White Paper on Ultra-Fine Wire Technologies in Medical Devices,” 2021. [Online]. Available: <https://benatav.com/wp-content/uploads/2016/11/white-paper.pdf>. [Accessed: 23-Sep-2021].
- [36] Audemars, “Audemars Custom Micro Coil Solutions Information,” 2021. [Online]. Available: <https://audemars.com/micro-coils-manufacturing/>. [Accessed: 23-Sep-2021].
- [37] H. Ota, T. Oda, and M. Kobayashi, “Development of coil winding process for radial gap type electromagnetic micro-rotating machine,” *Proc. IEEE Micro Electro Mech. Syst.*, pp. 197–202, 1995.
- [38] J. Klein and H. Guckel, “High winding density micro coils for magnetic actuators,” *Microsyst. Technol.*, vol. 4, no. 4, pp. 172–175, 1998.