



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

**TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

# **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ESTIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA CULTIVOS CELULARES**

AUTOR: MARCOS GARCÍA CASTELLÓ

TUTOR: MANUEL MONLEÓN PRADAS

COTUTOR: JORGE MÁS ESTELLÉS

**Curso Académico: 2018-19**

## **AGRADECIMIENTOS**

“Gracias, de corazón, a todas las personas que han estado conmigo durante esta travesía que ha sido este TFG sin fin. Una mano amiga o unas palabras de ánimo siempre son reconfortantes, más aún en este nuevo reto que ha supuesto nuestro trabajo final de grado.

A mi familia, se que siempre me habéis apoyado,

A mi tutor, Jorge Más, viendo el lado positivo,

A Toni por enseñarme que todavía hay grandes personas en las que confiar,

A Ricardo, por ayudarme a dar vida al proyecto,

A Paula, por su *ayuda desinteresada* y por esos 390 m de hilo de cobre que tocó desenrollar,

Y a ti lector, por cederme unos minutos de tu tiempo,

Moltes gràcies”

## **RESUMEN**

La regeneración neuronal ha ido tomando importancia con el paso del tiempo y con ella, las aplicaciones en la ingeniería tisular. Además, se ha demostrado en múltiples artículos, como el uso de células de Schwann favorecen la regeneración. La estimulación electromagnética es un procedimiento utilizado en investigación para acelerar la regeneración neuronal. En este TFG se va a presentar un diseño de un biorreactor capaz de crear un campo magnético, el cual va a inducir una corriente de  $100 \mu\text{A}$  en una espira como consecuencia de la ley de Faraday. Dicha espira se posicionará en el interior de una placa Petri donde se sembrarían las células de Schwann para su posterior estimulación. El biorreactor consta de unas bobinas de Helmholtz apoyadas en las guías del bastidor, favoreciendo la comodidad y manejabilidad. Además, el diseño es completamente autoclavable, lo que permite su uso en el interior de una incubadora. Con el uso de un transformador, es posible controlar la intensidad de la inducción magnética, llegando a obtener  $40,8 \text{ mT}$  con  $1,1 \text{ A}$ , induciendo los  $100 \mu\text{A}$  en una espira de  $100 \Omega$ . Asimismo, se ha realizado un estudio térmico del diseño para averiguar los posibles protocolos de estimulación. Pese a que el diseño está preparado únicamente para placas Petri de  $3,5 \text{ cm}$  de diámetro, lo que limita su rango de trabajo, el biorreactor es fácilmente replicable. No obstante, es posible mejorar la eficiencia del biorreactor con el uso de un variador de frecuencia, y así trabajar a corrientes más pequeñas, generando menos calor.

**Palabras Clave:** Células de Schwann, bobinas Helmholtz, inducción electromagnética, estimulación electromagnética

## RESUM

Amb el pas del temps, la regeneració neuronal ha agafat importància i amb ella, les aplicacions en l'enginyeria tissular. A més, s'ha mostrat en diversos articles com l'ús de les cèl·lules de Schwann promouen la regeneració. L'estimulació electromagnètica és un procediment utilitzat en investigació per a accelerar la regeneració neuronal. En aquest TFG es presentarà un disseny d'un bioreactor capaç de crear un camp magnètic, el qual induirà un corrent de 100  $\mu\text{A}$  en una espira com a conseqüència de la llei de Faraday. Aquesta espira es posicionarà a l'interior d'una placa Petri, on se sembrarien les cèl·lules de Schwann per a la seua posterior estimulació. El bioreactor consta d'unes bobines Helmholtz recolzades a les guies del bastidor, afavorint la comoditat i manipulació. A més, el disseny és totalment esterilitzable, la qual cosa permet la seua utilització dins d'una incubadora. Amb l'ús d'un transformador és possible controlar la intensitat de la inducció magnètica, arribant a obtenir 40,8 mT amb 1,1 A, induint els 100  $\mu\text{A}$  en una espira de 100  $\Omega$ . Així mateix, s'ha realitzat un estudi tèrmic del disseny per a esbrinar els possibles protocols d'estimulació. Encara que el disseny està preparat només per a plaques Petri de 3,5 cm de diàmetre, limitant el seu rang de treball, el bioreactor és fàcilment replicable. No obstant això, és possible millorar l'eficiència del bioreactor amb l'ús d'un variador de freqüència i així treballar amb corrents més baixos, generant menys calor.

**Paraules clau:** cèl·lules de Schwann, bobines Helmholtz, inducció electromagnètica, estimulació electromagnètica

## **ABSTRACT**

Neural regeneration has become a real challenge along the last years and with it, applications in tissue engineering. In addition, it has been shown in several articles, as the use of Schwann cells promote regeneration. Electromagnetic excitation is a procedure among the different techniques to speed up the cell regeneration. In this FPUD (final project university degree), a novel design of a bioreactor to be able to create a magnetic field will be presented, which will induce a current of 100  $\mu\text{A}$  in a turn, as a result of Faraday's law. This turn will be positioned within a Petri dish, where Schwann cells would be sown for further stimulation. The bioreactor is composed of Helmholtz coils, supported on a guideway, providing comfort and easy handling. In addition, the design is completely autoclavable, allowing its use inside an incubator. Using an electrical transformer, it is possible to manage the intensity of the magnetic induction, achieving 40.8 mT with 1.1 A, inducing 100  $\mu\text{A}$  in a 100  $\Omega$  turn. In order to determine the behaviour of the design, a thermal study of the design has been carried out to find out different stimulation protocols. Although the design is configured only for 3.5 cm diameter Petri dishes, limiting its working range, the bioreactor is easily replicable. However, With this design would be possible to slightly improve the efficiency of the bioreactor with the use of a variable frequency drive VFD, and thus working with smaller current reducing the generated heat.

**Keywords:** Schwann cells, Helmholtz coils, electromagnetic induction, Electromagnetic stimulation.

## ÍNDICE

### DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFG

- Memoria del Trabajo Fin de Grado
- Presupuesto
- Planos
- Anejos

### ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Objetivo del documento .....	1
1.2. Antecedentes, motivación y justificación .....	1
2. FUNDAMENTOS .....	3
2.1. Sistema nervioso periférico .....	3
2.1.1. Neuronas. Células de Schwann .....	4
2.2. Estimulación neuronal .....	5
2.2.1. Estimulación eléctrica y sus efectos .....	5
2.2.2. Estimulación magnética y sus efectos .....	6
2.3. Electromagnetismo .....	8
2.3.1. Ley de Biot y Savart .....	8
2.3.2. Campo magnético creado por una espira circular .....	8
2.3.3. Campo magnético creado por un solenoide .....	10
2.3.4. Campo magnético creado por un solenoide con bobinado formado por varias capas de espiras .....	11
2.3.5. Bobinas de Helmholtz .....	12
2.3.6. Inducción electromagnética. Leyes de Faraday y Lenz .....	14
2.3.7. Inductancia .....	15
3. DISEÑO DEL BIORREACTOR .....	17

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ESTIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA CULTIVOS CELULARES

---

3.1. Pliego de condiciones .....	17
3.2. Posibles soluciones de diseño .....	17
4. CONSTRUCCIÓN DEL BIORREACTOR .....	21
4.1. Diseño final .....	21
4.2. Mecanizado del biorreactor .....	27
5. VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL BIORREACTOR .....	31
5.1. Pruebas eléctricas .....	31
5.2. Pruebas térmicas .....	40
5.3. Propuestas de mejora .....	43
6. CONCLUSIONES .....	47
6.1. Conclusiones generales .....	47
6.2. Líneas futuras.....	48
Bibliografía .....	49
Listado de Figuras .....	51
Listado de Tablas .....	53

## ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

Información del presupuesto del biorreactor .....	57
Presupuesto del biorreactor .....	59
Partida 1: Documentación .....	59
Partida 2: Diseño 3D y planos .....	60
Partida 3: Mecanizado y montaje .....	61
Partida 4: Pruebas eléctricas .....	62
Partida 5: Pruebas térmicas .....	63
Partida 6: Redacción de la memoria .....	64
Total .....	65

## ÍNDICE DE LOS PLANOS

- Plano 1: Base bobina y tope (piezas 1 y 4)
- Plano 2: Tapa sin guía y viga superior (piezas 2 y 8)
- Plano 3: Tapa con guía (pieza 3)
- Plano 4: Pared lateral (pieza 5)

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ESTIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA CULTIVOS CELULARES

---

Plano 5: Pared trasera y viga inferior (piezas 6 y 7)

Plano 6: Bobina desmontada

Plano 7: Bastidor desmontado

Plano 8: Biorreactor desmontado

**ANEJO A – CÁLCULOS DEL CAMPO MAGNÉTICO A PARTIR DE LA CORRIENTE A INDUCIR**

**ANEJO B – CÁLCULOS DEL EFECTO JOULE EN LAS BOBINAS**





**MEMORIA DEL TRABAJO  
FIN DE GRADO**



## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. OBJETIVO DEL DOCUMENTO**

El objetivo de este TFG es diseñar y construir un biorreactor, haciendo un estudio de los métodos y valores empleados para crear un campo magnético que estimule a las neuronas en las investigaciones celulares.

La función principal del biorreactor es crear un campo magnético lo suficientemente intenso como para inducir una corriente en una espira compuesta de un biomaterial y recubierta de un metal como oro o platino, materiales no citotóxicos. Dicha espira se encuentra inmersa en un cultivo de células de Schwann, con el propósito de estimular eléctrica y magnéticamente a las células y así favorecer su regeneración más temprana.

### **1.2. ANTECEDENTES, MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN**

Las lesiones nerviosas periféricas son más comunes de lo que parecen, pues su principal causante son los accidentes automovilísticos e industriales (Noble, Munro, Prasad, & Midha, 1998) (Kouyoumdjian, 2006). Asimismo, las enfermedades degenerativas, tales como la enfermedad de Charcot Marie Tooth y el síndrome de Guillain-Barré, también son causantes de dichas lesiones, pues provocan la desmielinización de las neuronas y su posterior muerte.

Si un nervio periférico es dañado, puede provocar un corte de comunicación entre el cerebro y sus receptores, como son los músculos y los órganos. Se denomina neuropatía periférica al dolor producido por daños en los nervios periféricos. Una lesión en estas finas y frágiles fibras nerviosas puede desencadenar en disestias mencionadas por los pacientes, como puede ser un pequeño hormigueo, dolor, quemazón, frialdad en las extremidades, incluso la pérdida de sensibilidad térmica y dolores (Santiago Pérez, Espinosa, Pérez Conde, Merino Andréu, & Ferrer Gila, 2019).

A principios del siglo XX, dos pioneros como fueron Cajal y Tello, ya comenzaron a investigar sobre la regeneración del sistema nervioso. Tello observó la importancia de las células de Schwann durante la regeneración de las fibras nerviosas (Nieto-Sampedro et al., 2002). Posteriormente, estalló la Primera Guerra Mundial y sus consecuentes guerras, donde los traumatismos del nervio periférico se daban con mayor probabilidad (Robinson, 2000), como heridas de bala (Noble et al., 1998), es por ello que los estudios acerca de las lesiones del nervio periférico, su reparación y recuperación tomaron más interés.

En la actualidad, las lesiones del nervio periférico han tenido mucha repercusión, y muchos investigadores han centrado sus estudios en encontrar distintos métodos efectivos para la regeneración y recuperación del tejido nervioso. Existen cuatro métodos que lideran la reparación neuronal (Suszyński, Marcol, & Górka, 2015), el primero de ellos es la terapia cinética de lesiones del

nervio periférico, el segundo es la **electroestimulación** que es considerada como la más efectiva de las cuatro, la tercera es la **magnetoterapia** que pisa los pies a la electroestimulación, y por último, la estimulación bio-laser.

En los últimos años, el centro de biomateriales e ingeniería tisular de la Universidad Politécnica de Valencia (CBIT), ha trabajado con el propósito de encontrar un método eficaz para la regeneración nerviosa. Por esa razón, se ha optado por diseñar y construir un electroestimulador para investigar la posible estimulación y regeneración de las células de Schwann y poder contribuir al avance médico.

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS

### 2.1. SISTEMA NERVIOSO PERIFÉRICO

La función principal del sistema nervioso es la comunicación por medio de impulsos nerviosos, los cuales transportan la información a través de las neuronas directos a todas las partes del organismo. El sistema nervioso central (SNC) tiene la función de modificar y elaborar dichos impulsos, que pasan al sistema nervioso periférico (SNP), que permite la unión entre el principio de la creación de estos impulsos hasta los órganos receptores, Fig 1. Esta unión se produce gracias a las células nerviosas, cuya morfología, con extensas prolongaciones y características electrofísicas, las hacen idóneas para este trabajo.

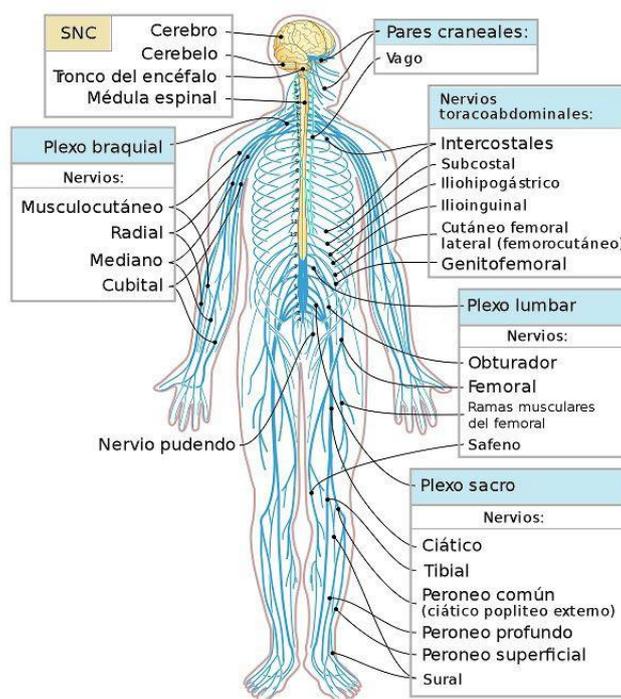


Fig 1. Partes del SNC y SNP. Fuente: Google

El SNP, formado por el tejido nervioso que no se encuentra el SNC, tiene como función comunicar las neuronas del SNC con todo el organismo. Los ganglios son su principal componente celular. Dentro del SNP se pueden distinguir dos tipos diferentes de fibras nerviosas:

- Las fibras nerviosas motoras o eferentes, encargadas de enviar los impulsos nerviosos a los efectores (secreción de sustancias, movimiento, etc.).
- Las fibras nerviosas sensitivas o aferentes, cuya misión es llevar los impulsos nerviosos producidos en los receptores u órganos sensoriales de vuelta al SNC.

Ante un cambio en el entorno, puede darse el caso de que el sistema nervioso deba cambiar su estructura y funcionamiento a lo largo de su vida; a este cambio se le denomina plasticidad cerebral. Si se produjera un daño en las dendritas o en los axones del SNP, es posible su regeneración si el cuerpo celular sigue intacto y existen de Células de Schwann; en cambio en el SNC, la reparación es mínima o nula.

### 2.1.1 Neuronas. Células de Schwann

La célula nerviosa y todas sus prolongaciones forman lo que hoy en día conocemos como **neurona**. Existen muchos tipos de neuronas, pero hay ciertas partes como son el soma, las dendritas, el axón y la terminación axonal que están presentes en todas las neuronas. En lo que respecta a su morfología, ninguna neurona es igual a la anterior tal y como se observa en la Fig 2.

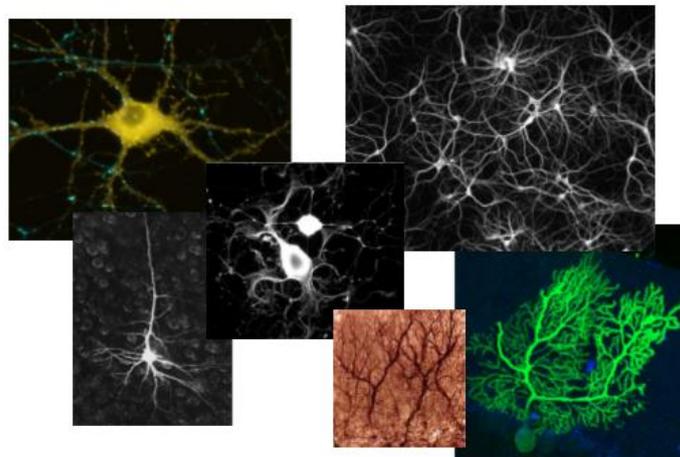


Fig 2. Diferentes morfologías neuronales. Fuente: Apuntes Medicina UVic, Bet Sarri

Las **células de Schwann** son las células que rodean a los axones de las fibras nerviosas del SNP, Fig 3. Tienen tres funciones imprescindibles, proteger los axones de los agentes externos, dar apoyo metabólico continuo a las células del sistema nervioso periférico, por último y más importante, la producción de mielina. Este orgánulo es esencial para los procesos de neuroconducción, pues aumenta la velocidad y eficiencia de la transmisión de los impulsos nerviosos. Las células de Schwann que envuelven a los axones se denominan vaina de mielina.

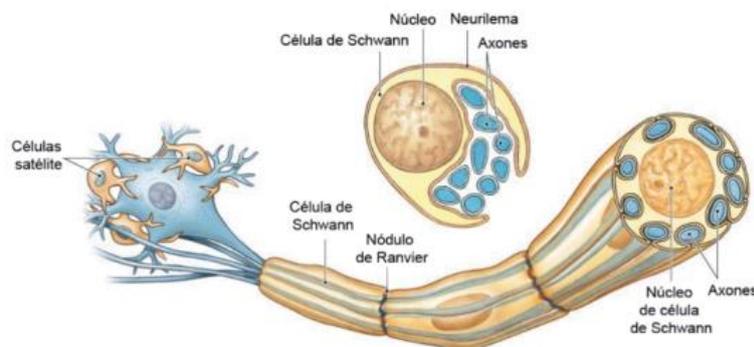


Fig 3. Diagrama de las células presentes en el sistema nervioso periférico: neuronas, células satélite y células de Schwann. Fuente: (Vilariño Feltrer, 2015)

Estas células gliales, que encontramos únicamente en el SNP, son vitales para la regeneración neural, pues liberan moléculas y sustratos que favorecen el crecimiento axonal (Huang et al., 2010).

## 2.2. ESTIMULACIÓN NEURONAL

En cualquier parque infantil, encontrarse niños correteando y jugando con los columpios es algo cotidiano, pero de vez en cuando, algún niño o niña, puede hacerse un corte con alguna piedra, o una mala caída. La mayoría de las veces un poco de agua oxigenada y una tirita es suficiente.

Al igual que sucede con los cortes en la piel, ocurre lo mismo con las lesiones nerviosas, si la herida es menor de 2 cm, aproximadamente, el propio organismo es capaz de regenerarlo (Koppes et al., 2013), mientras que, si la herida es mayor, es posible que se necesite acudir a cirugía u otros métodos que favorezcan la regeneración axonal, como pueden ser **la estimulación eléctrica y magnética**.

### 2.2.1. Estimulación eléctrica y sus efectos

La estimulación eléctrica puede ser tratada como una asistencia en la reparación neuronal. Artículos publicados por reconocidos investigadores aseguran que si se estimula previamente las células de Schwann se produce un mayor crecimiento neuronal (Koppes et al., 2013). Además, si se estimulan las células de Schwann y las neuronas (*in vitro*) al mismo tiempo con un campo eléctrico endógeno, se crea una plataforma que permite examinar la respuesta neuronal sin necesidad de trabajar con animales (*in vivo*).

La estimulación eléctrica ha tomado muchos caminos con el paso de los años. En 2013 se observó que una estimulación simultánea de las células de Schwann y las neuronas con corriente continua (DC), favorecía el crecimiento neuronal, pues dicha estimulación altera el fenotipo de las células de Schwann, produciendo así la secreción de más factores de crecimiento nervioso (NGF), lo que a su vez favorece la proliferación y el crecimiento axonal. También genera cambios en las moléculas de adhesión celular, además de una migración celular que apoya y repuebla la zona lesionada (Koppes et al., 2013).

El método común de estimulación eléctrica *in vitro* es la creación de un campo eléctrico a partir de una celda electrolítica, pero existen más formas de inducir una corriente, como puede ser el caso de hacer pasar una corriente a través de una superficie conductora, y así estimular las células nerviosas (Nguyen et al., 2013). La ventaja de esta estimulación, además de producir los mismos efectos que la estimulación con un campo eléctrico exterior es obtener una estimulación localizada, donde es posible dar forma al sustrato y controlar la topología para guiar el crecimiento axonal.

Otros autores, optan por utilizar un scaffold de polipirrol, es decir, consiste en depositar las células de Schwann dentro de un soporte conductor y obtener una mayor regeneración neuronal. Con este tipo de estimulación, aumenta drásticamente la proliferación y los factores de crecimiento nervioso (Huang et al., 2010), concretamente, funciones como la migración celular, la adhesión celular, la replicación ADN y la secreción proteínica se regulan controlando el voltaje y la densidad de corriente (Nguyen et al., 2013).

En resumen, los efectos principales de la estimulación eléctrica son:

- Secreción por parte de las células de Schwann de proteínas para el crecimiento axonal.
- Adhesión celular.
- Migración celular a la zona lesionada.
- Proliferación.
- Replicación del ADN.

### 2.2.2. Estimulación magnética y sus efectos.

En 1976, Wilson y Jagadesh fueron los primeros en mostrar que al igual que la estimulación eléctrica, los campos magnéticos pulsantes favorecen la regeneración neuronal (Bervar, 2005). Los campos magnéticos permiten mejorar propiedades de los cultivos celulares de forma segura y eficiente, teniendo en cuenta tres factores clave:

- Intensidad.
- Forma de la onda.
- Frecuencia.

A partir de un estímulo físico como puede ser un campo magnético, estático o alterno es posible modificar el crecimiento celular mediante el control del estado fisiológico de las células.

Las células de Schwann sirven como guías para el crecimiento axonal. Con ayuda de los campos magnéticos, es posible direccionarlas, por esta razón, la estimulación magnética ha captado el interés de muchos investigadores. El objetivo principal es guiar dichas células en la dirección deseada para la regeneración axonal, Fig 4a, donde es posible utilizarlas como scaffold para la regeneración nerviosa (Ishak, 2017).

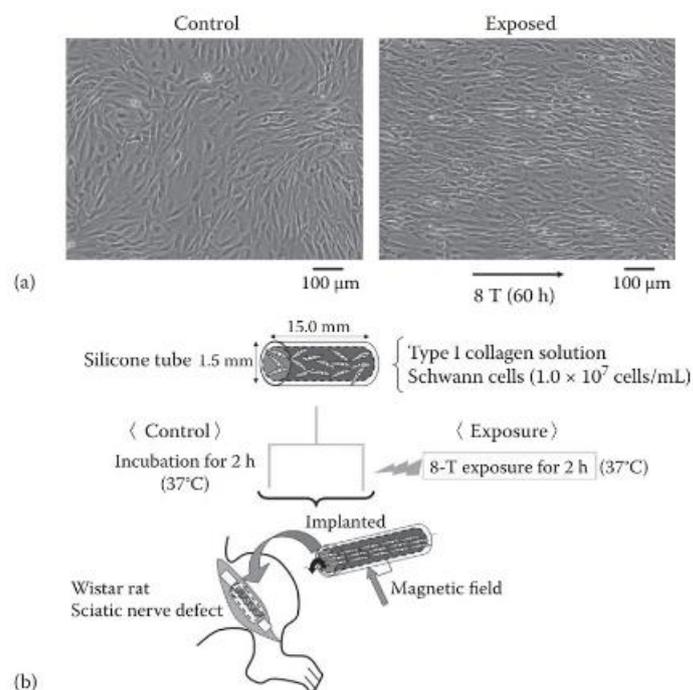


Fig 4. (a) Células de Schwann antes y después de exponerlas a un campo magnético. (b) Tubo de silicona para favorecer la guía para el crecimiento axonal. Fuente:(Ishak, 2017)

Artículos demuestran que la estimulación eléctrica puede cambiar el pH local o la temperatura de los cultivos (YAMAGUCHI-SEKINO, SEKINO, & UENO, 2011), lo que puede suponer la muerte de las células. De modo que la estimulación magnética toma una posición importante en la regeneración neuronal.

Entonces, para buscar una vía distinta a la estimulación eléctrica y basándose en la idea de usar a las células de Schwann como guías, muchos investigadores han optado por acelerar el proceso y aumentar su eficiencia. Aparecen entonces dos ideas que mejoran el control y guía de las células de Schwann con el uso de campos magnéticos.

La primera de ellas es el uso de nanopartículas magnéticas que, junto a un campo magnético de menor intensidad que el empleado en la Fig 4a, ayudan a las células nerviosas a moverse en la dirección del campo magnético creado, tal y como se observa en la Fig 5.

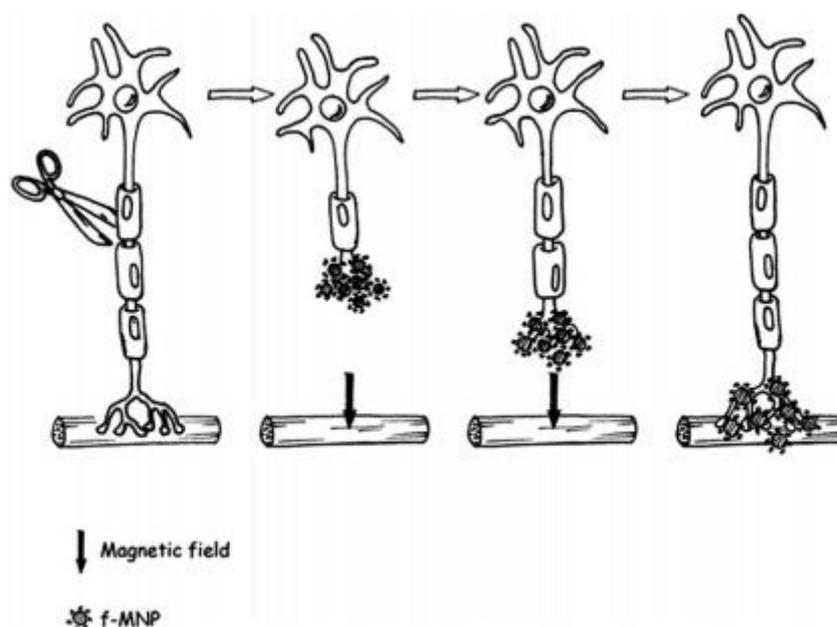


Fig 5. Uso de nanopartículas magnéticas para guiar el crecimiento axonal tras una lesión nerviosa, con ayuda de un campo magnético endógeno. Fuente:(Riggio et al., 2014)

La segunda, es el uso de nanotubos (Vilariño Feltrer, 2015). La función de los nanotubos es servir como guía y nervio artificial para las células de Schwann, de forma que los axones crecerán por el camino creado por las células nerviosas direccionadas por los nanotubos y el campo magnético hasta que la lesión nerviosa se repare. Este nanotubo ha de ser de un biomaterial que no sea rechazado por el organismo, un ejemplo podría ser un nanotubo de silicona, Fig 4b. Se ha comprobado que el uso de nanotubos junto a un campo magnético externo incrementa la cantidad y el diámetro de los axones regenerados (Ishak, 2017).

Además, una de las mayores ventajas de la estimulación magnética es su carácter no invasivo, se evita el paso de los pacientes con lesiones nerviosas por quirófano, en el caso de que la lesión no sea mayor de 2-4 cm. Asimismo, se evita a los pacientes y operadores a estar en contacto con una radiación ionizante, ofreciendo una mayor seguridad, evitando futuras enfermedades derivadas de la radiación ionizante, tales como leucemia y otros cánceres.

## 2.3 ELECTROMAGNETISMO

### 2.3.1. Ley de Biot Y Savart

Hacia 1820, Hans Christian Oersted, Profesor de Electricidad, Magnetismo y Galvanismo en la Universidad de Copenhague, descubrió accidentalmente que una corriente eléctrica es capaz de desviar la posición de una brújula. Este hallazgo suponía la conexión entre dos fenómenos que hasta entonces se suponían independientes, la Electricidad (entonces conocida como Galvanismo), y el Magnetismo.

Poco más tarde, Jean Baptiste Biot y Félix Savart encontraron, empíricamente, la relación matemática entre un elemento de corriente y el campo magnético producido. Se conoce como elemento de corriente a un elemento infinitesimal del hilo conductor con una corriente transportada  $I$ :  $I d\vec{\ell}$

Si  $\vec{r}$  es el vector de posición del punto  $P$  donde queremos conocer el campo magnético, respecto del elemento de corriente considerado, la ley de Biot y Savart nos dice que dicho campo magnético creado por el elemento de corriente en cuestión es:

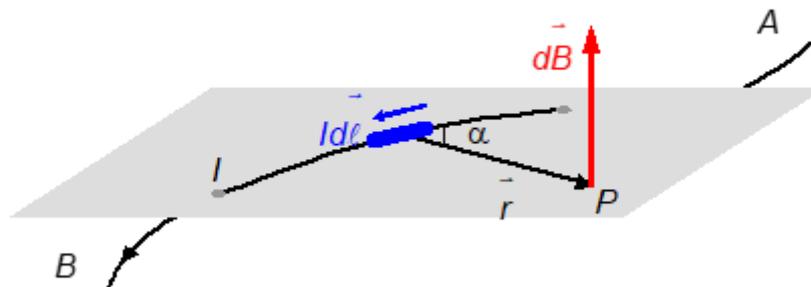


Fig 6. Campo magnético creado por una corriente que atraviesa un hilo. Fuente: Propio

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I d\vec{\ell} \times \vec{r}}{4\pi r^3} \quad (1)$$

Pero si queremos conocer el campo magnético creado por un trozo de conductor finito, limitado por dos puntos A y B, Fig 6, el campo magnético será el resultado de integrar vectorialmente el campo debido a cada elemento de corriente entre A y B:

$$\vec{B} = \int_A^B \frac{\mu_0 I d\vec{\ell} \times \vec{r}}{4\pi r^3} \quad (2)$$

### 2.3.2. Campo magnético creado por una espira circular.

La ecuación anterior puede aplicarse para calcular el campo magnético creado por conductores de muy diversas formas. El más conocido, es el campo creado por una **espira circular** de radio  $R$ , recorrida por una corriente  $I$ , en un punto sobre su eje situado a una distancia  $d$  del centro de la espira, tal y como se muestra en la Fig 7:

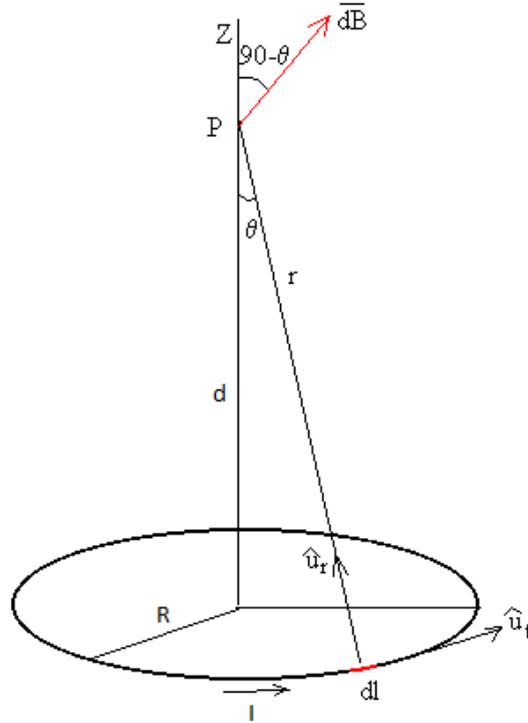


Fig 7. Espira circular. Fuente: Pág web: <http://www.sc.edu.es>, Autor: Ángel Franco García

Geoméricamente, se comprueba que:

$$d\ell = R d\varphi \quad (3)$$

$$r^2 = R^2 + d^2 \quad (4)$$

$$\text{sen } \theta = \frac{R}{r} \quad (5)$$

Si tomamos un elemento infinitesimal de espira  $d\vec{\ell}$ , con su sentido determinado por la corriente que circula por ella, el módulo del campo magnético creado por dicho elemento de corriente en P es:

$$|d\vec{B}| = \frac{\mu_0 I d\ell \cdot r \cdot \text{sen}90^\circ}{4\pi r^3} = \frac{\mu_0 I d\ell}{4\pi r^2} = \frac{\mu_0 I R}{4\pi r^2} d\varphi \quad (6)$$

La componente horizontal del campo total se anula por simetría, quedando únicamente la componente en la dirección del eje de la espira, cuya resultante debida a la espira completa, es:

$$\begin{aligned} B &= \int_0^{2\pi} |d\vec{B}| \text{sen } \theta = \int_0^{2\pi} \frac{\mu_0 I R R}{4\pi r^2 r} d\varphi = \int_0^{2\pi} \frac{\mu_0 I R^2}{4\pi r^3} d\varphi \\ &= \int_0^{2\pi} \frac{\mu_0 I R^2}{4\pi \sqrt{(R^2 + d^2)^3}} d\varphi = \frac{\mu_0 I R^2}{2\sqrt{(R^2 + d^2)^3}} \end{aligned} \quad (7)$$

Este campo magnético va en la dirección del eje de la espira, y su sentido viene determinado por el de la intensidad de corriente que circula por ella.

### 2.3.3. Campo magnético creado por un solenoide

El campo magnético creado por una única espira recorrida por una corriente puede hacerse más fuerte multiplicando el número de espiras, dando lugar a lo que se conoce como un **solenoide** o **bobina**. Si dicho bobinado es el conjunto formado por muchas espiras,  $N$ , con una longitud  $L$  y un radio  $R$ , entonces el campo magnético en un punto  $P$  del eje, exterior al solenoide, y situado a una distancia  $d$  del extremo del solenoide es el mostrado en la Fig 8:

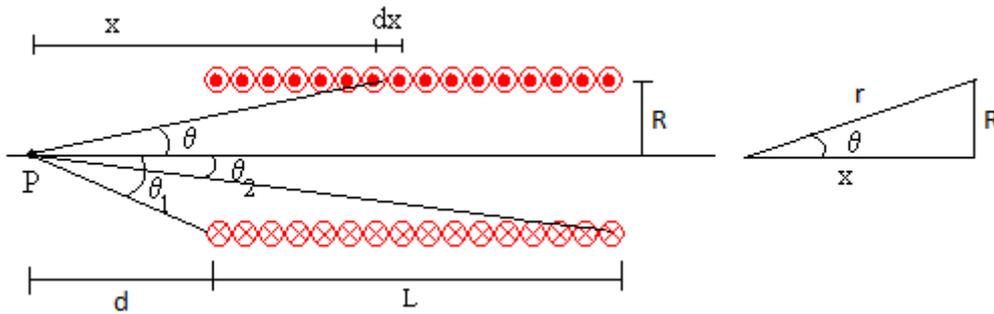


Fig 8. Solenoide. Fuente: Pág web: <http://www.sc.ehu.es>, Autor: Ángel Franco García

Geoméricamente, se comprueba que

$$x = R \cdot \cotg \theta \quad (8)$$

$$dx = -\frac{R}{\text{sen}^2 \theta} d\theta \quad (9)$$

$$r = \sqrt{R^2 + x^2} = \frac{R}{\text{sen} \theta} \quad (10)$$

Además, los valores límite de  $\theta$ , para las posiciones  $x = d$  ( $\theta_1$ ) y  $x = d + L$  ( $\theta_2$ ) son:

$$\cos \theta_1 = \frac{d}{\sqrt{R^2 + d^2}} \quad (11)$$

$$\cos \theta_2 = \frac{L + d}{\sqrt{R^2 + (L + d)^2}} \quad (12)$$

Tomemos un elemento infinitesimal de solenoide de longitud  $dx$ , siendo  $x$  la distancia de  $P$  al elemento infinitesimal considerado. En dicho elemento infinitesimal habrá  $\frac{N}{L} dx$  espiras, por lo que la corriente que circulará por dicho elemento será

$$dI = \frac{N}{L} I dx \quad (13)$$

Considerando dicho elemento infinitesimal como una espira recorrida por una corriente  $dI$ , el campo magnético que producirá en  $P$  es:

$$dB = \frac{\mu_0 \frac{N}{L} IdxR^2}{2\sqrt{(R^2 + x^2)^3}} \quad (14)$$

El campo magnético debido al solenoide completo será el resultado de integrar el resultado anterior:

$$\begin{aligned} B &= \int_d^{d+L} \frac{\mu_0 \frac{N}{L} IdxR^2}{2\sqrt{(R^2 + x^2)^3}} = - \int_{\theta_0}^{\theta_1} \frac{\mu_0 N I R^2 R d\theta}{2L \text{sen}^2\theta \frac{R^3}{\text{sen}^3\theta}} = \frac{\mu_0 N I}{2L} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) \\ &= \frac{\mu_0 N I}{2L} \left( \frac{L+d}{\sqrt{R^2 + (L+d)^2}} - \frac{d}{\sqrt{R^2 + d^2}} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

La Fig 9 muestra las líneas de campo magnético con limaduras de hierro, se puede apreciar su uniformidad y dirección del campo magnético.

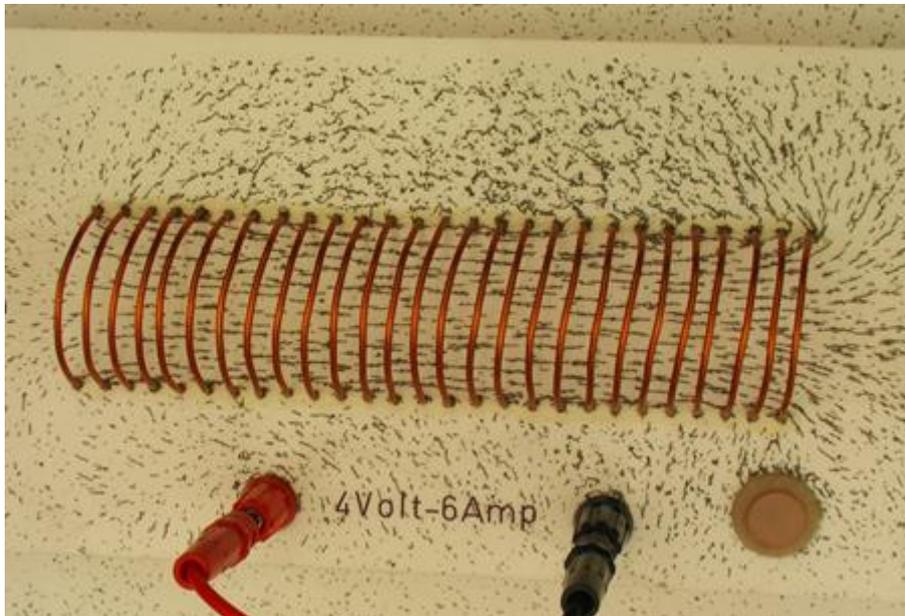


Fig 9. Líneas de campo magnético con limaduras de hierro. Fuente: Pág web: <http://www.sc.ehu.es>, Autor: Ángel Franco García

### 2.3.4. Campo magnético creado por un solenoide con bobinado formado por varias capas de espiras

El campo magnético calculado es válido cuando el solenoide está bobinado con una única capa de espiras, lo cual no es lo habitual cuando se pretende conseguir un fuerte campo magnético. En este caso, se acorta la longitud del solenoide a cambio de superponer unas espiras sobre otras. De este modo, el radio del solenoide no es único, sino que hay un radio interior (el menor) y un radio exterior (el mayor).

Sea un solenoide con  $N$  espiras, bobinado en varias capas, de modo que  $N_L$  es el número de espiras en dirección longitudinal,  $N_R$  el número de espiras en dirección radial, comprendidas entre el radio interior ( $R_0$ ) y el exterior ( $R_1$ ); se verifica que  $N_R \cdot N_L = N$ .  $L$  es la longitud del solenoide, y  $d$  la

distancia entre el punto  $P$  donde se desea conocer el campo total creado por el solenoide, y el extremo del solenoide.  $I$  es la corriente que recorre el solenoide.

Si consideramos un elemento infinitesimal de solenoide de longitud  $L$  y anchura  $dx$ , siendo  $x$  el radio de dicho solenoide infinitesimal, el número de espiras contenidas en  $dx$  en dirección radial es  $\frac{N_R}{R_1 - R_0} dx$ . Por tanto, la corriente que circula por cada una de estas espiras es

$$dI = \frac{N_R}{R_1 - R_0} I dx \quad (16)$$

Como, en dirección longitudinal, hay  $N_L$  de estas espiras, el campo magnético creado en  $P$  por el elemento infinitesimal considerado es:

$$\begin{aligned} dB &= \frac{\mu_0 N_L dI}{2L} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) = \\ &= \frac{\mu_0 N_L N_R I}{2L(R_1 - R_0)} dx \left( \frac{L + d}{\sqrt{x^2 + (L + d)^2}} - \frac{d}{\sqrt{x^2 + d^2}} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

El campo total en  $P$  se obtendrá integrando la expresión anterior entre  $R_0$  y  $R_1$ :

$$\begin{aligned} B &= \int_{R_0}^{R_1} \frac{\mu_0 N_L N_R I}{2L(R_1 - R_0)} \left( \frac{L + d}{\sqrt{x^2 + (L + d)^2}} - \frac{d}{\sqrt{x^2 + d^2}} \right) dx = \\ &= \frac{\mu_0 N_L N_R I}{2L(R_1 - R_0)} \left( \int_{R_0}^{R_1} \frac{L + d}{\sqrt{x^2 + (L + d)^2}} dx - \int_{R_0}^{R_1} \frac{d}{\sqrt{x^2 + d^2}} dx \right) \end{aligned} \quad (18)$$

Que integrando queda:

$$B = \frac{\mu_0 N I}{2L(R_1 - R_0)} \left( (L + d) \ln \frac{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (L + d)^2}}{R_0 + \sqrt{R_0^2 + (L + d)^2}} - d \ln \frac{R_1 + \sqrt{R_1^2 + d^2}}{R_0 + \sqrt{R_0^2 + d^2}} \right) \quad (19)$$

En el anexo de cálculos se comprobará que, con los valores del sistema elegido, este resultado se puede aproximar considerando un solenoide con un arrollamiento de una única capa de radio el valor medio de  $R_0$  y  $R_1$ :

$$R = \frac{R_0 + R_1}{2} \quad (20)$$

### 2.3.5. Bobinas de Helmholtz

Se conoce como bobinas de Helmholtz, Fig 10, al sistema formado por dos solenoides situados paralelamente y próximos el uno del otro. La ventaja de este sistema es que el campo magnético en el espacio comprendido entre ambos solenoides es más intenso que el debido a un único solenoide, y además es más uniforme.

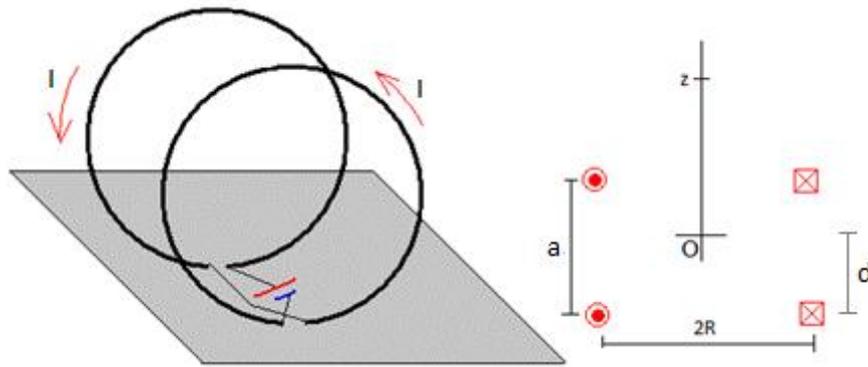


Fig 10. Bobinas Helmholtz. Fuente: Pág web: <http://www.sc.ehu.es>, Autor: Ángel Franco García

El campo magnético en cualquier punto se puede calcular como la superposición del creado por ambos solenoides en ese punto. Ambos solenoides están separados una distancia  $a$  entre ellos, tienen el mismo número de espiras,  $N$ , la misma longitud,  $L$ , el mismo radio,  $R$ , y la misma intensidad,  $I$ , tal y como se muestra en la Fig 10. Además, si el sentido de las corrientes en ambas bobinas es tal que ambos campos se refuerzan, el campo total en un punto entre ambos solenoides, a una distancia  $d$  de uno de ellos (y a una distancia  $a - d$  del otro), será la superposición de los campos creados por ambos solenoides:

$$B_1 = \frac{\mu_0 NI}{2L} \left( \frac{L + d}{\sqrt{R^2 + (L + d)^2}} - \frac{d}{\sqrt{R^2 + d^2}} \right) \quad (21)$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 NI}{2L} \left( \frac{L + (a - d)}{\sqrt{R^2 + (L + a - d)^2}} - \frac{a - d}{\sqrt{R^2 + (a - d)^2}} \right) \quad (22)$$

$$B = B_1 + B_2 = \frac{\mu_0 NI}{2L} \left( \left( \frac{L + d}{\sqrt{R^2 + (L + d)^2}} - \frac{d}{\sqrt{R^2 + d^2}} \right) + \left( \frac{L + a - d}{\sqrt{R^2 + (L + a - d)^2}} - \frac{a - d}{\sqrt{R^2 + (a - d)^2}} \right) \right) \quad (23)$$

En particular, el campo magnético en un punto del eje sobre uno de los solenoides ( $d = 0$ ), será:

$$B_0 = \frac{\mu_0 NI}{2L} \left( \frac{L}{\sqrt{R^2 + L^2}} + \frac{L + a}{\sqrt{R^2 + (L + a)^2}} - \frac{a}{\sqrt{R^2 + a^2}} \right) \quad (24)$$

Tras observar la uniformidad del campo magnético, hay que resaltar que no siempre es posible obtener un campo magnético uniforme en la región central de las bobinas. Como muestra la Fig 11, cuando el radio y la distancia que separa ambas bobinas son del mismo orden, la uniformidad del campo obtenido es el más eficiente.

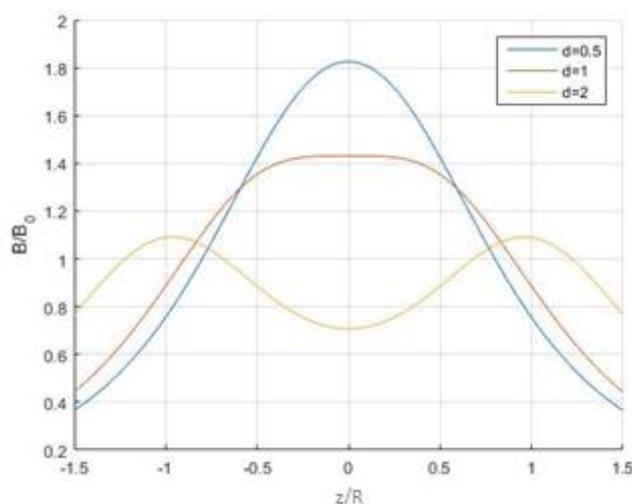


Fig 11. Campo magnético producido por una bobina Helmholtz al variar la distancia que separa las bobinas en eje del solenoide,  $z$ . Fuente: Pág web: <http://www.sc.ehu.es>, Autor: Ángel Franco García

En los otros dos casos observados en la Fig 11, si la distancia es la mitad del radio de las bobinas, se obtiene un campo 1,8 veces más fuerte que con una única bobina, aunque la distancia donde el campo es uniforme es mucho menor. Por último y menos útil, está cuando la distancia es el doble del radio, se obtiene un campo mucho menor y nada uniforme.

Además de aportar uniformidad del campo magnético en la región central, las bobinas Helmholtz también aumentan en un 40% la intensidad del campo magnético creado por una única bobina, Fig 11, permitiendo obtener campos más intensos sin necesidad de aumentar la corriente, frecuencia o número de espiras.

### 2.3.6. Inducción electromagnética. Leyes de Faraday y Lenz

Hacia 1830, Michel Faraday descubrió la inducción electromagnética, siendo posible la producción de corrientes eléctricas a partir de campos magnéticos no estacionarios. En colaboración con Heinrich Lenz, enunciaron la ley de Faraday-Lenz, que establece que la fuerza electromotriz inducida en una espira depende de la rapidez de variación del flujo magnético que atraviesa la espira, y esta fuerza electromotriz siempre tiende a oponerse a la causa que la produce. En este caso  $N = 1$ .

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}N \quad (25)$$

Siendo el flujo magnético

$$\phi = \int_{\text{espira}} \vec{B} d\vec{S} \quad (26)$$

La consecuencia de la f.e.m. creada, en una espira cerrada, es la aparición de una corriente inducida, inversamente proporcional a la resistencia de la espira:

$$I = \frac{\varepsilon}{R_{\text{espira}}} \quad (27)$$

Si la espira atravesada por el flujo magnético es pequeña comparada con el solenoide creador del campo, entonces, con el fin de simplificar el cálculo del flujo magnético, el campo en la espira puede considerarse uniforme, e igual al existente en el centro de la espira. Con esta aproximación, resulta:

$$\phi = \int_{\text{espira}} \vec{B} d\vec{S} \approx B_{\text{centro}} \cdot S_{\text{espira}} \quad (28)$$

Al trabajar con corriente alterna, tanto la tensión como la corriente varían en el tiempo. La tensión (fuerza electromotriz) inducida en la espira será de la forma:

$$v = \sqrt{2} \cdot V_{ef} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi_1) = -\varepsilon \quad (29)$$

Además, si la superficie de la espira es invariable, y debido a que la corriente creadora del campo magnético es una corriente variable, el flujo es una variable que también varía con el tiempo. Luego, combinando las ecuaciones (25) y (29), se obtiene:

$$\int d\phi(t) = - \int \varepsilon(t) dt \quad (30)$$

Integrando esta ecuación resulta:

$$\phi(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{ef}}{\omega} \cos\left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi_1 - \frac{\pi}{2}\right) \quad (31)$$

De modo que se relacionan la tensión eficaz inducida en la espira,  $V_{ef}$ , con el flujo máximo sobre ella,  $\phi_{max}$ :

$$V_{ef} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot \phi_{max} \quad (32)$$

Y utilizando la ley de Ohm, es posible relacionar el flujo máximo a través de la espira,  $\phi_{max}$ , con la corriente eficaz inducida en ella  $I_{ef}$  y la resistencia de la espira,  $R_{\text{espira}}$ :

$$I_{ef} \cdot R_{\text{espira}} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot \phi_{max} \quad (33)$$

### 2.3.7. Inductancia

La creación de un campo magnético mediante un solenoide requiere de una corriente determinada. Y como el solenoide presenta una cierta impedancia a la corriente, es necesario conocer la diferencia de potencial a aplicar al solenoide para conseguir la corriente deseada.

Para calcular el coeficiente de autoinducción de nuestro solenoide, y dado que se han bobinado unas espiras sobre otras, tomaremos como radio del solenoide el radio medio entre el menor y el mayor:

$$R = \frac{R_{\text{menor}} + R_{\text{mayor}}}{2} \quad (34)$$

El coeficiente de autoinducción,  $L_{\text{solenoides}}$ , de un solenoide de radio  $R$ , longitud  $L$  y  $N$  espiras es:

$$L_{solenoides} = \frac{\phi \cdot N}{I} = \frac{B \cdot S \cdot N}{I} \quad (35)$$

Debido a que la longitud del solenoide no es más grande que el radio del mismo, no es posible utilizar la fórmula aproximada, pues solo es posible su uso cuando la longitud del solenoide es mayor que el radio:

$$L_{solenoides} \neq \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot \pi \cdot R^2}{L} \quad (36)$$

Como la tensión utilizada será una tensión alterna senoidal de frecuencia  $f$ , la inductancia del solenoide se puede calcular de acuerdo con:

$$X_{solenoides} = \omega \cdot L_{solenoides} = \frac{B \cdot S \cdot N}{I} 2 \cdot \pi \cdot f \quad (37)$$

## **CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL BIORREACTOR**

### **3.1. PLIEGO DE CONDICIONES**

El biorreactor a diseñar y construir debe cumplir una serie de condiciones que se explicitan en el pliego de condiciones, y que se resumen en las siguientes:

- El biorreactor debe ser capaz de estimular eléctricamente muestras de materiales con resistencias de hasta 100  $\Omega$ .
- Las corrientes sobre los materiales a estimular deben estar comprendidas en el rango de 0-100  $\mu\text{A}$ .
- Los materiales irán colocados dentro de una placa Petri de cultivos, de diámetro 35 mm y altura 15 mm.
- La frecuencia de las corrientes creadas en los materiales debe ser de 50 Hz, utilizando como fuente de tensión la red eléctrica.
- El biorreactor debe estar construido con materiales que sean esterilizables, bien con etanol, bien con autoclave.
- El biorreactor debe trabajar en el interior de una incubadora, a una temperatura de 37° C y en un ambiente con un 5% de CO<sub>2</sub>.
- El biorreactor debe ser de fácil manejo y regulable, de modo que pueda adaptarse a diferentes materiales, con diferentes resistencias, y para crear corrientes de diferentes valores.
- El diseño del biorreactor debe ser fácilmente replicable para poder estimular de manera simultánea varias muestras.

### **3.2. POSIBLES SOLUCIONES DE DISEÑO**

A continuación, se van a presentar, los distintos diseños planteados por diferentes investigadores para la creación de un campo magnético para estimular magnéticamente. A partir de esos diseños, se propondrá un diseño totalmente original para la creación de un campo magnético, que induzca una corriente en las espiras que habrán dentro de la placa de cultivos.

El primer diseño se trata de un solenoide (Z. Liu et al., 2014), con una inducción magnética ajustable entre 0-20 mT y frecuencia entre 0-100 Hz. Las dimensiones de este son de unos 400 mm de longitud, con un diámetro interior de 100 mm y diámetro exterior de 200 mm tal y como se aprecia en la Fig 12. En este caso, los autores han utilizado un cable con un diámetro de 1 mm, lo que, siguiendo la Tabla 1, la corriente máxima soportada por el hilo de cobre esmaltado es de unos 6,283 A, y con 500 vueltas alrededor del solenoide. Para la medición de la inducción magnética, los autores

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ESTIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA CULTIVOS CELULARES

optan por utilizar un gaussímetro. En la parte de circuitería, se coloca en serie una resistencia de  $2\ \Omega$  con el solenoide, y tanto la forma de onda, como la frecuencia se controla con un osciloscopio.

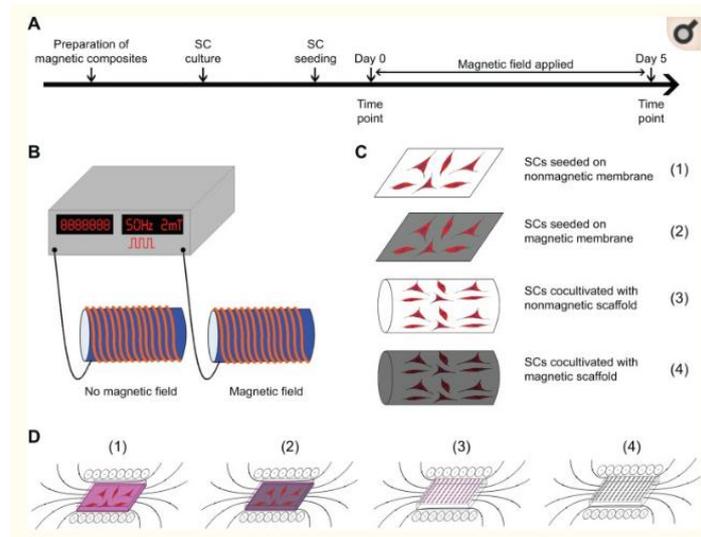


Fig 12. Aparatos y cultivos utilizado para la estimulación magnética. Fuente: (Z. Liu et al., 2014).

Una ventaja del solenoide respecto a los otros diseños es la obtención de un campo plenamente uniforme en el centro del solenoide.

El segundo diseño se trata de unas bobinas Helmholtz, tal y como se muestra en la Fig 13. Como se explicó previamente, las bobinas de Helmholtz son muy utilizadas en investigación tanto *in vivo* (Gunay & Mert, 2011), como *in vitro* (Cardelli, Faba, Franceschini, Pompei, & Tissi, 2012) (Ye, Cotic, Fehlings, & Carlen, 2011) (Gamboa, Gutiérrez, Alcalde, De la Fuente, & Gayoso, 2007).

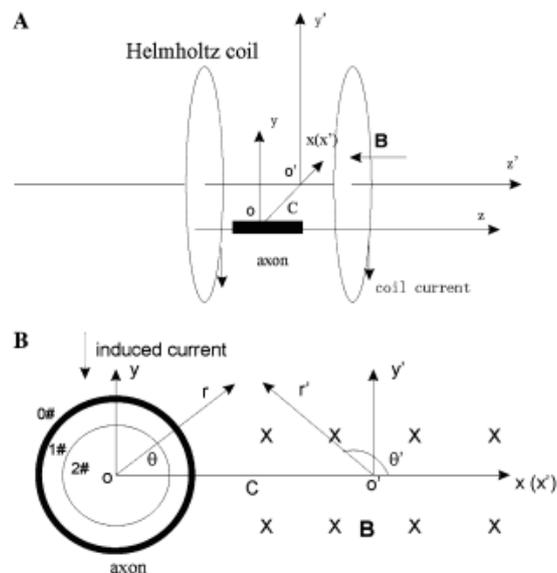


Fig 13. Bobina Helmholtz utilizada para la regeneración axonal. Fuente: (Ye et al., 2011)

La mayoría de estas bobinas, poseen diámetros grandes para así abarcar una mayor distancia y obtener un campo uniforme en el punto equidistante del eje que una perpendicularmente el centro de ambas bobinas, tal y como se había explicado en el apartado 2.3.5. En estos casos las frecuencias son muy variadas, pasando por campos de 3 mT con 50 Hz (Cardelli et al., 2012), hasta 2 T con 200 kHz (Ye et al., 2011).

El tercer y último diseño, es una simple bobina (YAMAGUCHI-SEKINO et al., 2011) que presenta una inducción de 0,1 T-0,25 T-0,5 T, variando la frecuencia entre 2 y 200 kHz. La geometría de la bobina es sencilla, 15 mm de diámetro interior y 75 mm de diámetro exterior. En este caso los autores colocan, a diferencia de los otros diseños, una placa de plástico, tal y como se aprecia en la Fig 14, para evitar los posibles efectos térmicos por el calor generado que puedan dañar a los cultivos.

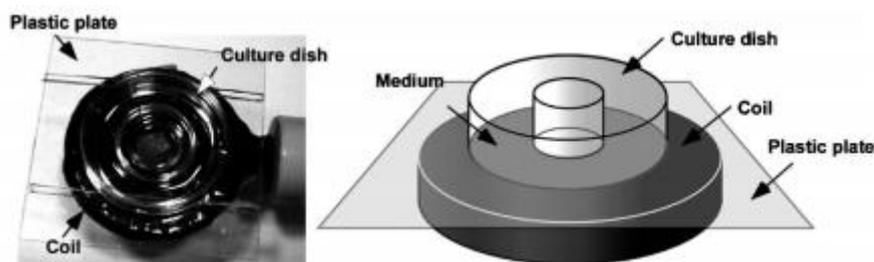


Fig 14. Bobina utilizada para la estimulación magnética. Fuente: (YAMAGUCHI-SEKINO et al., 2011)

Tras presentar los distintos biorreactores utilizados por investigadores en sus experimentos para la regeneración neural, se ha optado por diseñar y construir un biorreactor que cumpla con las especificaciones planteadas en el apartado 3.1, y usando como punto de partida, los diseños anteriormente mencionados.

La primera idea de todas fue diseñar un “transformador”, Fig 15. El objetivo era utilizar la misma idea que usan los transformadores. El devanado primario, se mantendría igual que un transformador convencional, con un número determinado de espiras, y el cambio se presenta en el devanado secundario, donde ya no se arrolla otro conjunto de espiras de cobre en el secundario, sino más bien, se arrolla una única espira, a la cual se le quiere inducir una corriente que estimulará eléctricamente a las células.

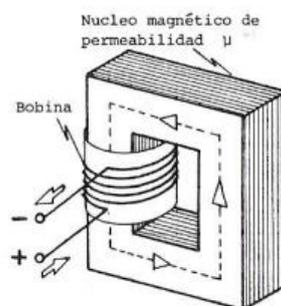


Fig 15. Transformador. Fuente: Electrotecnia General (para la Carrera Ingeniería Industrial) Circuitos Magnéticos. Autor: Ing. Gustavo L. Ferro

Este diseño, teóricamente es el más eficiente, pues se utiliza un material ferromagnético, laminado para evitar las corrientes de Foucault, y no aire para el confinamiento del campo magnético, por lo que se obtiene un campo mucho más intenso y localizado. Además, la cantidad de cobre utilizado para las espiras es posiblemente mucho menor que en diseños que usen el aire como medio conductor del flujo.

Pese a ser un diseño eficiente, aparecen problemas. El primero de ellos es el diseño y construcción de una placa Petri que actúe como una "espira". El diseño de esta placa sería una placa convencional, pero con un agujero central, por donde atravesaría el material ferromagnético y así conseguir que el campo magnético atravesase a la espira de manera perpendicular. Este diseño supondría contactar con una empresa dispuesta a hacer un diseño personalizado, lo que supone un coste adicional. El segundo está relacionado con el diseño de la placa Petri, pues es probable que las dimensiones sean mayores de las convencionales, por lo que es necesario un mayor gasto en medio de cultivo, para una única prueba. Como tercer y último problema, la cantidad de material ferromagnético utilizado, a nivel económico, pues otra intención es poder replicar el diseño para hacer distintas pruebas simultáneas.

También se ha contemplado la opción de usar un entrehierro, Fig 16, pero se ha decidido evitar el uso de material ferromagnético para abaratar costes.

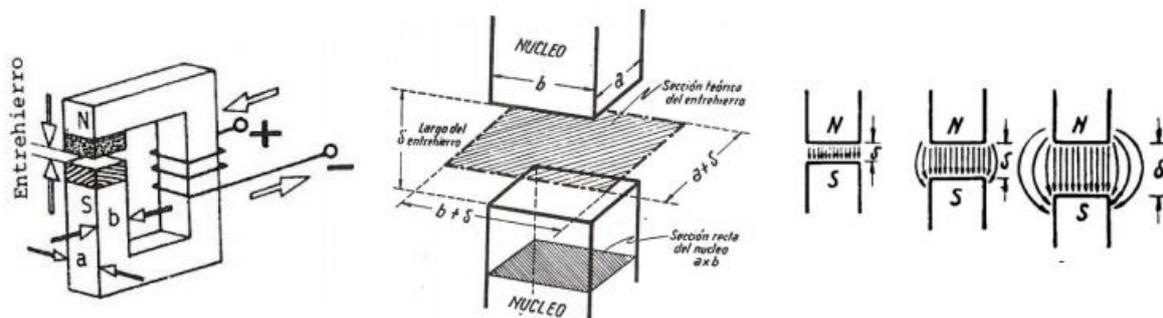


Fig 16. Entrehierro y líneas del campo magnético. Fuente: Electrotecnia General (para la Carrera Ingeniería Industrial) Circuitos Magnéticos. Autor: Ing. Gustavo L. Ferro

Por la cantidad de desventajas de usar material ferromagnético y la posibilidad de crear un campo magnético en el aire capaz de inducir la corriente necesaria sin necesidad de modificar ningún diseño de ninguna placa, se ha rechazado este diseño. Además, esta elección se vio reforzada por el hecho de que, en los cálculos previos, se vio que la intensidad del campo magnético para inducir la corriente de  $100 \mu\text{A}$  no era muy elevada, fácilmente alcanzable sin necesidad de utilizar materiales ferromagnéticos.

## **CAPÍTULO 4. CONSTRUCCIÓN DEL BIORREACTOR**

### **4.1. DISEÑO FINAL**

Tras estudiar las distintas soluciones existentes, se optó por diseñar y construir un biorreactor que creara un campo magnético no estacionario sobre la placa donde estuviera colocado el material a estimular. Este material formaría una pequeña espira dentro de la placa, y por efecto de la ley de Faraday, aparecería en esta espira una fuerza electromotriz inducida que, a su vez, crearía una corriente de la misma frecuencia que el campo magnético creado. De este modo, además de la propia estimulación eléctrica debida a la corriente inducida, también hay un efecto de estimulación magnética adicional al de la corriente. Aunque este tipo de estimulación no es, inicialmente, buscado, tampoco debe ser evitado, ya que también tiene un efecto beneficioso sobre la regeneración neural.

Tras haber estudiado diferentes aparatos utilizados en investigaciones para la regeneración neural, se ha optado por basarse en el diseño de la Fig 14. Además, para aumentar la intensidad de campo sin necesidad de aumentar la frecuencia, se ha optado por colocar otra bobina idéntica en la parte superior de la misma, replicando la idea de las bobinas de Helmholtz.

Ello se conseguirá mediante dos bobinas (bobinas de Helmholtz) de hilo de cobre esmaltado de 0,6 mm de diámetro. Las bobinas tendrán un radio interior de 17,5 mm, radio exterior de 47,5 mm, una longitud de 30 mm, y aproximadamente, 2000 espiras, bobinadas sobre dos carretes de teflón. Estas dos bobinas se colocan horizontalmente separadas una distancia de 15 mm. Las bobinas reposaran sobre un bastidor de teflón, que servirá para mantener la distancia de 15 mm entre las mismas, Fig 17.

Las bobinas están conectadas en paralelo, a un transformador, conectado a la red eléctrica, y de salida variable (autotransformador), cuya tensión de salida puede regularse desde 0 hasta 220 V eficaces. La frecuencia es, siempre, la de la red, 50 Hz. Además, a la hora de trabajar con las células de Schwann, no todas las frecuencias puede que valgan, por lo menos por estimulación magnética, ya que estudios muestran que las frecuencias donde la respuesta neuronal para el crecimiento axonal es mayor se da a frecuencias entre 50-70Hz (Zhang, Ding, & Duan, 2006). Lo que justifica el uso de la frecuencia de la red, siendo no citotóxica para las neuronas.

De este modo, y dado que ambas bobinas presentan la misma inductancia, las dos crearán campos magnéticos idénticos. Con esta disposición y las dimensiones dadas, el campo magnético creado en el espacio entre ambas bobinas es prácticamente uniforme, y se alcanzan los valores requeridos en el pliego de condiciones, tal y como se demuestra en el anexo con los cálculos realizados.

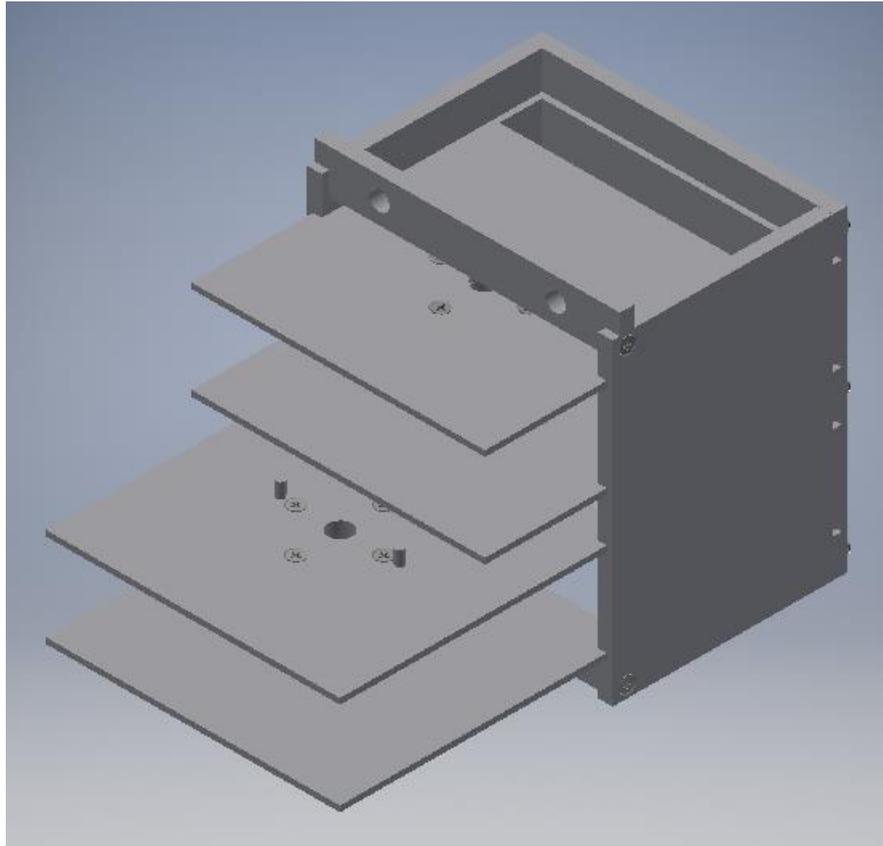


Fig 17. Diseño del Biorreactor (Autodesk Inventor). Fuente: Propia

El punto crítico del diseño ha sido conjugar las dimensiones de las bobinas, su número de espiras, y la corriente que debía circular por ellas. Todo ello, de acuerdo con las dimensiones y resistencia de la espira del material a estimular. Para conseguir la corriente deseada, dado que la frecuencia era inamovible, era necesario o aumentar el número de espiras, con el consiguiente aumento de las dimensiones del dispositivo, o aumentar la corriente sobre las bobinas, con el consiguiente incremento del diámetro del hilo a utilizar, y el calor generado por efecto Joule, que podría afectar a los cultivos a estimular. Este último factor de la corriente, además, afecta cuadráticamente al calor producido, por lo que el trabajar con corrientes reducidas, fue esencial. Aunque el hilo utilizado soporta corrientes cercanas a 2,5 A, experimentalmente se intentó no superar corrientes de 1,5 A, para evitar la generación de calor por efecto Joule en los devanados de las bobinas. Además, considerando esta corriente máxima en cada bobina, y dado que el autotransformador que las alimenta puede dar hasta 12 A, un único autotransformador puede alimentar hasta 8 bobinas (4 biorreactores) a la vez.

El radio interior se ha seleccionado a conciencia, pensando en dos puntos clave. El primero se centra en obtener el campo magnético más elevado posible. Como se aprecia en la ecuación (15), y manteniendo las demás variables constantes, si se aumenta el radio de la bobina, el campo magnético obtenido es de menor intensidad, impidiendo alcanzar los valores del campo magnético necesarios para cumplir el pliego de condiciones. Como refleja la ecuación (32), la fuerza electromotriz o campo  $E$  inducido, está relacionada con el flujo magnético, que es proporcional al

campo magnético aplicado. Por ese motivo, al variar el radio de la bobina, el campo magnético  $E$  también varía, como se observa en la Fig 18.

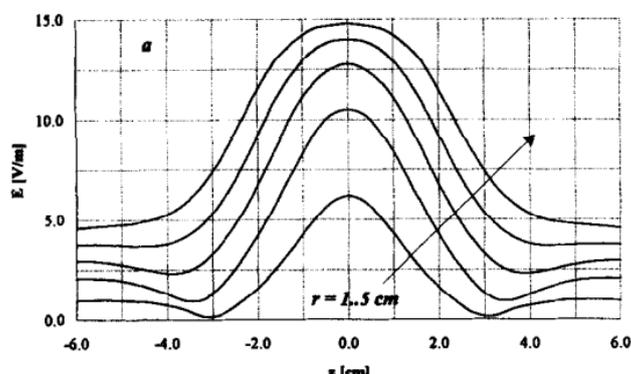


Fig 18. Campo  $E$  inducido en un axón en función del radio de la espira. Fuente: (Ravazzani, Ruohonen, & Grandori, 1995)

Y el segundo punto a tener en cuenta es la uniformidad del campo obtenido. Como se ha ido repitiendo a lo largo del documento, la uniformidad del campo magnético es imprescindible para favorecer el trabajo en los laboratorios, asegurando que el error humano no pueda suponer un problema a la hora de trabajar en el interior del campo magnético.

En nuestro caso, ante el desconocimiento de la posición exacta de la espira en el interior de la placa Petri, es necesario obtener un campo lo más uniforme posible para asegurar la inducción de corriente en la espira, sin importar la posición de la espira en el eje que une los centros de ambas bobinas.

Por este motivo, el radio interior y la distancia entre bobinas han de ser del mismo orden. Pues se ha explicado que cuando  $r = d$  en las bobinas Helmholtz, el campo magnético es uniforme en la región central del eje que une ambos centros de las bobinas, Fig 11.

Asimismo, la distancia de 15 mm entre bobinas es justa para poder colocar entre ambas, las piezas del bastidor necesarias, y poder deslizar entre ellas la placa Petri conteniendo el material a estimular.

Para hacer el trabajo más sencillo a los investigadores, se ha optado por colocar unos tetones o topes en la bobina inferior, Fig 19, de modo que empujando la placa Petri hasta los topes, se consigue que la placa Petri esté completamente centrada axialmente entre ambas bobinas.

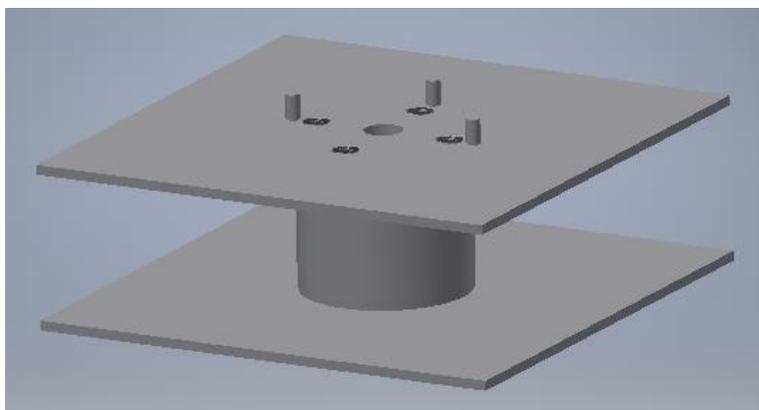


Fig 19. Bobina inferior con topes para guiar a la placa Petri. Fuente: Propia

Para hacer estos topes o tetones, únicamente se han agujereado 3 agujeros de 3 mm de diámetro, en los cuales, se ha colocado en cada uno de los agujeros, una barra de 3 mm de diámetro de teflón, con una longitud de 7 mm.

Respecto a la parte exterior de biorreactor, lo que se ha denominado bastidor, está compuesto por tres paredes. Todas ellas, tienen 5 mm de espesor con unos surcos que sirven como guía y soporte para las bobinas. Se ha optado por establecer unos surcos de 3 mm de profundidad, para obtener así una mayor superficie de contacto y descanso entre bobina y bastidor. Los surcos se han mecanizado en función de la longitud de la bobina. La posición de los mismos está mucho mejor detallada en el apartado de los planos del biorreactor.

Las dimensiones de las paredes laterales son 75 x 109 x 5 mm y de la pared trasera es 104 x 109 x 5 mm. Cada pared lateral está unida a la pared trasera con 3 tornillos, para una correcta sujeción.

Mientras, para reforzar la estructura, se han colocado dos viguetas transversales en la parte inferior y superior de las paredes laterales para conferir al biorreactor una mayor unidad estructural. Estas viguetas también están unidas por 1 tornillo en cada lado.

En este caso, la vigueta inferior se trata de un prisma cuyas dimensiones son 8 x 94 x 5 mm. Mientras, la vigueta superior es más ancha, debido a que va a servir para colocar los conectores tipo banana hembra. El posicionamiento de los conectores hembra ha sido una elección puramente para favorecer las conexiones, y que no molesten los cables a los cultivos o experimentos colindantes en la incubadora.

Uno de los mayores problemas que había a la hora de la construcción del biorreactor, era el material que se iba a emplear para construir el bastidor y las bobinas, pues estas, van a estar en el interior de una incubadora. Debido al lugar de trabajo del biorreactor, el material empleado debía ser capaz de autoclavarse o esterilizarse

El material decidido a utilizar ha sido el **politetrafluoroetileno (PTFE)**, o más conocido como **teflón**. El monómero es el tetrafluoroeteno, cuya fórmula química es  $CF_2=CF_2$ , tal y como se ve en la Fig 20.

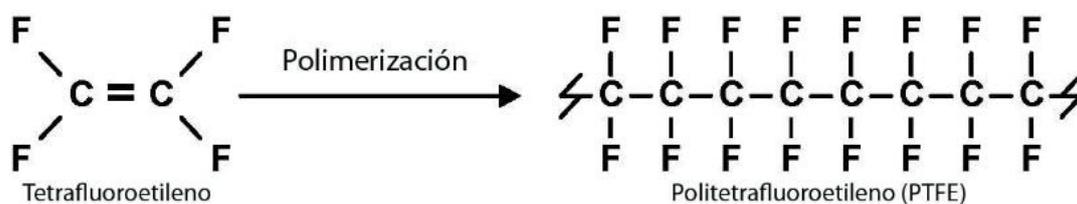


Fig 20. Fórmula del politetrafluoroetileno (PTFE). Fuente: <https://curiosoando.com/que-es-el-teflon>

La elección de este material ha sido debido a sus espectaculares propiedades. Es un material completamente inerte, por lo que no reacciona con el contacto con otras sustancias, salvo en casos muy especiales. Asimismo, su impermeabilidad lo hace un material ideal para utilizar en el interior de la incubadora, pues siempre ha de haber una alta humedad en el interior de la incubadora, por tema de los cultivos, que necesitan un ambiente húmedo para proliferar y no morir.

Es un material fácilmente mecanizable, Fig 21, por lo que es posible obtener las planchas y barras necesarias para las bobinas y bastidor. Además, es un gran aislante eléctrico, lo que confiere seguridad al diseño en cuanto a fallos eléctricos o posibles fallos que puedan originar daños a los

investigadores. Pero, ante todo, su mejor propiedad y más útil, es su elevada resistencia al calor, capaz de soportar temperaturas de 180-250 °C, lo que permite autoclavar las piezas en la autoclave, y así poder utilizarlo sin problemas de contaminación en el interior de la incubadora.

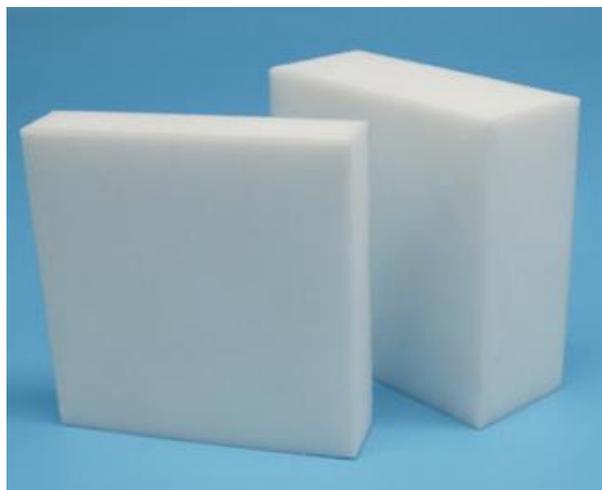


Fig 21. Prismas de teflón. Fuente: Google

Cabe destacar una ventaja más del politetrafluoroetileno (PTFE), como se ha ido explicando a lo largo del documento, se va a generar un campo magnético, el cual sirve para inducir corriente sobre una espira. Pero como no vamos a confinar el campo magnético en un material ferromagnético, como suceden en los transformadores, si no que su medio va a ser el aire, este campo puede influenciar a materiales circundantes. De este problema, el teflón aporta una solución, debido a que es un plástico, y no es posible inducirle corriente alguna, evitando así una generación de calor dañino producido por las pérdidas de Foucault.

También es necesario facilitar las conexiones eléctricas a los investigadores. La primera idea que surgió fue soldar con estaño, pese a que asegura un contacto fiable, tener que soldar, supone que en caso de fallo es necesario eliminar la soldadura de estaño, lo que supone tiempo y dificultad. La segunda idea fue el uso de pinzas, pero tras comprobar en las pruebas eléctricas y en la experiencia, las pinzas no aseguran siempre un contacto fiable, y un continuo movimiento del cable o cercanías, puede hacer que las pinzas se suelten, más que una ayuda es un problema. Entonces, se ha decidido emplear bananas hembrillas, junto con bananas tipo banana macho, Fig 22, asegurando un buen contacto y facilitando el trabajo en el laboratorio.



Fig 22. a) Conector tipo banana macho b) Conector tipo banana hembra. Fuente: Google

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ESTIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA CULTIVOS CELULARES

El diseño del biorreactor destaca por su sencillez a la hora de su construcción y montaje. En lo que se refiere a la construcción, el biorreactor está fabricado únicamente con planchas y barras. Gracias a no requerir formas complicadas en su construcción, su montaje se abarata en calidad de mecanizado. También al componerse de piezas sencillas es mucho más fácil colocarlas en el interior de la autoclave, Fig 23, para así esterilizar todos los componentes.

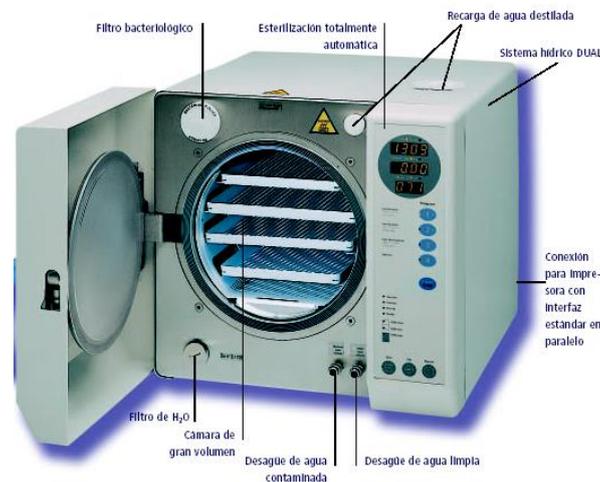


Fig 23. Autoclave. Fuente: <https://www.pardell.es/autoclaves.html>

Para unir cada uno de los elementos del biorreactor, se ha decidido utilizar tornillos de M3 inoxidables. En este caso, el teflón es un material complicado de unir con pegamentos industriales, además, se ha evitado el uso de los mismos por dos razones, la primera es la posibilidad de fundir el pegamento a la hora de autoclavar el biorreactor, pues se alcanzan temperaturas cercanas a los 120 °C. Y segundo es que el pegamento une de manera permanente las piezas, mientras que, con el uso de tornillería, es posible desmontar las piezas y autoclavarlas o sustituirlas con mayor facilidad.

Se ha utilizado tornillos inoxidables debido a que el biorreactor va a estar en constante contacto con la humedad de la incubadora y de la autoclave, y si se oxidan los tornillos, puede suponer problemas estructurales o la destrucción o contaminación de alguna pieza empleada en el biorreactor.

Pero lo más importante de todo, es que es **replicable**, de forma que se pueden hacer la cantidad necesaria de biorreactores para tantos cultivos como se quiera experimentar. Además, la forma prismática del biorreactor lo hace idóneo para que se ahorre el máximo espacio entre distintos bastidores.

El tamaño del propio biorreactor es más pequeño que los aparatos anteriormente nombrados en el apartado 3.2, lo que mejora su funcionalidad y manejabilidad, pues es posible transportar el biorreactor con una única mano. Gracias a su tamaño, y a su fácil replicación, es posible incorporar varios bastidores en el interior de la incubadora, permitiendo trabajar con una gran cantidad de cultivos a la vez.

Este diseño cumple todos los requisitos planteados en el pliego de condiciones, ya que tanto el teflón como el cobre esmaltado son fácilmente esterilizables con los sistemas propuestos; el dispositivo puede colocarse fácilmente dentro de una incubadora, y los cables de alimentación pueden salir fuera de ella, bien por los orificios previstos para ello, bien por la junta de la puerta. Además, el

manejo es muy cómodo y sencillo, muy barato de construir, y puede replicarse tantas veces como se quiera.



Fig 24. Diseño del Biorreactor (Autodesk Inventor). Fuente: Propia

#### 4.2. MECANIZADO DEL BIORREACTOR

Es turno de moldear el teflón y dar vida al diseño 3D creado a ordenador. Únicamente para mecanizar es necesario el teflón, el hilo de cobre, tornillos inoxidables y las herramientas necesarias para dar forma al teflón.

En primer lugar, las paredes laterales y traseras del bastidor. Para ello, se ha comenzado por dar forma a las guías. Estas, han de tener un acabado superficial más liso que el conjunto de piezas, de este modo se facilita el movimiento de las bobinas en el montaje. Se ha utilizado una fresadora y como el teflón es un material muy fácil de mecanizar, con una única pasada es posible hacer una guía de 2,5 mm de profundidad. En la Fig 25 se puede apreciar cómo se fresaba el teflón.



Fig 25. Fresado del teflón. Fuente: Propia

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ESTIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA CULTIVOS CELULARES

---

Una vez terminadas las guías, se ha cortado el teflón en tres trozos, cada una de las 3 paredes que componen el bastidor. La superficie de las paredes laterales en contacto con la pared trasera, han de ser lo más plana posible para favorecer el montaje con los tornillos. Para el corte del teflón de 5 mm se ha optado por utilizar una sierra de disco, pues aporta un corte más preciso que cualquier sierra manual. Las medidas de las paredes están detalladas en los planos del final del TFG.

Después del corte, toca unir cada una de las paredes con tornillos inoxidables de M3. Se ha llevado especial cuidado a la hora de hacer los agujeros, pues, el espesor del teflón es de 5 mm, y los agujeros tienen un diámetro de 3 mm, otorgando 1 mm a cada lado para sujetar los tornillos. Para roscar las paredes laterales, se ha empleado 2 machos de roscar, de modo que, con el primer macho, se le ha dado la primera forma de rosca, y con el segundo macho, se ha repasado y completado la forma de rosca, Fig 26.



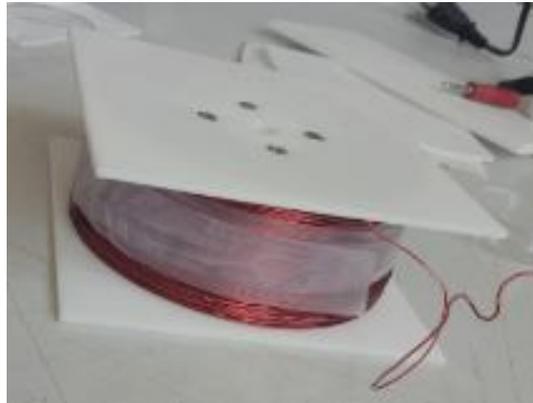
*Fig 26. Machos de roscar. Con cada macho, se va roscando cada vez más el material (apreciar diferencia entre valle y cresta de cada macho). Fuente: Ruko*

Para evitar que pueda romperse o resquebrajarse el teflón, aparte de colocar 3 tornillos para sujetar cada una de las paredes laterales a la trasera, se ha colocado 2 viguetas de 5 mm de espesor también, tal y como se ha explicado en el apartado 4.1. A las viguetas también se les ha roscado el interior, para poder así colocar tornillos de M3, y puedan mantener la estructura firme. De este modo, se ha obtenido una estructura rígida, capaz de albergar las bobinas, Fig 27.



*Fig 27. Bastidor mecanizado y montado, con las bobinas insertadas. Fuente: Propia*

Para el mecanizado de las bobinas, se ha utilizado una barra de 35 mm de diámetro, con una altura de 30 mm, cuyas superficies en contacto con las tapas han de ser totalmente planas y así obtener una mejor unión barra-tapa. En cuanto a las tapas, se ha vuelto a utilizar la misma sierra de disco y se ha obtenido 4 planchas cuadradas de 100 mm de teflón, de espesor de 2 mm. En la barra, se han roscado 8 agujeros de M3, para poder unir las tapas de las bobinas con tornillos inoxidable, por esa razón, a las tapas de las bobinas, también se les ha hecho 4 agujeros, esta vez avellanados, para albergar la cabeza del tornillo, tal y como se muestra en los planos y en la Fig 28. Cabe destacar especial importancia al posicionamiento de los agujeros de los tornillos, pues están colocados con precisión para que no exista espacio donde pueda meterse el hilo de cobre, asimismo aseguramos que el teflón no se parta al agujerear. Además, en una de ellas, se han hecho 3 agujeros más para colocar los tetones e impedir el movimiento de la placa Petri en la zona central.



*Fig 28. Bobina terminada donde se aprecia la posición de los tornillos avellanados. Fuente: Propia*

Para bobinar, se ha agujereado el centro de las bobinas para poder insertar una varilla metálica, que ha permitido conectar el motor del taladro con la bobina para poder hacerla girar y así bobinar el hilo de cobre, Fig 29. Como el teflón es muy flexible y además de 2 mm de espesor, el hilo de cobre, al ser bobinado, ejercerá mucha fuerza sobre las tapas, provocando que se deformen, por ese motivo, se ha colocado unas tapas rígidas de contrachapado sobre las propias tapas para impedir que se doblen. Pese a ello, tras quitar las tapas de contrachapado, el teflón ha cedido un poco, y por esa razón, se han hecho las guías de las paredes un poco más anchas, permitiendo que las bobinas puedan moverse a través de las guías.



*Fig 29. Bobinado de las bobinas con un taladro eléctrico. Fuente: Propia*



## CAPÍTULO 5. VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL BIORREACTOR

### 5.1. PRUEBAS ELÉCTRICAS

Como ya se explicó antes, el objetivo es inducir una corriente de  $100\ \mu\text{A}$  en una espira de 32 mm de diámetro. Para ello, se hará un montaje donde se irá variando la resistencia entre  $0\ \Omega$  y  $100\ \Omega$  para determinar cuál es la tensión y corriente necesarias en los distintos aparatos para crear el campo magnético capaz de inducir la corriente de  $100\ \mu\text{A}$ .

Es hora de pasar a la práctica y comprobar los resultados esperados en el laboratorio. Para ello, se hará uso de diferentes materiales y aparatos eléctricos, los cuales se nombran a continuación.

Como fuente de electricidad, se accederá a el suministro eléctrico español. Con una tensión nominal de 230 V eficaces, entre fase y neutro, con una frecuencia de 50 Hz, una distribución de corriente alterna.

Como en las pruebas es necesario variar la tensión en las bobinas para hacer pasar una corriente concreta a través de ellas, será necesario hacer uso de un transformador capaz de variar la tensión del suministro. Para ello, se utilizará un *VARIAC- Transformador de Salida Variable CA 12 Amp 0-250V (TDGC2-3KVA)*, Fig 30, de la marca SATKIT para poder variar la amplitud de la tensión entre 0 V y 230 V, y con una corriente máxima de trabajo de 12 A, que será más que suficiente en las pruebas eléctricas.

Su funcionamiento es realmente sencillo. Posee 4 pines, 2 de ENTRADA y 2 de SALIDA, con los que podemos variar la tensión de entrada (INPUT) con un regulador que va de 0 V a 230 V, sacando la tensión regulada o máxima de entrada por la salida (OUTPUT). Para una mayor comprensión, posee una interfaz que muestra la tensión que hay en la salida (OUTPUT), tal y como se ve en la cara frontal de la Fig 30. Debido a su peso, no es muy trasladable, como puede ser un multímetro o amperímetro de pinza, pero en las pruebas eléctricas no es necesario su continuo movimiento.



Fig 30. VARIAC- Transformador de salida variable CA 12 Amp 0-250V (TDGC2-3KVA) . Fuente: SATKIT

Durante las pruebas eléctricas, existirán también medidas magnéticas. Las bobinas atravesadas por corrientes crearán un campo magnético que será necesario estudiar y conocer su valor. Por lo tanto, un teslámetro es el aparato más adecuado para medir con precisión la densidad de flujo magnético (inducción) B. En concreto se hará uso de un *PHYWE TESLÁMETRO, DIGITAL*, Fig 31, de la marca PHYWE. Capaz de medir campos magnéticos continuos y alternos.



Fig 31. PHYWE TESLÁMETRO, DIGITAL. Fuente: PHYWE

Se poseen dos sondas Hall que se utilizan como sensores. La primera es una sonda tangencial, mientras que la segunda es una sonda axial, que se ha utilizado para la medición de campos axialmente orientados.

En lo que se refiere a sus especificaciones técnicas se destaca del teslámetro diferentes características técnicas

- Alcance de medida  $10^{-5}$  hasta 1 T
- Alcance del indicador  $10^{-5}$  hasta 2 T
- Campo alterno 50 hasta 500 Hz  $\pm$  2%

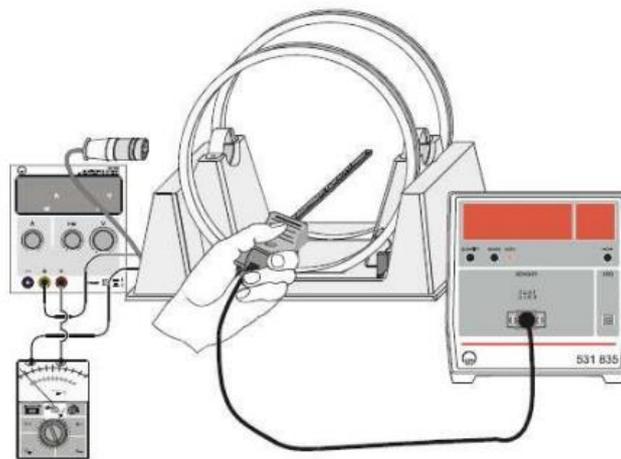


Fig 32. Montaje para la calibración del campo magnético de Helmholtz. Fuente: Física atómica y nuclear, LD Didactic GmbH

Durante las pruebas, es necesario medir la corriente inducida en la espira, la resistencia total de la bobina, incluso la corriente que fluye a través de las bobinas. Para cumplir todas estas tareas, se ha optado por utilizar multímetro, concretamente un *Multímetro digital Fluke, Modelo 45*, Fig 33, de la marca FLUKE.



Fig 33. Multímetro digital Fluke 1640609, 10A ac, 750V ac, Banco, Modelo 45. Fuente: RS Components

La resistencia interna del multímetro es de  $10 \Omega$ , habrá que tenerla en cuenta en las medidas efectuadas. En cuanto a la resolución y la precisión del multímetro, viene determinado por las especificaciones técnicas del mismo que se muestran en la Fig 34

#### AC Current

Range	Resolution			Burden Voltage*
	Slow	Medium	Fast	
10 mA	100 nA	—	—	0.14 V
30 mA	—	1 $\mu$ A	10 $\mu$ A	0.45 V
100 mA	1 $\mu$ A	10 $\mu$ A	100 $\mu$ A	1.4 V
10 A	100 $\mu$ A	1 mA	10 mA	0.25 V

\* Typical at full range

#### Accuracy

Range	Frequency	Accuracy		
		Slow	Medium	Fast
mA (To 100 mA)	20-50 Hz	2 % + 100	2 % + 10	7 % + 2
mA (To 100 mA)	50 Hz-10 kHz	0.5 % + 100	0.5 % + 10	0.8 % + 2
mA (To 100 mA)	10 -20 kHz	2 % + 200	2 % + 20	2 % + 3
A (1-10A)	20-50 Hz	2 % + 100	2 % + 10	7 % + 2
A (1-10A)	50 Hz-2 kHz	1 % + 100	1 % + 10	1.3 % + 2
A (0.5 to 1A)	20-50 Hz	2 % + 300	2 % + 30	7 % + 4
A (0.5 to 1A)	50Hz-2 kHz	1 % + 300	1 % + 30	1.3 % + 4

mA accuracy specifications apply within the following limits, based on reading rate:

Slow Reading Rate:	Between 15,000 and 99,999 counts (full range)
Medium Reading Rate:	Between 1,500 and 30,000 counts (full range)
Fast Reading Rate:	Between 150 and 3,000 counts (full range)

Fig 34. Tablas de la resolución en AC y la precisión de multímetro FLUKE 45. Fuente: Especificaciones técnicas del Multímetro digital Fluke 1640609, 10A ac, 750V ac, Banco, Modelo 45

Como en las pruebas biológicas, la resistencia de los materiales utilizados (plata, oro, polipirrol...) es muy distinta unos de otros, utilizaremos reóstato un *REOSTATO, 100 Ohm / 1,8 A*, Fig 35, de la marca PHYWE, para variar la resistencia de 0 a  $100 \Omega$  en función de la necesidad.



Fig 35. REOSTATO, 100 Ohm / 1,8 A. Fuente: PHYWE

Para hacer las bobinas se ha utilizado hilo de cobre esmaltado, COBRE ESMALTADO 0.6mm 1 KG , de Electrónica Céspedes.

El diámetro del cobre utilizado en las espiras limita el paso de corriente máxima por el mismo. En la Tabla 1 se muestra la corriente máxima soportada por los hilos de cobre esmaltados.

Tabla 1. Corriente máxima en hilos de cobre esmaltado aplicado en bobinas electromagnéticas. Fuente: Elementos Magnéticos Navarra S.L

Diámetro [mm]	Sección [mm <sup>2</sup> ]	A máx [A]
0,500	0,1963	1,570
0,560	0,2463	1,970
0,630	0,3117	2,494
0,710	0,3959	3,167
0,800	0,5027	4,022
0,900	0,6362	5,090
1,000	0,7854	6,283

También se hará uso de una placa Petri de 3,5 cm de diámetro, facilitada por el centro de Biomateriales e Ingeniería Tisular de la UPV.

#### Montaje eléctrico

Se conectan a los pines de entrada (INPUT) del transformador a la red eléctrica, teniendo así en la entrada del transformador 230 V de tensión nominal. Se puede hacer una comprobación rápida con un multímetro o con el propio transformador, modificando la tensión de salida con el regulador superior, y comprobando que la salida es la deseada.

El siguiente paso consistía en fabricar una bobina muy parecida a la que se necesitaba en el diseño final. Como no se disponía del material mecanizado, se ha improvisado una bobina con la bobina donde había venido arrollado el hilo de cobre esmaltado, pero la longitud de la bobina era mayor del necesario. Como solución, se ha optado por desenrollar la bobina y se ha fabricado un tope con poliespán, tal y como se ve en la Fig 36. De esta manera se ha obtenido la longitud deseada para la bobina, 3 cm. De esta manera, se ha obtenido alrededor de 2000 vueltas con 1 kg de hilo de cobre. (Según cálculos estrictos y haciendo aproximaciones, como el uso del diámetro medio, 1910 vueltas, suponiendo diámetro interior 3,5 cm, diámetro exterior 9,5).

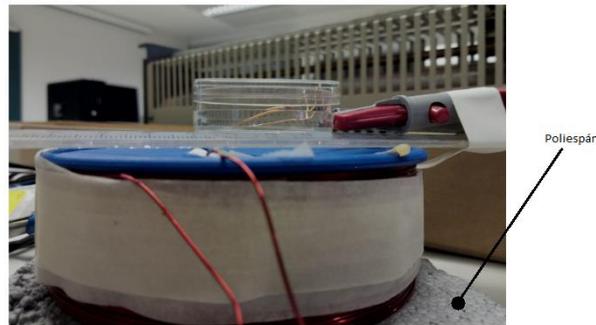


Fig 36. Bobina fabricada manualmente, con poliespán como límite. Fuente: Propia

Al haber bobinado cada bobina manualmente, no es completamente eficiente, debido a que existen huecos y espacio vacíos entre cada capa de hilos de cobre esmaltado. Pese a ello, es completamente funcional y para evitar que los hilos de cobre del último tramo se suelten, se ha colocado un poco de cinta alrededor de la bobina.

Una vez se ha terminado de bobinar, se han de conectar los extremos de la bobina a los pines de salida u OUTPUT del transformador. Para asegurar un mejor contacto, se ha eliminado el esmalte de los extremos y se ha atornillado el extremo a una conexión tipo banana macho, Fig 22a. El resultado queda como en la Fig 37. Se ha utilizado una placa con múltiples conexiones (aparato azul de la Fig 37) para facilitar los contactos entre bananas.

Es turno de la espira a la cual se le desea inducir una corriente de  $100 \mu\text{A}$ . Se ha utilizado un hilo de cobre esmaltado también, al cual se le da forma de circunferencia con un diámetro de 3,2 cm. Cabe recordar que también se ha eliminado el esmalte de los extremos para favorecer una mejor conexión.

En serie se ha colocado el reóstato de 0-100  $\Omega$ , Fig 35. Se ha colocado para asemejar la resistencia de los biomateriales que se han de utilizar en los experimentos biológicos, de acuerdo con el pliego de condiciones.

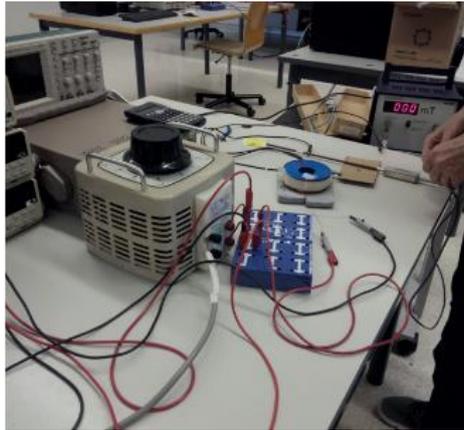


Fig 37. Montaje del transformador y bobina. Fuente: Propia

Cuando sea necesario conocer la resistencia de las bobinas, se coloca el multímetro en paralelo con la bobina y se ha medido la resistencia interna de esta. Posteriormente, durante el experimento, se ha necesitado conocer las corrientes que atraviesan tanto a la bobina creadora del campo, como a la espira a la cual se ha inducido corriente. Por lo tanto, se han colocado los multímetros en serie a los respectivos aparatos a medir. Para ambas, la unidad de medida ha sido mA.

Aunque no es un medidor muy preciso, el propio transformador incorpora una interfaz de medida de la tensión que aparece por los pines de salida, Fig 30, lo que ha permitido obtener un valor aproximado de la tensión aplicada.

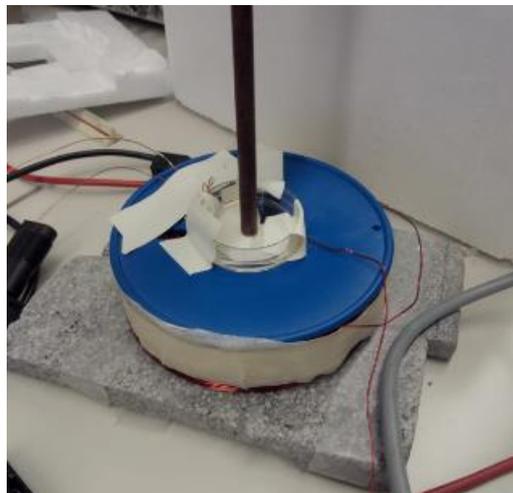


Fig 38. Situación de la placa Petri en la bobina y posicionamiento de la sonda del teslámetro. Fuente: Propia

Es turno de colocar la espira en el interior de una placa Petri de 3,5 cm de diámetro. Como se ha comentado en párrafos anteriores, el diámetro de la espira será de aproximadamente 3,2 cm. Para impedir su movimiento en las pruebas, se ha asegurado con cinta. Después de haber fijado la espira, es turno de colocar la placa Petri en el centro de las bobinas, y al igual que la espira, se ha impedido su movimiento con cinta aislante, Fig 38. Con el fin de medir la inducción magnética de la zona, se ha colocado la sonda axial del teslámetro perpendicularmente a la bobina, lo más cercano a la espira.

Es momento de dar tensión y empezar a tomar datos. Como se ha venido explicando, el objetivo principal es inducir 100  $\mu$ A en la espira, variando la tensión de la bobina, para distintas resistencias

de la espira. La resistencia se ha variado entre 0  $\Omega$  y 100  $\Omega$ , con saltos de 20  $\Omega$ . Para un valor de resistencia, se ha medido la tensión necesaria para inducir 100  $\mu\text{A}$ . También se ha apuntado la corriente que atraviesa la bobina y la inducción magnética en el centro de la espira.

Resumen de la primera prueba:

- 1 bobina. Resistencia de la bobina = 23,19  $\Omega$ .
- Diámetro interior bobina= 3,5 cm, diámetro exterior bobina= 9,5 cm, longitud bobina = 3 cm.
- Diámetro espira = 3,2 cm.
- Placa Petri de Diámetro = 3,5 cm.
- Resistencia de la espira variable 0  $\Omega$  - 100  $\Omega$ .
- Corriente a inducir en la espira= 100  $\mu\text{A}$ .

Los valores obtenidos se representan en la Tabla 2, cabe recordar que se incrementa la resistencia en 10  $\Omega$ , debido a la resistencia interna del multímetro:

*Tabla 2. Tensión y corriente aplicada en una bobina para inducir 100  $\mu\text{A}$  en la espira. Fuente: Propia*

Resistencia ( $\Omega$ )	Corriente aplicada (mA)	Tensión aplicada (V)	Inducción magnética (mT)
0 (0,28)	162	10	3,4
20	462	25	10,1
40	797	40	17,5
60	1178	60	26,0
80	1471	75	32,5
100	1845	100	40,8

Para la segunda prueba, se ha colocado a una distancia de 1,5 cm, una bobina idéntica a la anterior en la parte superior. De este modo, se va a estudiar el efecto que tiene incorporar una bobina más al montaje, bobinas Helmholtz, en términos de corriente y tensión aplicadas, y que sería el diseño final.

Respecto al montaje, se ha optado por colocar las bobinas en paralelo. Para medir la corriente, se ha decidido colocar en serie el multímetro antes de la conexión en paralelo, midiendo la corriente total. Por esa razón, en la Tabla 3, la corriente es mucho mayor que en la Tabla 2, pero como se ha supuesto que ambas bobinas son idénticas, la corriente que atraviesa a cada una de ellas, es la mitad de la corriente medida con el multímetro.

Se va a reutilizar el mismo material que en la prueba anterior. La colocación tanto de la placa Petri con la espira, como la sonda axial del teslámetro, es completamente igual al utilizado en la primera prueba con una única bobina.

Resumen de la segunda prueba:

- 2 bobina. Resistencia de la bobina = 23,19  $\Omega$ .

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ESTIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA CULTIVOS CELULARES

- Separación entre bobinas = 1,5 cm.
- Diámetro interior bobina= 3,5 cm, diámetro exterior bobina= 9,5 cm, longitud bobina = 3 cm.
- Diámetro espira = 3,2 cm.
- Placa Petri de Diámetro = 3,5 cm.
- Resistencia de la espira variable 0  $\Omega$  - 100  $\Omega$ .
- Corriente a inducir en la espira= 100  $\mu$ A.

Los valores obtenidos se representan en la Tabla 3, cabe recordar que se incrementa la resistencia en 10  $\Omega$ , debido a la resistencia interna del multímetro:

Tabla 3. Tensión y corriente aplicada en las bobinas Helmholtz para inducir 100  $\mu$ A en la espira. Fuente: Propia

Resistencia ( $\Omega$ )	Corriente total (mA)	Corriente por bobina (mA)	Tensión aplicada (V)	Inducción magnética (mT)
0 (0,28)	222	111	8	3,7
20	637	318,5	18	10,9
40	1061	530,5	31	18,4
60	1567	783,5	47	27,2
80	1938	969	58	33,7
100	2350	1175	71	40,8

La primera variable a observar ha sido la inducción magnética en ambas pruebas. Como no se ha modificado ningún parámetro, ni añadido ningún elemento extra en la parte eléctrica del conjunto espira-reóstato-multímetro, en ambos casos los valores medidos son similares, casi idénticos.

Es posible atribuir este error de similitud al error humano. Principalmente aparece en la selección de la resistencia en el reóstato. El valor de la resistencia ha sido seleccionado con ayuda de una regla que incorpora el propio reóstato en la zona superior, y con ayuda de un cursor se ha marcado los puntos necesarios para tomar medidas. Por esta razón, es complicado volver a colocar el cursor en la misma posición, y obteniendo la misma resistencia, además hay que contar el error del reóstato. También es posible que se pudiera haber movido la sonda axial del teslámetro. Pese a los posibles errores humanos y de los aparatos, los valores que se han obtenido son del mismo orden, alejándose unidades de mT.

Como se aprecia tanto en la Tabla 2 y Tabla 3, para inducir 100  $\mu$ A y tras aumentar la resistencia 20  $\Omega$ , ha sido necesario un aumento de la inducción magnética en 7 mT. Por lo cual, es posible obtener el campo magnético necesario para valores de resistencia más elevados de 100  $\Omega$ . La inducción magnética necesaria será en estos casos:

$$B \cong B_{(R=0\ \Omega)} + 0,35 * R \quad (38)$$

Donde las unidades de la inducción magnética son mT y la resistencia son  $\Omega$ . Entonces para inducir  $100 \mu\text{A}$  en la espira, necesita aumentarse el campo 7 mT por cada 20 Ohm de aumento en la resistencia de la espira.

Además, para comprobar el buen funcionamiento de las bobinas Helmholtz, se han utilizado las mismas condiciones que en el Anejo A de cálculos, presentado al final del proyecto, y se ha medido la intensidad del campo magnético en el eje z, dando saltos de 0,5 cm. Como se ha observado en la Fig 39, el campo magnético medido tiene la misma forma que el campo magnético obtenido con la ecuación (23). Se puede concluir que la ecuación utilizada se asemeja bastante a la realidad, permitiendo hacer extrapolaciones para futuras pruebas.

La falta de coincidencia entre valores puede deberse a diversos factores, como puede ser el error humano a la hora del montaje de las bobinas. También a errores de los aparatos de medida y de precisión por parte del aparato. Pese a ello, los valores obtenidos son orientativos, para dar firmeza a los resultados conseguidos con las ecuaciones.

Cabe destacar que, en la región entre ambas bobinas, el campo magnético es totalmente uniforme. Asegurando que la posición de la espira en el eje z no supone un inconveniente, pues se verá atravesada por la misma cantidad de flujo magnético, induciendo la misma cantidad de corriente. Esta uniformidad se demuestra más detalladamente también en el Anejo A de cálculos.

Pese a que en el centro del solenoide la intensidad del campo magnético es mayor, no es posible aprovechar dicho campo, por dos motivos. El primero de ellos es geométrico, la placa Petri no cabe en el interior del solenoide. Y el segundo, es el calor generado en el interior del solenoide, lo que supondría un problema para los cultivos de las células de Schwann, provocando su muerte.

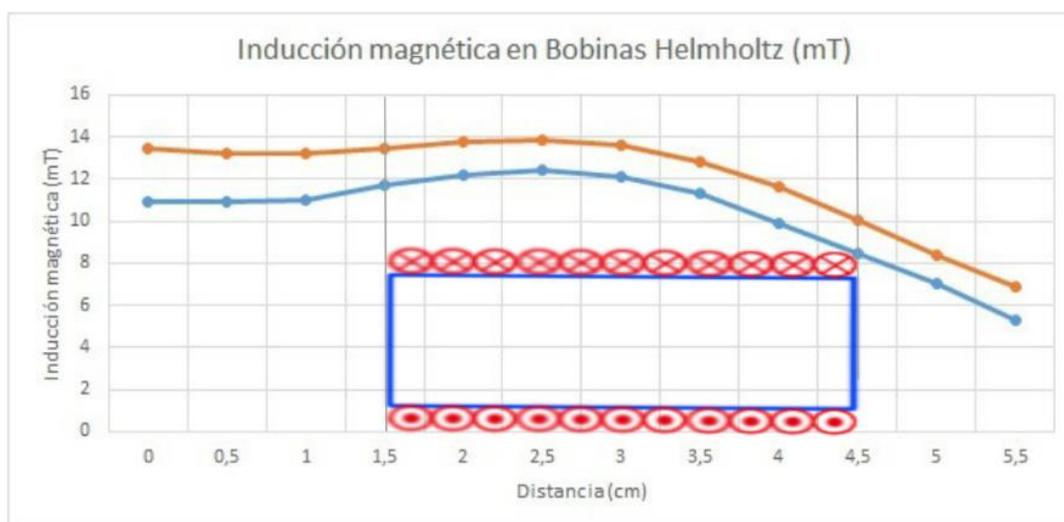


Fig 39. Inducción magnética a lo largo del eje z (segmento que une ambos centros de las bobinas), dando saltos de 0,5 cm, en las bobinas Helmholtz. Fuente: Propia

La segunda variable para estudiar es la corriente que atraviesa a cada bobina. Salta a la vista como el uso de las bobinas Helmholtz son de total utilidad para obtener una misma inducción magnética que un único solenoide, pero con un menor uso de corriente. En la Fig 40 se observa como la corriente necesaria en la primera prueba, es mayor que en la segunda prueba.

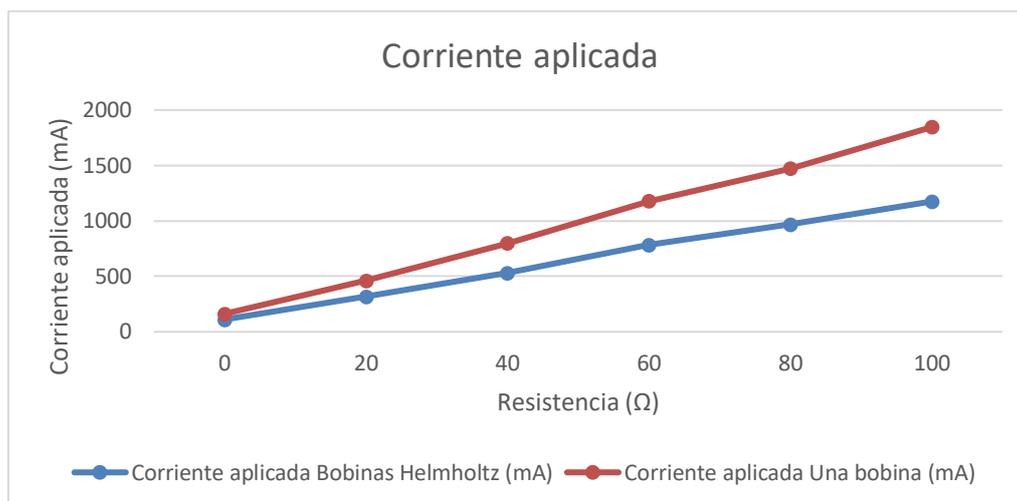


Fig 40. Corriente aplicada en las pruebas eléctricas. Fuente: Propia

Al trabajar con una única bobina, la mayor limitación viene determinada por el calor que genera la misma cuando se trabaja a corrientes muy elevadas, dependiendo de la sección del hilo de cobre esmaltado, llegando a alcanzar más de 150°C, degradando el material que las recubre.

Con el uso de las bobinas Helmholtz, se ha conseguido disminuir la corriente en más de un 30% para una resistencia de 100 Ω, lo que supone una disminución de la producción de calor, ideal para no dañar los cultivos celulares.

Esta disminución de corriente supone un acierto en la selección de dicho diseño. Pues como ya se predijo, el uso de las bobinas Helmholtz aumenta en un 40% más la inducción magnética que una sola bobina, aplicando la misma corriente. En consecuencia, si se utilizan unas bobinas Helmholtz, la corriente necesaria para inducir la misma corriente en una espira de mismo diámetro, será menor que una única bobina.

Consecuentemente, la tensión aplicada en las bobinas también disminuye, pues la resistencia interna de las bobinas no ha variado, por lo que, por la ley de Ohm, si la corriente ha disminuido con las bobinas Helmholtz, la tensión a aplicar, también ha disminuido en la misma proporción.

## 5.2. PRUEBAS TÉRMICAS

Como se detalló en el pliego de condiciones, el biorreactor debe trabajar en el interior de una incubadora, a una temperatura de 37°C y en un ambiente con un 5% de CO<sub>2</sub>. Es por ello, que la temperatura máxima que puede alcanzar el biorreactor es 1°C más, pues si se supera, es posible provocar la muerte celular.

Por ese motivo, se ha estudiado el calor generado por el biorreactor, midiendo la temperatura en la zona donde se coloca la placa Petri. Tras un estudio de los valores empleados en artículos sobre la estimulación magnética, se observan desde campos magnéticos de 5 mT durante 24h (Gamboa et al., 2007), hasta campos magnéticos de 10 y 20 mT durante 4h/5día (L. Liu et al., 2015; Z. Liu et al., 2014). Entonces, se ha decidió probar el biorreactor para dos valores de inducción magnética, 3,7 mT (8V) y 15 mT (25V).



Fig 41. Ensayo térmico. Posicionamiento de la sonda en el biorreactor. Fuente: Propia

Antes de comenzar el ensayo, se ha colocado el biorreactor en el interior de una estufa para simular la temperatura del incubador, 37°C. Entonces, tras atemperar el biorreactor en la estufa, para cada uno de los valores de inducción magnética, se ha medido la temperatura en la zona de la placa Petri cada 10 min, durante 1h, obteniéndose los valores presentados en la Fig 42. Para las medidas de la temperatura se ha utilizado un termómetro 638 Pt con una sonda, tal y como se observa en la Fig 41.

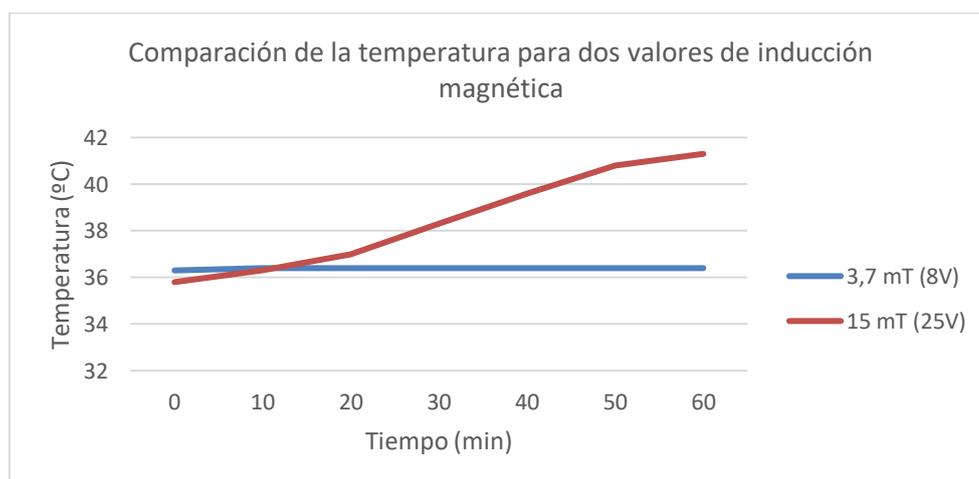


Fig 42. Comparación de la temperatura para dos valores de inducción magnética. Fuente: Propia

Después de realizar este ensayo se ha llegado a la conclusión de que es necesario establecer unas limitaciones para que no se pueda llegar a producir la muerte de las células. De modo que se ha decidido establecer que es posible realizar una estimulación magnética con 3,7 mT durante un largo periodo de tiempo, pues el biorreactor no genera calor suficiente como para calentar las muestras, aunque este campo no sería adecuado para la inducción de corriente, pues es muy pequeño y necesita espiras de resistencia muy bajas, cercanas a los 10  $\Omega$ .

En cambio, si se desea estimular magnéticamente o, inducir 100  $\mu$ A en una espira de 3,2 cm de diámetro con una inducción magnética de 15 mT, únicamente sería posible hacerlo durante periodos de 30 min, para no alcanzar temperaturas mayores de 38°C. Tras cada estimulación se ha recomendado dejar que el biorreactor se enfríe, y así evitar la posible muerte celular. Además, solo sería posible inducir 100  $\mu$ A a espiras con una resistencia máxima de 40  $\Omega$ .

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ESTIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA CULTIVOS CELULARES

---

Debido a que cuando se crea un campo magnético de 15 mT, se alcanzan temperaturas superiores a 40 °C, se ha buscado alguna opción para intentar disminuir la temperatura. Por ese motivo, se utilizó la tapa de otra placa Petri para colocarla debajo de la placa Petri con muestra (agua) y así colocar más aislante y eliminar el contacto directo con la bobina inferior, Fig 43.

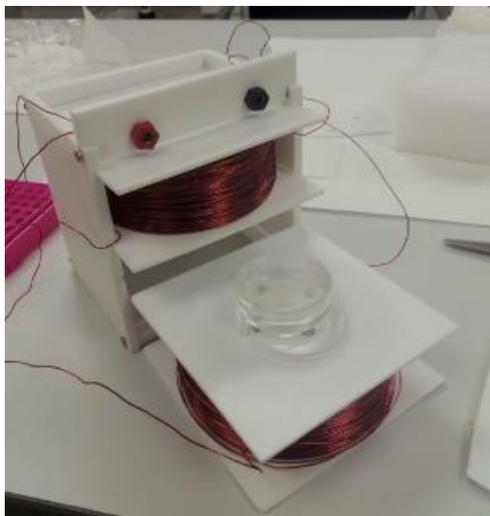


Fig 43. Colocación de la tapa de una placa Petri para evitar el contacto directo con la bobina. Fuente: Propia

Entonces, se ha vuelto a medir la temperatura con la disposición anterior y se llega a observar una mejora de 0,4°C, tal y como se muestra en la Tabla 4. Los primeros 20 minutos no se pueden comparar debido a la falta de coincidencia en la temperatura inicial.

Tabla 4. Comparación de temperatura del biorreactor sin y con el uso de la tapa de la placa Petri. Fuente: Propia

Tiempo (min)	Temperatura <sub>15 mT (25V)</sub> (°C)	Temperatura <sub>15 mT (25V) Con tapa Petri</sub> (°C)
0	35,8	33,3
10	36,3	35,0
20	37,0	36,7
30	38,3	38,1
40	39,6	39,3
50	40,8	40,4
60	41,3	41,0

Por tanto, es posible afirmar que el uso de la tapa de la placa Petri para evitar el contacto directo con la bobina puede ayudar a disminuir la temperatura de la muestra, y así bajar las probabilidades de muerte celular durante los 30 min de estimulación magnética.

### 5.3. PROPUESTAS DE MEJORA

Tanto en la industria farmacéutica como en la biotecnología, el uso de placas multipocillos es fundamental para poder elaborar y estudiar diversas muestras. Además, el uso de estas placas ayuda a evitar la contaminación entre las diversas muestras cultivadas.

Una de las propuestas de mejora, es el uso de estas placas multipocillos. Por esa razón, hay que disminuir el radio de la espira, lo que supone un aumento considerable del campo magnético. En este caso, el valor de la inducción magnética aumenta su valor muy influenciado por el radio de la espira, pues está al cuadrado.

Debido a este aumento, es necesario aumentar las variables de control. Como primera variable a modificar, se tiene la intensidad, pero como se lleva evitando a lo largo del proyecto, un aumento de la intensidad supone un aumento de energía liberada en forma de calor. Como segunda variable, está la cantidad de espiras, pero esto provocaría un aumento del volumen de cobre, incrementando el coste y dificultad a la hora de trabajar en la incubadora con tanto peso de cobre.

Por último, la frecuencia, variable que se ha evitado modificar al utilizar la propia frecuencia de 50 Hz de la red eléctrica. Tras haber hecho un estudio de las frecuencias utilizadas en investigaciones de regeneración axonal, se puede llegar a la conclusión que frecuencias entre 1 Hz y 200 kHz no son citotóxicas [1-100 Hz (Zhang et al., 2006) y 200 kHz (Ye et al., 2011)].

Por esta razón, se propone el uso de un variador de frecuencia, como el mostrado en la Fig 44. Con este aparato, es posible modificar la frecuencia proveniente de la red eléctrica, lo que permitirá inducir la misma corriente en la espira con campos magnéticos más pequeños.



Fig 44. Variador de frecuencia Siemens SINAMICS V20. Fuente: Siemens

Además, el uso de un variador de frecuencia favorece la disminución de la generación de calor por efecto Joule. Esto se debe a que, a medida que aumentamos la frecuencia de trabajo, y manteniendo las demás variables de control fijas, el flujo necesario disminuye (33), de modo que el campo magnético necesario será mucho mejor, consecuentemente, la corriente que habrá que hacer pasar por las bobinas, será mucho menor, y por la ley de Joule, el calor generado por las pérdidas

disminuirá. Asimismo, sería posible solucionar los problemas de calentamiento presentados en el apartado 5.2.

Se ha hecho una pequeña aproximación del salto de temperatura del biorreactor dentro de la incubadora, para diferentes valores de frecuencia y suponiendo la incubadora como un volumen totalmente adiabático. Para ello, se han utilizado los mismos cálculos que los empleados en el Anejo, variando la frecuencia de trabajo. Para obtener las pérdidas de energía en forma de calor se ha utilizado la siguiente ecuación:

$$E = R \cdot I^2 \cdot \Delta t \quad (39)$$

Donde la  $E$  es la energía calorífica, la  $R$  es la resistencia, la  $I$ , la corriente que atraviesa las bobinas, y la variación de tiempo  $\Delta t$ . Todos los valores se miden en unidades del SI.

Asimismo, siguiendo la primera ley de la termodinámica y siendo el volumen de la incubadora cerrado, entonces el trabajo realizado por el sistema es nulo, se obtiene:

$$\begin{aligned} \Delta U &= Q - W \\ dU &= dQ - pdV \\ \Delta U &= Q = m \cdot c_v \cdot \Delta T \end{aligned} \quad (40)$$

De modo que es posible relacionar la energía calorífica  $E$ , con la variación de energía interna del sistema  $\Delta U$ , siendo  $m$  la masa de aire encerrada en la incubadora,  $c_v$  es el calor específico a volumen constante y, por último,  $\Delta T$  la variación de la temperatura del sistema. Cabe destacar, que la densidad del aire varía con la temperatura, humedad y altitud. Por ello, se ha utilizado la versión simplificada de la fórmula CIPM-2007, versión exponencial (Manuel, Pérez, & Becerra, 2010), para obtener un valor más aproximado a la densidad del aire dentro de la incubadora.

Entonces, es posible obtener los saltos de temperatura para distintas intensidades y periodos de tiempo. Por ese motivo, se muestra en la Tabla 5 el efecto beneficioso del aumento de temperatura con la disminución de la temperatura. Los cálculos vienen desarrollados en los Anejos A y B.

*Tabla 5. Saltos de temperatura para diferentes frecuencias en 10 min y 1 hora. Fuente: Propia*

Frecuencia (HZ)	Inducción (mT)	Intensidad (A)	Impedancia ( $\Omega$ )	Voltaje (V)	$\Delta T$ (10min) ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\Delta T$ (1hora) ( $^{\circ}\text{C}$ )
50	11,195	0,261	54,004	15,29	6,75	40,48
100	5,598	0,131	108,038	14,46	1,70	10,20
200	2,799	0,065	216,144	14,12	0,42	2,51
400	1,399	0,033	432,015	14,28	0,11	0,65

Para la elaboración de la Tabla 5, únicamente orientativa, se ha utilizado como variable independiente la frecuencia y la duración del tiempo, además de emplear los valores de las demás variables implicadas presentadas en el Anexo A y se ha seguido la siguiente secuencia de ecuaciones.

La ecuación (33) para obtener el flujo magnético que ha de atravesar a la espira de 3,2 cm de diámetro para que se induzca 100  $\mu\text{A}$  por la ley de Faraday, (28) para obtener el campo magnético necesario a partir del flujo magnético y la sección de la espira. Después, se obtiene la intensidad que ha de fluir por los solenoides con la ecuación de las bobinas Helmholtz (24), la ecuación (35) para obtener la inductancia y multiplicando por la velocidad angular ( $2\pi f$ ) se ha obtenido la impedancia. Como valor extra, se ha aproximado la tensión necesaria a aplicar a partir de la Ley de Ohm (65).

Es, por tanto, que el uso de un variador de frecuencia puede ayudar a trabajar a corriente más pequeñas, y por tanto evitar la generación de calor que pueda causar la muerte de las células cultivadas.

El crecimiento de los microorganismos está influenciado por la aireación y temperatura. De modo que se utilizan incubadoras preparadas milimétricamente para que la aireación sea la adecuada y la temperatura se mantenga a 37  $^{\circ}\text{C}$ , la ideal para crezcan y no mueran los microorganismos.

Al emplear las bobinas creadoras del campo magnético, la temperatura de su alrededor aumenta, debido a las pérdidas de energía en forma de calor por la ley de Joule, como consecuencia del paso de corriente a través del hilo de cobre esmaltado.

Como el biorreactor estará en el interior de la incubadora, un ligero aumento de la temperatura puede ser subsanado por la propia incubadora. Sin embargo, puede existir el caso de una pequeña sobrecorriente que provoque un aumento de la temperatura, que puede ser perjudicial para los cultivos.

Por tanto, como propuesta de mejora, se plantea la opción de utilizar un sensor de temperatura que mida la variación de temperatura. Cuando el salto de temperatura sea mayor que el fijado por los investigadores, el sensor emitirá una señal que desconectará las bobinas de tensión, impidiendo así el paso de corriente y un posterior aumento de la temperatura. De esta forma, se evita que el calor pueda matar a las neuronas.



## **CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES**

En este último capítulo se presentan las distintas conclusiones obtenidas a lo largo de la realización del proyecto, así como la metodología para cumplir los distintos objetivos planteados en el apartado 3.1. Además, se han planteado las contribuciones del trabajo para futuras investigaciones. Y para finalizar el capítulo, se han presentado diversas líneas de futuro que pueden partir de este trabajo.

### **6.1. CONCLUSIONES GENERALES**

A continuación, se va a detallar las conclusiones más importantes del Trabajo Final de Grado:

- Se ha creado un diseño totalmente original de un biorreactor capaz de estimular tanto magnética como eléctricamente (con una espira) un cultivo celular en el interior de una placa Petri a partir de un método no invasivo.
- Las pruebas eléctricas llevadas a cabo demuestran la eficacia del biorreactor para cumplir su objetivo principal, inducir 100  $\mu\text{A}$  en una espira, con una resistencia variable entre 0  $\Omega$  y 100  $\Omega$ , en el interior de una placa Petri de 3,5 cm de diámetro. El transformador regula la tensión aplicada sobre las bobinas Helmholtz, obteniendo valores de inducción magnética superiores a 40 mT, y todo ello, trabajando a una frecuencia de 50 Hz. Cabe destacar que existen limitaciones de campo magnético como consecuencia del calor generado al aplicarlo. De modo que, para ciertos valores, como es 3,7 mT, es posible estimular continuamente, pero la resistencia de la espira ha de ser muy baja, valores cercanos a 10  $\Omega$ , para llegar a alcanzar los 100  $\mu\text{A}$ , mientras que con un campo magnético de 15 mT, se ha inducido 100  $\mu\text{A}$  a espiras de 30  $\Omega$ , pero el tiempo de estimulación máxima son 30 min, si no, se aumentaría más de 1°C la temperatura de la muestra.
- Pese a ser un diseño que únicamente trabaja con placas Petri, el biorreactor es fácilmente replicable. El diseño destaca por dos motivos, primero, su sencillez a la hora de la construcción, pues únicamente se hace uso de tornillería. Y segundo, el uso de materiales económicamente accesibles, tales como son el teflón o el hilo de cobre esmaltado.
- El uso de las bobinas Helmholtz aporta una característica imprescindible a la hora de trabajar en los laboratorios, la uniformidad del campo magnético. Con el uso de este par de bobinas, se ha obtenido un campo magnético uniforme en la región central del dispositivo, concretamente en la zona central del eje que une los centros de ambas bobinas, de modo que, si fuera necesario estimular dos placas a la vez, serían atravesadas por el mismo campo magnético, pudiendo comparar ambas muestras tras la estimulación.
- Los materiales empleados en la construcción del biorreactor, tales como son el teflón, los tornillos inoxidables y el hilo de cobre esmaltado, son completamente esterilizables, tanto con etanol como con la autoclave. De este modo, es posible utilizar el biorreactor en el

interior de una incubadora a una temperatura de 37° C y en un ambiente con un 5% de CO<sub>2</sub>, asegurando la no contaminación de las muestras propias y a las colindantes pertenecientes a los demás compañeros de laboratorio.

- Muchos artículos sobre estimulación magnética y eléctrica trabajan *in vivo*, llegando a la necesidad de sacrificar animales para obtener resultados. Con este diseño, se ha dado la posibilidad de trabajar *in vitro*, reduciendo el uso de animales en experimentación y a su vez, reduciendo la cantidad de material a emplear en las muestras.
- Por último, el diseño del biorreactor destaca por ser fácilmente regulable. Con el transformador, se puede manejar la corriente que atraviesa a las bobinas con el fin de variar la intensidad del campo magnético al gusto. Asimismo, el biorreactor, está diseñado de manera que las bobinas se apoyan en unas guías, permitiendo colocarlas o sacarlas en cualquier momento, incluso para facilitar la colocación de la muestra en el centro de las bobinas. Incluso, para las conexiones eléctricas, se han empleado conexiones tipo banana, permitiendo una conexión más fiable y sencilla.

## 6.2. LÍNEAS FUTURAS

Este TFG puede servir como punto de partida para nuevos proyectos relacionados con la estimulación magnética, eléctrica o ambas a la vez. Por ejemplo, puede ser útil como recopilación de información acerca de los protocolos, valores o máquinas empleadas en estimulación eléctrica y magnética en la actualidad, o para la comparación entre los valores de inducción magnética, corriente, resistencia, etc. obtenidos teórica y experimentalmente con el uso de bobinas Helmholtz.

Dado que el biorreactor ha sido diseñado a medida para el estímulo de cultivos celulares, resulta complicado el buscar otras posibles aplicaciones. Pese a ello, podría utilizarse, no solo para estimular cultivos celulares, si no diferentes tipos de muestras, como pueden ser los tejidos de plantas o animales.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bervar, M. (2005). Effect of weak, interrupted sinusoidal low frequency magnetic field on neural regeneration in rats: Functional evaluation. *Bioelectromagnetics*, 26(5), 351–356.
- Cardelli, E., Faba, A., Franceschini, G., Pompei, M., & Tissi, F. (2012). Magnetic field exposure systems for the study of ELF effects. *2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition, ENERGYCON 2012*, 1107–1112.
- Gamboa, O. L., Gutiérrez, P. M., Alcalde, I., De la Fuente, I., & Gayoso, M. J. (2007). Absence of relevant effects of 5 mT static magnetic field on morphology, orientation and growth of a rat Schwann cell line in culture. *Histology and Histopathology*, 22(7–9), 777–780.
- Gunay, I., & Mert, T. (2011). Pulsed magnetic fields enhance the rate of recovery of damaged nerve excitability. *Bioelectromagnetics*, 32(3), 200–208.
- Huang, J., Hu, X., Lu, L., Ye, Z., Zhang, Q., & Luo, Z. (2010). Electrical regulation of Schwann cells using conductive polypyrrole/chitosan polymers. *Journal of Biomedical Materials Research - Part A*, 93(1), 164–174.
- Ishak, B. (2017). Biomagnetics: principles and applications of biomagnetic stimulation and imaging, edited by Shoogo Ueno and Masaki Sekino. *Contemporary Physics*, 58(2), 200–201.
- Koppes, A. N., Nordberg, A. L., Paolillo, G., Goodsell, N., Darwish, H., Zhang, L., & Thompson, D. M. (2013). Electrical Stimulation of Schwann Cells Promotes Sustained Increases in Neurite Outgrowth. *Tissue Engineering Part A*, 130924230853000.
- Kouyoumdjian, J. A. (2006). Peripheral nerve injuries: A retrospective survey of 456 cases. *Muscle and Nerve*, 34(6), 785–788. <https://doi.org/10.1002/mus.20624>
- Liu, L., Liu, Z., Huang, L., Sun, Z., Ma, T., Zhu, S., ... Luo, Z. (2015). Pulsed magnetic field promotes proliferation and neurotrophic genes expression in Schwann cells in vitro. *International Journal of Clinical and Experimental Pathology*, 8(3), 2343–2353.
- Liu, Z., Huang, L., Liu, L., Luo, B., Liang, M., Sun, Z., ... Luo, Z. (2014). Activation of schwann cells in vitro by magnetic nanocomposites via applied magnetic field. *International Journal of Nanomedicine*, 10, 43–61.
- Manuel, L., Pérez, P., & Becerra, O. (2010). *Impacto De La Nueva Fórmula De La Densidad Del Aire Cipm-2007* (pp. 3–7). pp. 3–7.
- Nguyen, H. T., Wei, C., Chow, J. K., Nguy, L., Nguyen, H. K., & Schmidt, C. E. (2013). Electric field stimulation through a substrate influences Schwann cell and extracellular matrix structure. *Journal of Neural Engineering*, 10(4), 046011.
- Nieto-Sampedro, M., Collazos-Castro, J. E., Taylor, J. S., Gudino-Cabrera, G., Verdu-Navarro, E., Pascual-Piedrola, J. I., & Insausti-Serrano, R. (2002). [Traumatic injuries to the central nervous system and their repair]. *Rev Neurol*, 35(6), 534–552.

- Noble, J., Munro, C. A., Prasad, V. S. S. V., & Midha, R. (1998). Analysis of upper and lower extremity peripheral nerve injuries in a population of patients with multiple injuries. *Journal of Trauma - Injury, Infection and Critical Care*, 45(1), 116–122.
- Ravazzani, P., Ruohonen, J., & Grandori, F. (1995). Magnetic stimulation of peripheral nerves: computation of the induced electric field in a cylinder-like structure. *Advances in Engineering Software*, 22(1), 29–35.
- Riggio, C., Calatayud, M. P., Giannaccini, M., Sanz, B., Torres, T. E., Fernández-Pacheco, R., ... Raffa, V. (2014). The orientation of the neuronal growth process can be directed via magnetic nanoparticles under an applied magnetic field. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine*, 10(7), 1549–1558.
- Robinson, L. R. (2000, June). Traumatic injury to peripheral nerves. *Muscle and Nerve*, Vol. 23, pp. 863–873.
- Santiago Pérez, S., Espinosa, M. L., Pérez Conde, M. C., Merino Andréu, M., & Ferrer Gila, T. (2019). Afectación de fibras finas en la patología del nervio periférico. *Revista de Neurología*, 28(06), 543.
- Suszyński, K., Marcol, W., & Górka, D. (2015). Physiotherapeutic techniques used in the management of patients with peripheral nerve injuries. *Neural Regeneration Research*, Vol. 10, pp. 1770–1772.
- Vilariño Feltrer, G. (2015). *Conductos de ácido hialurónico para el crecimiento axonal guiado*.
- YAMAGUCHI-SEKINO, S., SEKINO, M., & UENO, S. (2011). Biological Effects of Electromagnetic Fields and Recently Updated Safety Guidelines for Strong Static Magnetic Fields. *Magnetic Resonance in Medical Sciences*, 10(1), 1–10.
- Ye, H., Cotic, M., Fehlings, M. G., & Carlen, P. L. (2011). Transmembrane potential generated by a magnetically induced transverse electric field in a cylindrical axonal model. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 49(1), 107–119.
- Zhang, Y., Ding, J., & Duan, W. (2006). A study of the effects of flux density and frequency of pulsed electromagnetic field on neurite outgrowth in PC12 cells. *Journal of Biological Physics*, 32(1), 1–9.

## LISTADO DE FIGURAS

Fig 1. Partes del SNC y SNP. Fuente: Google .....	3
Fig 2. Diferentes morfologías neuronales. Fuente: Apuntes Medicina UVic, Bet Sarri .....	4
Fig 3. Diagrama de las células presentes en el sistema nervioso periférico: neuronas, células satélite y células de Schwann. Fuente: (Vilariño Feltrer, 2015) .....	4
Fig 4. (a) Células de Schwann antes y después de exponerlas a un campo magnético. (b) Tubo de silicona para favorecer la guía para el crecimiento axonal. Fuente:(Ishak, 2017) .....	6
Fig 5. Uso de nanopartículas magnéticas para guiar el crecimiento axonal tras una lesión nerviosa, con ayuda de un campo magnético endógeno. Fuente:(Riggio et al., 2014) .....	7
Fig 6. Campo magnético creado por una corriente que atraviesa un hilo. Fuente: Propio .....	8
Fig 7. Espira circular. Fuente: Pág web: <a href="http://www.sc.ehu.es">http://www.sc.ehu.es</a> , Autor: Ángel Franco García .....	9
Fig 8. Solenoide. Fuente: Pág web: <a href="http://www.sc.ehu.es">http://www.sc.ehu.es</a> , Autor: Ángel Franco García .....	10
Fig 9. Líneas de campo magnético con limaduras de hierro. Fuente: Pág web: <a href="http://www.sc.ehu.es">http://www.sc.ehu.es</a> , Autor: Ángel Franco García.....	11
Fig 10. Bobinas Helmholtz. Fuente: Pág web: <a href="http://www.sc.ehu.es">http://www.sc.ehu.es</a> , Autor: Ángel Franco García.....	13
Fig 11. Campo magnético producido por una bobina Helmholtz al variar la distancia que separa las bobinas en eje del solenoide, z. Fuente: Pág web: <a href="http://www.sc.ehu.es">http://www.sc.ehu.es</a> , Autor: Ángel Franco García.....	14
Fig 12. Aparatos y cultivos utilizado para la estimulación magnética. Fuente: (Z. Liu et al., 2014). .....	18
Fig 13. Bobina Helmholtz utilizada para la regeneración axonal. Fuente: (Ye et al., 2011).....	18
Fig 14. Bobina utilizada para la estimulación magnética. Fuente: (YAMAGUCHI-SEKINO et al., 2011).....	19
Fig 15. Transformador. Fuente: Electrotecnia General (para la Carrera Ingeniería Industrial) Circuitos Magnéticos. Autor: Ing. Gustavo L. Ferro .....	19
Fig 16. Entrehierro y líneas del campo magnético. Fuente: Electrotecnia General (para la Carrera Ingeniería Industrial) Circuitos Magnéticos. Autor: Ing. Gustavo L. Ferro .....	20
Fig 17. Diseño del Biorreactor (Autodesk Inventor). Fuente: Propia .....	22
Fig 18. Campo E inducido en un axón en función del radio de la espira. Fuente: (Ravazzani, Ruohonen, & Grandori, 1995) .....	23
Fig 19. Bobina inferior con topes para guiar a la placa Petri. Fuente: Propia .....	23
Fig 20. Fórmula del politetrafluoroetileno (PTFE). Fuente: <a href="https://curiosoando.com/que-es-el-teflon">https://curiosoando.com/que-es-el-teflon</a> .....	24
Fig 21. Prismas de teflón. Fuente: Google.....	25
Fig 22. a) Conector tipo banana macho b) Conector tipo banana hembra. Fuente: Google .....	25
Fig 23. Autoclave. Fuente: <a href="https://www.pardell.es/autoclaves.html">https://www.pardell.es/autoclaves.html</a> .....	26
Fig 24. Diseño del Biorreactor (Autodesk Inventor). Fuente: Propia .....	27
Fig 25. Fresado del teflón. Fuente: Propia.....	27
Fig 26. Machos de roscar. Con cada macho, se va roscando cada vez más el material (apreciar diferencia entre valle y cresta de cada macho). Fuente: Ruko .....	28
Fig 27. Bastidor mecanizado y montado, con las bobinas insertadas. Fuente: Propia.....	28
Fig 28. Bobina terminada donde se aprecia la posición de los tornillos avellanados. Fuente: Propia .....	29
Fig 29. Bobinado de las bobinas con un taladro eléctrico. Fuente: Propia.....	29
Fig 30. VARIAC- Transformador de salida variable CA 12 Amp 0-250V (TDGC2-3KVA) . Fuente: SATKIT .....	31
Fig 31. PHYWE TESLÁMETRO, DIGITAL. Fuente: PHYWE .....	32
Fig 32. Montaje para la calibración del campo magnético de Helmholtz. Fuente: Física atómica y nuclear, LD Didactic GmbH .....	32
Fig 33. Multímetro digital Fluke 1640609, 10A ac, 750V ac, Banco, Modelo 45. Fuente: RS Components.....	33
Fig 34. Tablas de la resolución en AC y la precisión de multímetro FLUKE 45. Fuente: Especificaciones técnicas del Multímetro digital Fluke 1640609, 10A ac, 750V ac, Banco, Modelo 45.....	33

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ESTIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA CULTIVOS CELULARES

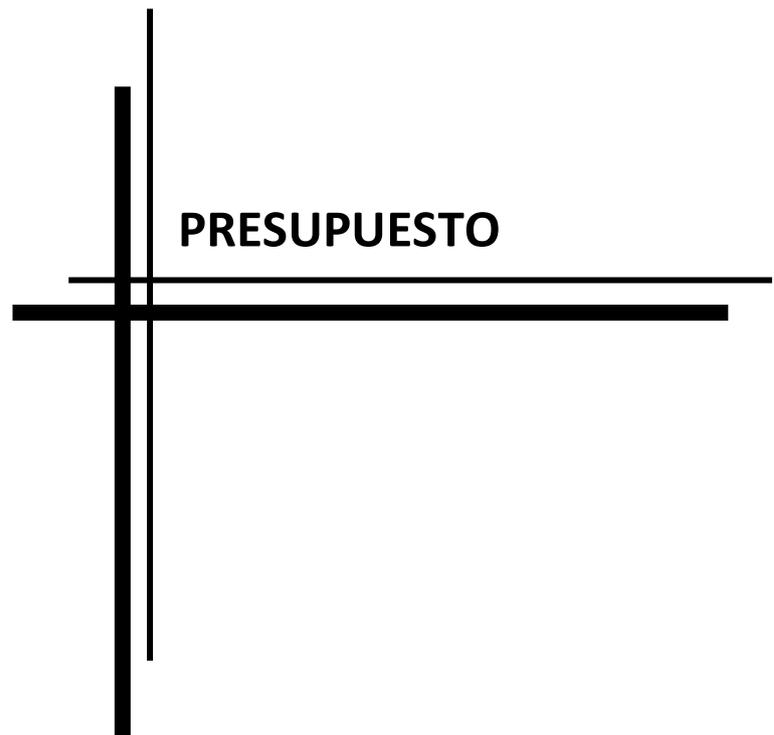
---

Fig 35. REOSTATO, 100 Ohm / 1,8 A. Fuente: PHYWE.....	34
Fig 36. Bobina fabricada manualmente, con poliespán como límite. Fuente: Propia .....	35
Fig 37. Montaje del transformador y bobina. Fuente: Propia .....	36
Fig 38. Situación de la placa Petri en la bobina y posicionamiento de la sonda del teslámetro. Fuente: Propia .	36
Fig 39. Inducción magnética a lo largo del eje z (segmento que une ambos centros de las bobinas), dando saltos de 0,5 cm, en las bobinas Helmholtz. Fuente: Propia.....	39
Fig 40. Corriente aplicada en las pruebas eléctricas. Fuente: Propia .....	40
Fig 41. Ensayo térmico. Posicionamiento de la sonda en el biorreactor. Fuente: Propia .....	41
Fig 42. Comparación de la temperatura para dos valores de inducción magnética. Fuente: Propia .....	41
Fig 43. Colocación de la tapa de una placa Petri para evitar el contacto directo con la bobina. Fuente: Propia .	42
Fig 44. Variador de frecuencia Siemens SINAMICS V20. Fuente: Siemens.....	43
Fig 45. Resistencia serie-inductancia del circuito. Fuente: <a href="http://tutorialesdeelectronicaBasica.blogspot.com">http://tutorialesdeelectronicaBasica.blogspot.com</a> .	80
Fig 46. Diagrama vectorial de la tensión resultante. Fuente: <a href="http://tutorialesdeelectronicaBasica.blogspot.com">http://tutorialesdeelectronicaBasica.blogspot.com</a> .....	82
Fig 47. Punto central de las bobinas de Helmholtz en el eje z. Fuente: Pág web: <a href="http://www.sc.ehu.es">http://www.sc.ehu.es</a> , Autor: Ángel Franco García.....	84
Fig 48. Inducción magnética de las bobinas Helmholtz a lo largo del eje z. Fuente: Propia.....	84

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Corriente máxima en hilos de cobre esmaltado aplicado en bobinas electromagnéticas. Fuente: Elementos Magnéticos Navarra S.L .....	34
Tabla 2. Tensión y corriente aplicada en una bobina para inducir 100 $\mu$ A en la espira. Fuente: Propia .....	37
Tabla 3. Tensión y corriente aplicada en las bobinas Helmholtz para inducir 100 $\mu$ A en la espira. Fuente: Propia .....	38
Tabla 4. Comparación de temperatura del biorreactor sin y con el uso de la tapa de la placa Petri. Fuente: Propia .....	42
Tabla 5. Saltos de temperatura para diferentes frecuencias en 10 min y 1 hora. Fuente: Propia .....	44
Tabla 6. Precio por día de materiales empleados en el TFG. Fuente: Propia .....	57
Tabla 7. Precio por día de los profesionales. Fuente: Guía Hays 2018, Informe sectores y salarios. ....	58
Tabla 8. Resistencia eléctrica de hilos de cobre esmaltados. Fuente: <a href="http://www.bnoack.com">www.bnoack.com</a> .....	81







## PRESUPUESTO

### INFORMACIÓN DEL PRESUPUESTO DEL BIORREACTOR

Antes de presentar el presupuesto del biorreactor, se va a explicar diversos puntos del presupuesto. Ante todo, resaltar la importancia del presupuesto, de cara a ver, si el proyecto en sí es viable económicamente, o pueden existir otras alternativas para hacerlo más accesible.

El presupuesto a elaborar es un presupuesto de un proyecto de investigación, por ese motivo, se ha decidido dividir el presupuesto en partidas que hacen referencia a cada uno de los pasos tomados a lo largo del proyecto, para la imaginación, diseño y construcción del biorreactor. Por esa razón se ha dividido el presupuesto en las siguientes partidas:

- Partida 1: Documentación.
- Partida 2: Diseño 3D y planos.
- Partida 3: Mecanizado y montaje.
- Partida 4: Pruebas eléctricas.
- Partida 5: Pruebas térmicas.
- Partida 6: Redacción de la memoria.

Tabla 6. Precio por día de materiales empleados en el TFG. Fuente: Propia

Material	Precio de compra (€/ud)	Precio por día (€/día)
Licencia mensual Autodesk Inventor	326,70 €/mes	10,89 €/día
Packard Bell EasyNote TE11HC i5-3210M/4GB/500GB/15.6"	390,08 €	1,08 €/día
Reostato, 100 Ohm/1,8 A, Marca: PHYWE	187,13 €	0,52 €/día
Teslámetro digital, Marca PHYWE	368,00 €	1,02 €/día
Multímetro digital Fluke, Modelo 45	715,00 €	1,99 €/día
Termómetro 638 pt, Marca CRISON	150,00 €	0,42 €/día
ESTUFA DESEC. 50X40X40, Marca Pselecta	1.009,42 €	2,80 €/día

En cuanto a ciertos materiales empleados en el TFG, con tal de no contabilizar el valor total del material, se ha decidido amortizar cada uno de los materiales en 1 año (el periodo normal de amortización de los materiales es de 10 años, pero el valor que se obtendría sería insignificante). De

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ESTIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA CULTIVOS CELULARES

---

modo que se ha obtenido el precio por día, para ello, se ha supuesto que un año tiene 12 meses y cada mes 30 días, entonces se tienen los siguientes precios aproximados, Tabla 6:

Por último, antes de presentar el presupuesto, se ha decidido obtener el precio por hora de cada uno de los profesionales implicados en el TFG, siendo su jornada laboral, 8 h/día, Tabla 7:

*Tabla 7. Precio por día de los profesionales. Fuente: Guía Hays 2018, Informe sectores y salarios.*

Profesionales	Tarifa anual (€/año)	Precio por h (€/h)
Ingeniero/a de Proyectos I+D (2-5 años) (Valencia)	30.000 €/año	10,42 €/h
Técnico/a de laboratorio (>10 años) (Valencia)	38.000 €/año	13,20 €/h

Como la media de horas a trabajar por el ingeniero en un TFG son de 300h, se ha contabilizado, que el Ingeniero/a de Proyectos I+D, trabaje todas las horas en su totalidad.

## PRESUPUESTO DEL BIORREACTOR

Fecha de emisión: 22/06/2019

---

### Partida 1:

Unidad	Descripción de las unidades de obra	Rendimiento	Precio	Importe
<b>Documentación</b>				
	Búsqueda bibliográfica en libros, artículos, etc.			
h	Ingeniero/a de Proyectos I+D	20,00	10,42 €/h	208,40 €
			<b>Costes directos</b>	<b>208,40 €</b>
%	Costes directos complementarios (3%)	0,03	208,40 €	6,25 €
			<b>Coste Total Partida</b>	<b>214,65 €</b>

## PRESUPUESTO DEL BIORREACTOR

Fecha de emisión: 22/06/2019

---

### Partida 2:

Unidad	Descripción de las unidades de obra	Rendimiento	Precio	Importe
<b>Diseño 3D</b>				
Creación del diseño del biorreactor con programas gráficos de diseño 3D.				
h	Ingeniero/a de Proyectos I+D	40,00	10,42 €/h	416,80 €
día	Licencia mensual Autodesk Inventor	5,00	10,89 €/día	54,45 €
día	Packard Bell EasyNote TE11HC i5-3210M / 4GB / 500GB / 15.6"	5,00	1,08 €/día	5,42 €
			<b>Costes directos</b>	<b>476,67 €</b>
%	Costes directos complementarios (3%)	0,03	476,67	14,30 €

---

**Coste Total Partida** **490,97 €**

## PRESUPUESTO DEL BIORREACTOR

Fecha de emisión: 22/06/2019

---

### Partida 3:

Unidad	Descripción de las unidades de obra	Rendimiento	Precio	Importe
<b>Mecanizado y montaje</b>				
Mecanizado de los elementos necesarios para el biorreactor y su posterior montaje.				
h	Ingeniero/a de Proyectos I+D	12,00	10,42 €/h	125,04 €
h	Técnico/a de laboratorio	12,00	13,20 €/h	158,40 €
ud	Placa PTFE Natural Esp. 002 mm, 2 x110 x210 mm	2,00	3,26 €/ud	6,52 €
ud	Placa PTFE Natural Esp. 005 mm, 5 x109 x270 mm	2,00	8,15 €/ud	16,30 €
ud	Barra PTFE Natural Diam. 035 mm, 35 x1 x70 mm	1,00	4,29 €/ud	4,29 €
ud	Hembras banana	2,00	0,20 €/ud	0,40 €
h	Transporte material	1,00	6,00 €/h	6,00
ud	Tornillos M3x12mm	10,00	0,30 €/ud	3,00 €
ud	Tornillos M3x10mm	16,00	0,30 €/ud	4,80 €
h	Torneado	0,10	30,00 €/h	3,00 €
h	Taladrado	0,60	25,00 €/h	15,00 €
h	Fresado	0,20	45,00 €/h	9,00 €
			<b>Costes directos</b>	<b>351,75 €</b>
%	Costes directos complementarios (3%)	0,03	351,71 €	10,55 €
			<b>Coste Total Partida</b>	<b>362,30 €</b>

## PRESUPUESTO DEL BIORREACTOR

Fecha de emisión: 22/06/2019

---

### Partida 4:

Unidad	Descripción de las unidades de obra	Rendimiento	Precio	Importe
<b>Pruebas eléctricas</b>				
Pruebas eléctricas para comprobar el buen funcionamiento del diseño, induciendo 100 $\mu$ A en una espira de 3,2 cm de diámetro.				
h	Ingeniero/a de Proyectos I+D	10,00	10,42 €/h	104,20 €
h	Técnico/a de laboratorio	10,00	13,20 €/h	132,00 €
día	Reostato, 100 Ohm/1,8 A, Marca: PHYWE	2,00	0,52 €/día	1,04 €
día	Teslámetro digital, Marca PHYWE	2,00	1,02 €/día	2,04 €
día	Multímetro digital Fluke, Modelo 45 (x2)	4,00	1,99 €/día	7,96 €
ud	VARIAC- Transformador de Salida Variable CA 12 Amp 0-250V (TDGC2-3KVA)	1,00	67,00 €/ud	67,00 €
ud	Placa Petri de 3,5 cm de diámetro	1,00	1,50 €/ud	1,50 €
kg	Hilo de cobre esmaltado 0.6mm (1 KG)	2,00	42,00 €/kg	84,00 €
ud	Cables banana 4 mm macho	10,00	1,79 €/ud	17,90 €
			<b>Costes directos</b>	<b>417,64 €</b>
%	Costes directos complementarios (3%)	0,03	417,64 €	12,53 €
			<b>Coste Total Partida</b>	<b>430,17 €</b>

## PRESUPUESTO DEL BIORREACTOR

Fecha de emisión: 22/06/2019

---

### Partida 5:

Unidad	Descripción de las unidades de obra	Rendimiento	Precio	Importe
<b>Pruebas térmicas</b>				
Comprobación de la temperatura alcanzada por el biorreactor para distintos valores de inducción magnética.				
h	Ingeniero/a de Proyectos I+D	16,00	10,42 €/h	166,72 €
día	ESTUFA DESEC. 50X40X40, Marca Pselecta	2,00	2,80 €/día	5,60 €
día	Termómetro 638 pt, Marca CRISON	2,00	0,42 €/día	0,84 €
			<b>Costes directos</b>	<b>173,16 €</b>
%	Costes directos complementarios (3%)	0,03	173,16 €	5,19 €
			<b>Coste Total Partida</b>	<b>178,35 €</b>

## PRESUPUESTO DEL BIORREACTOR

Fecha de emisión: 22/06/2019

---

### Partida 6:

Unidad	Descripción de las unidades de obra	Rendimiento	Precio	Importe
<b>Redacción de la memoria</b>				
	Redacción de la memoria del TFG para su posterior presentación.			
h	Ingeniero/a de Proyectos I+D	202,00	10,42 €/h	2.104,84 €
			<b>Costes directos</b>	<b>2.104,84 €</b>
%	Costes directos complementarios (3%)	0,03	2.104,84 €	63,15 €

---

**Coste Total Partida** 2.167,99 €

## PRESUPUESTO DEL BIORREACTOR

Fecha de emisión: 22/06/2019

---

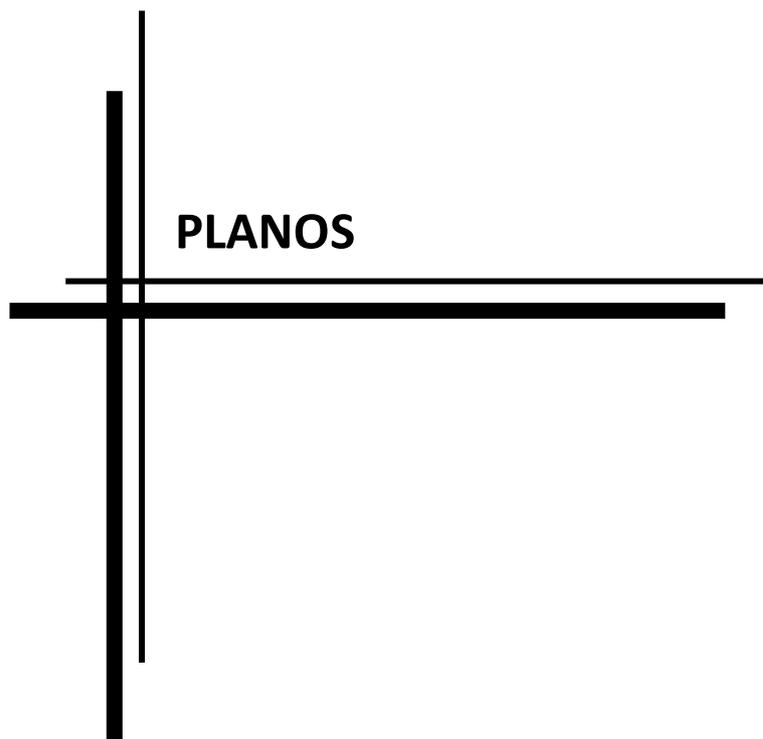
**Total:**

Descripción	Importe
Partida 1: Documentación	214,65 €
Partida 2: Diseño 3D y planos	490,97 €
Partida 3: Mecanizado y montaje	362,30 €
Partida 4: Pruebas eléctricas	430,17 €
Partida 5: Pruebas térmicas	178,35
Partida 5: Redacción de la memoria	2.167,99 €
<hr/>	
<b>Presupuesto de Ejecución Material</b>	<b>3.844,43 €</b>
Gastos generales (16%)	615,11 €
<hr/>	
<b>Presupuesto de Ejecución por Contrata</b>	<b>4.459,54 €</b>
I.V.A (21%)	936,50 €
<hr/>	
<b>Presupuesto base de licitación</b>	<b>5.396,05 €</b>

Asciende el presente presupuesto a la expresada cantidad de:

CINCO MIL TRESCIENTOS NOVENTA Y SEIS EUROS CON CINCO CÉNTIMOS

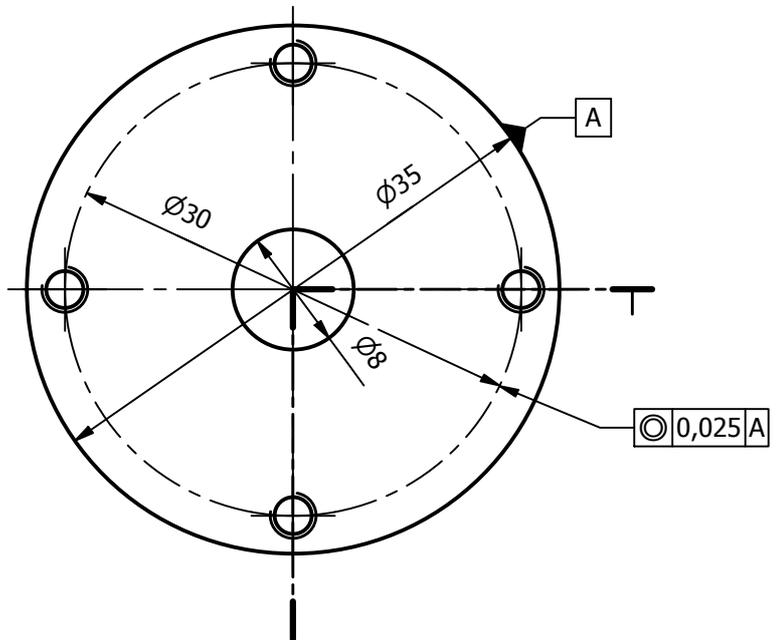
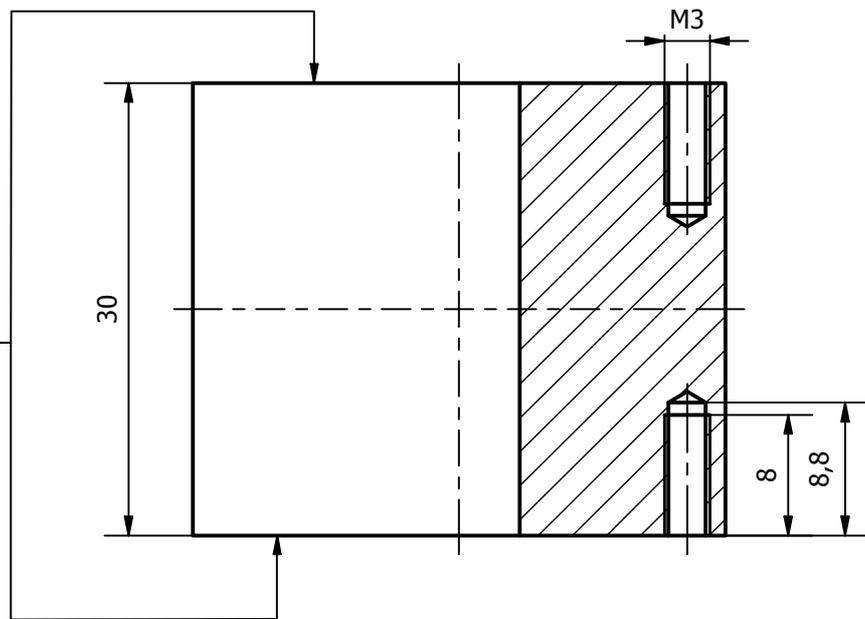




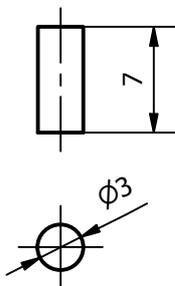


1  $\sqrt{\text{Ra } 1,4}$

$\square$  0,05



4  $\sqrt{\text{Ra } 1,4}$



Escala: 2:1



TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN  
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Propietario legal:



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

Título plano: Base bobina y tope (piezas 1 y 4)

Título proyecto:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ESTIMULACIÓN  
ELECTROMAGNÉTICA PARA CULTIVOS CELULARES

Creado / Aprobado por:

Marcos García Castelló

Hoja:

1/8

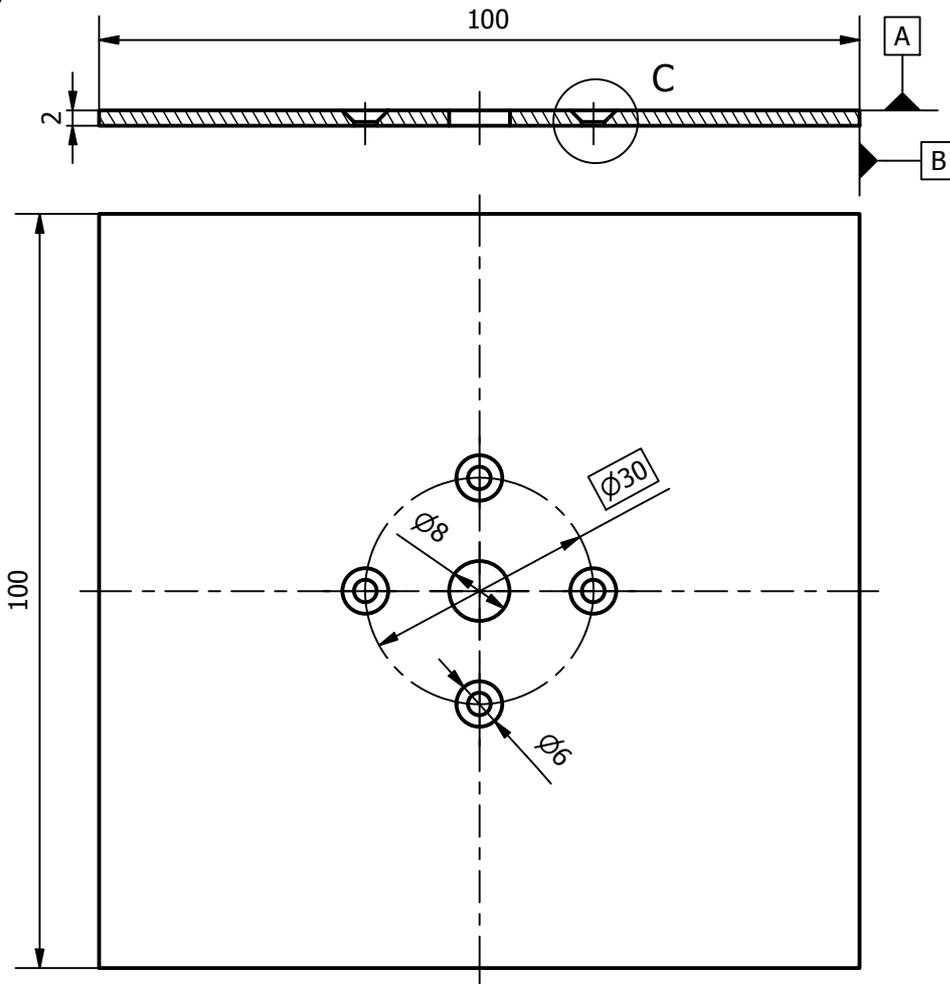
Tipo documento: Plano de detalle

Fecha de creación:  
27/05/2019

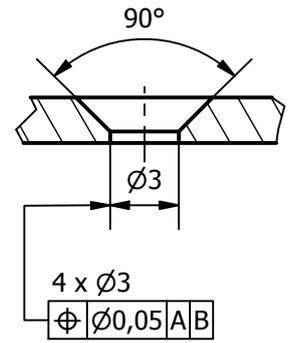
Fecha de edición:  
27/05/2019

Fecha de aprobación:  
20/06/2019

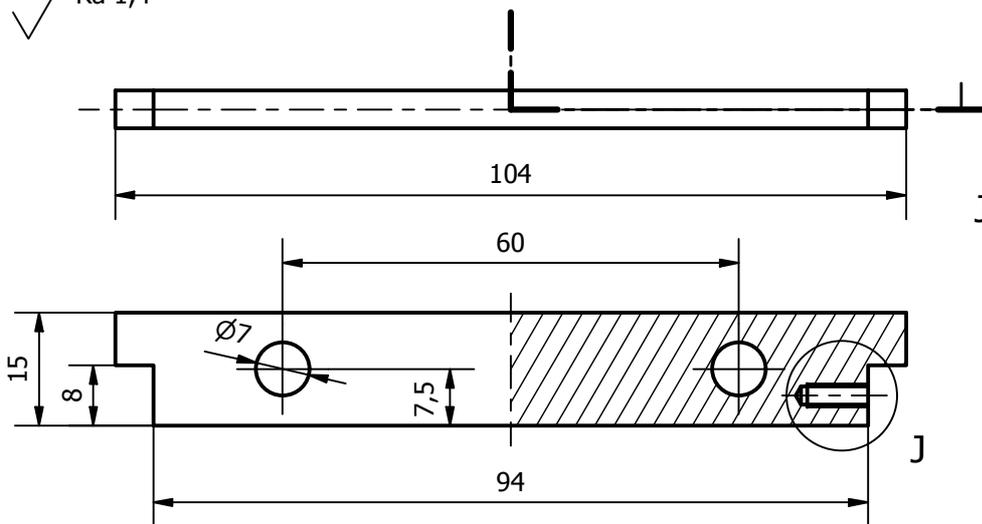
2  $\sqrt{Ra\ 1,4}$



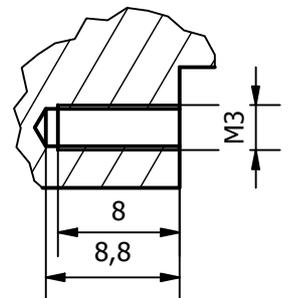
C (3 : 1)



8  $\sqrt{Ra\ 1,4}$



J (2 : 1)



Escala: 1:1



TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN  
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Propietario legal:



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

Título plano: Tapa sin guía y viga superior (piezas 2 y 8)

Título proyecto:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ESTIMULACIÓN  
ELECTROMAGNÉTICA PARA CULTIVOS CELULARES

Creado / Aprobado por:

Marcos García Castelló

Hoja:

Fecha de creación:  
27/05/2019

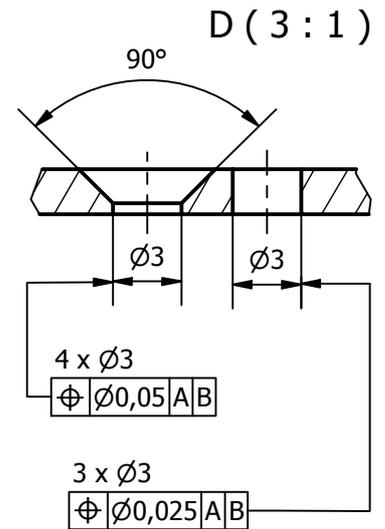
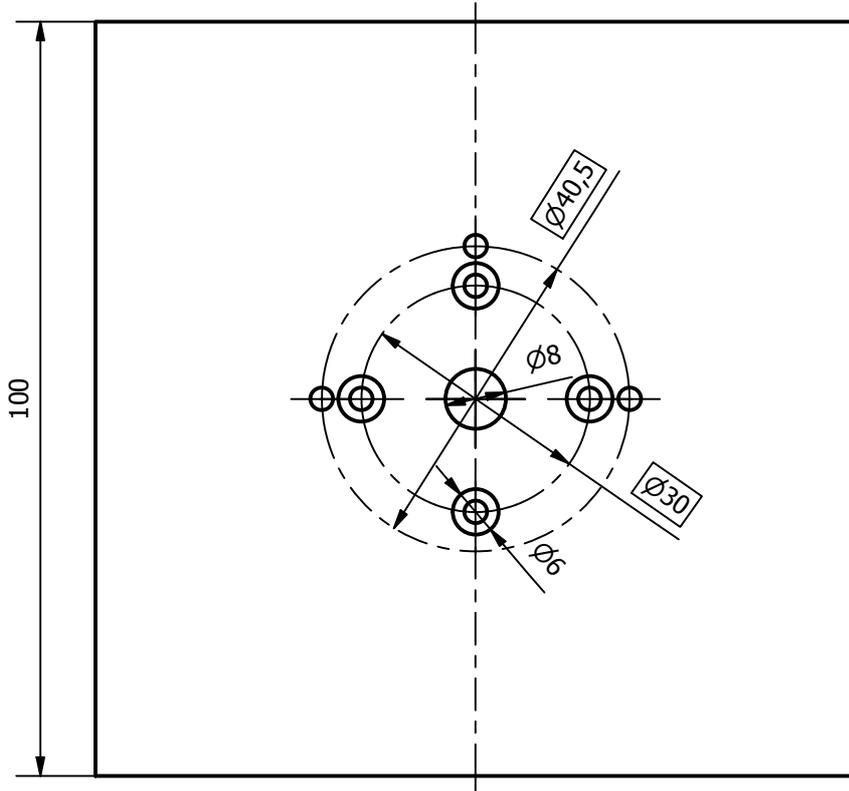
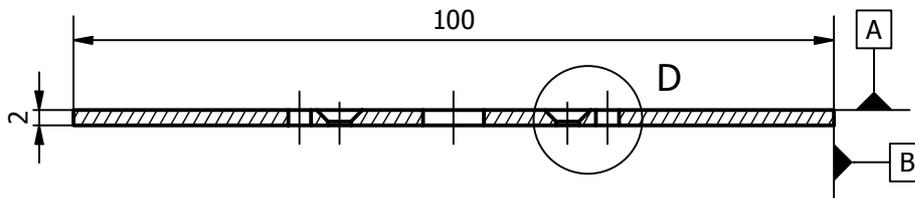
Fecha de edición:  
27/05/2019

Fecha de aprobación:  
20/06/2019

Tipo documento: Plano de detalle

2/8

3  $\sqrt{Ra\ 1,4}$



Escala: 1:1



TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN  
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES  
Propietario legal:



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

Título plano: Tapa con guía (pieza 3)

Título proyecto:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ESTIMULACIÓN  
ELECTROMAGNÉTICA PARA CULTIVOS CELULARES

Creado / Aprobado por: Marcos García Castelló

Hoja:

Tipo documento: Plano de detalle

Fecha de creación:  
27/05/2019

Fecha de edición:  
27/05/2019

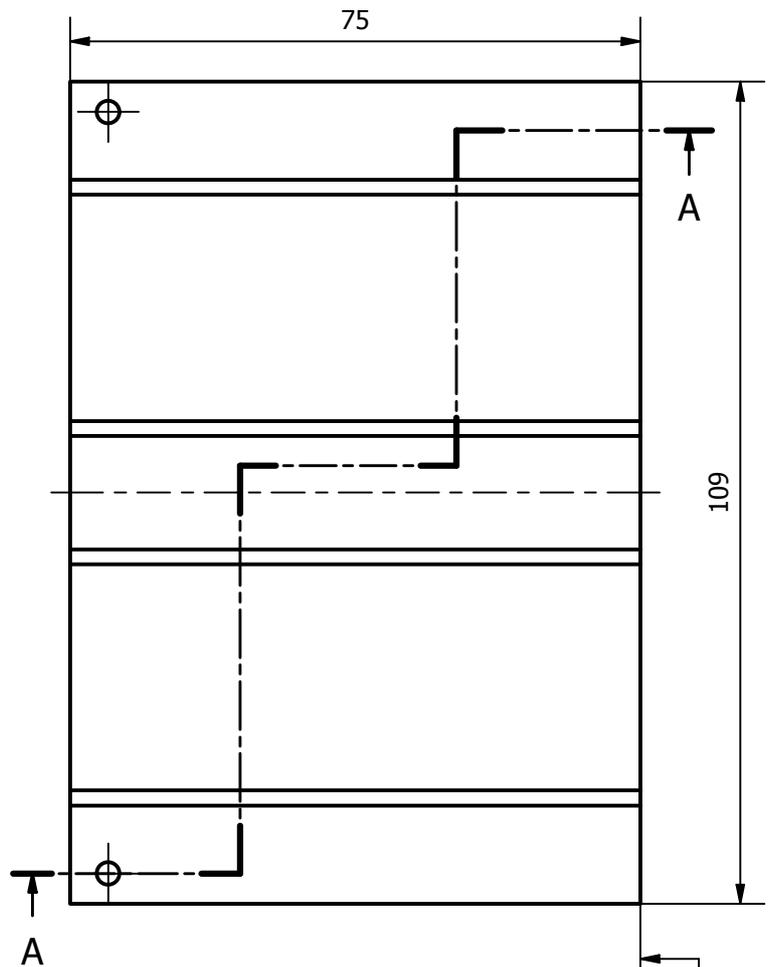
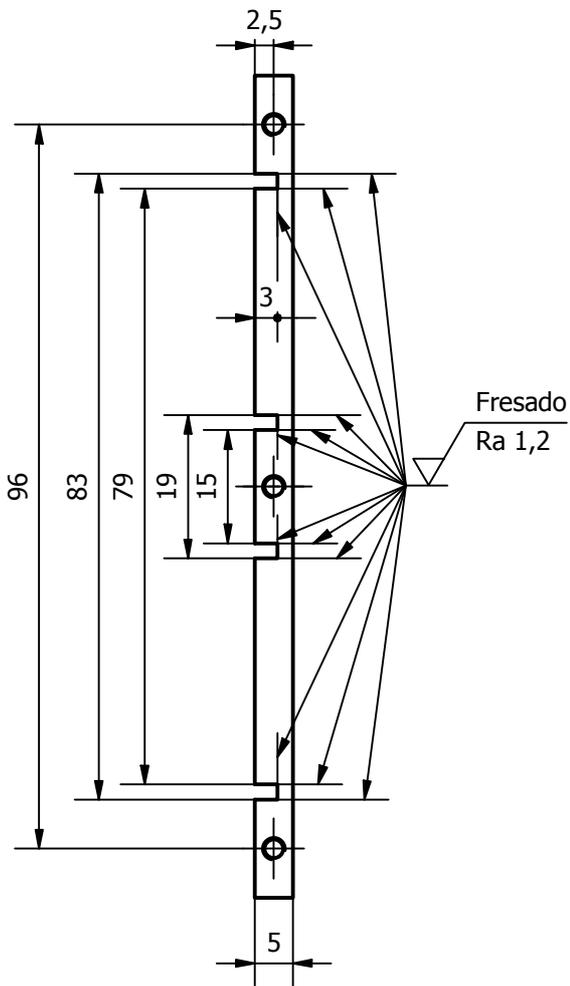
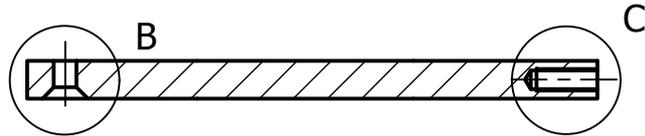
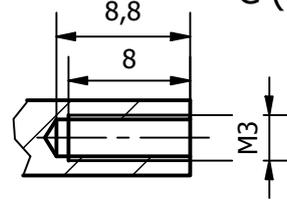
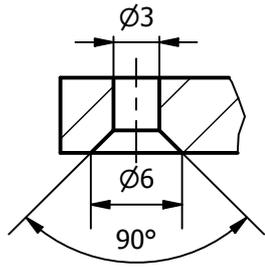
Fecha de aprobación:  
20/06/2019

3/8

5  $\sqrt{Ra\ 1,4}$  (✓)

B (2:1)

C (2:1)



$\sqrt{0,05}$

Escala: 1:1



TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN  
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES  
Propietario legal:



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

Título plano: Pared lateral (pieza 5)

Título proyecto:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ESTIMULACIÓN  
ELECTROMAGNÉTICA PARA CULTIVOS CELULARES

Creado / Aprobado por: Marcos García Castelló

Hoja:

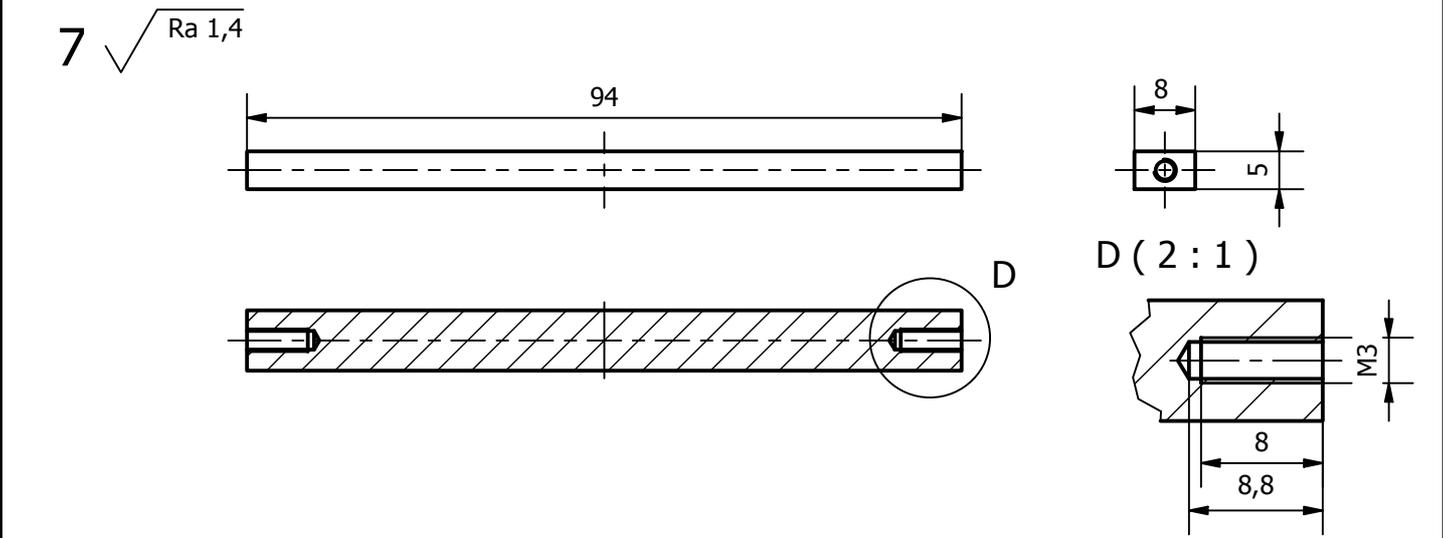
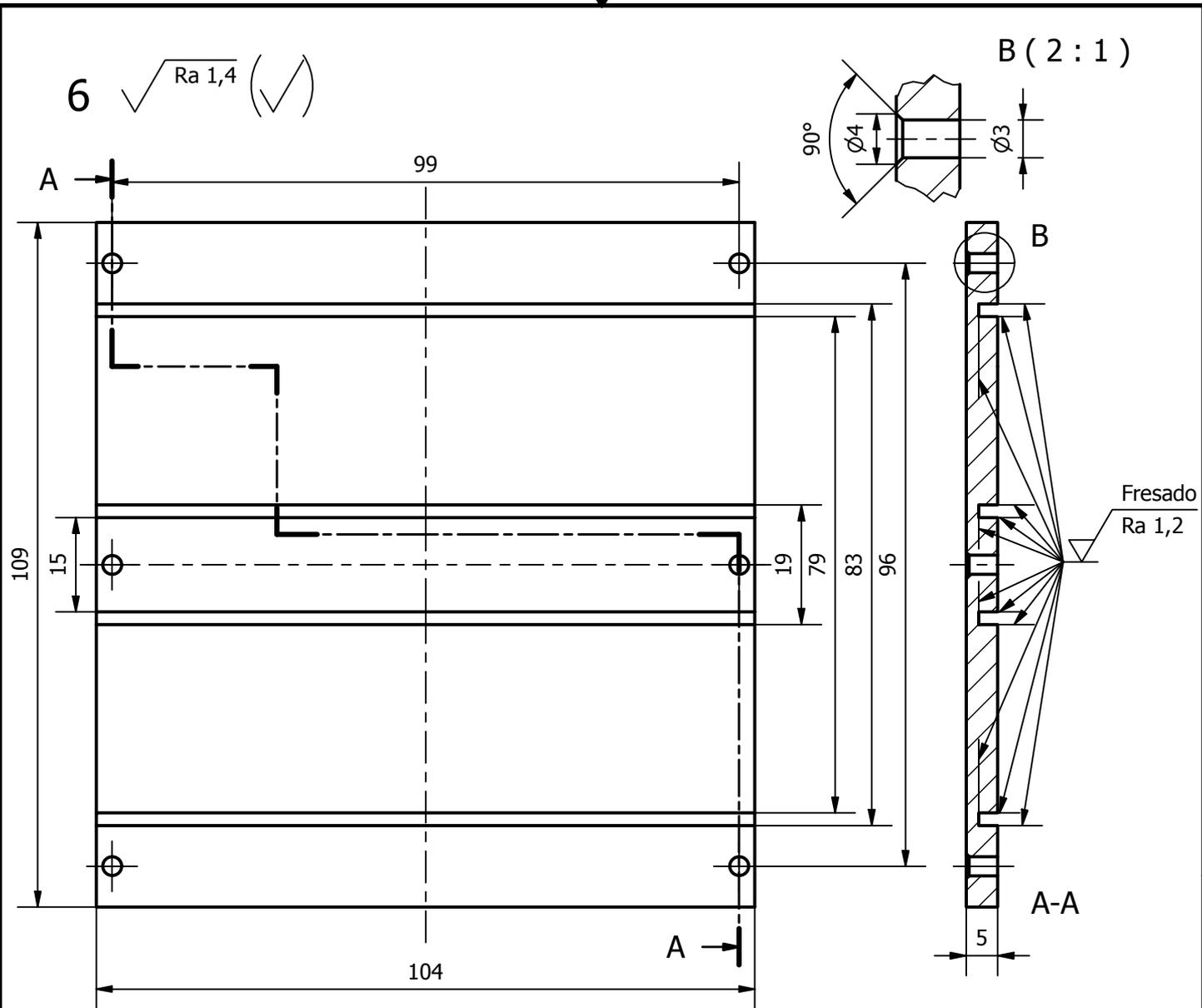
Fecha de creación:  
27/05/2019

Fecha de edición:  
27/05/2019

Fecha de aprobación:  
20/06/2019

4/8

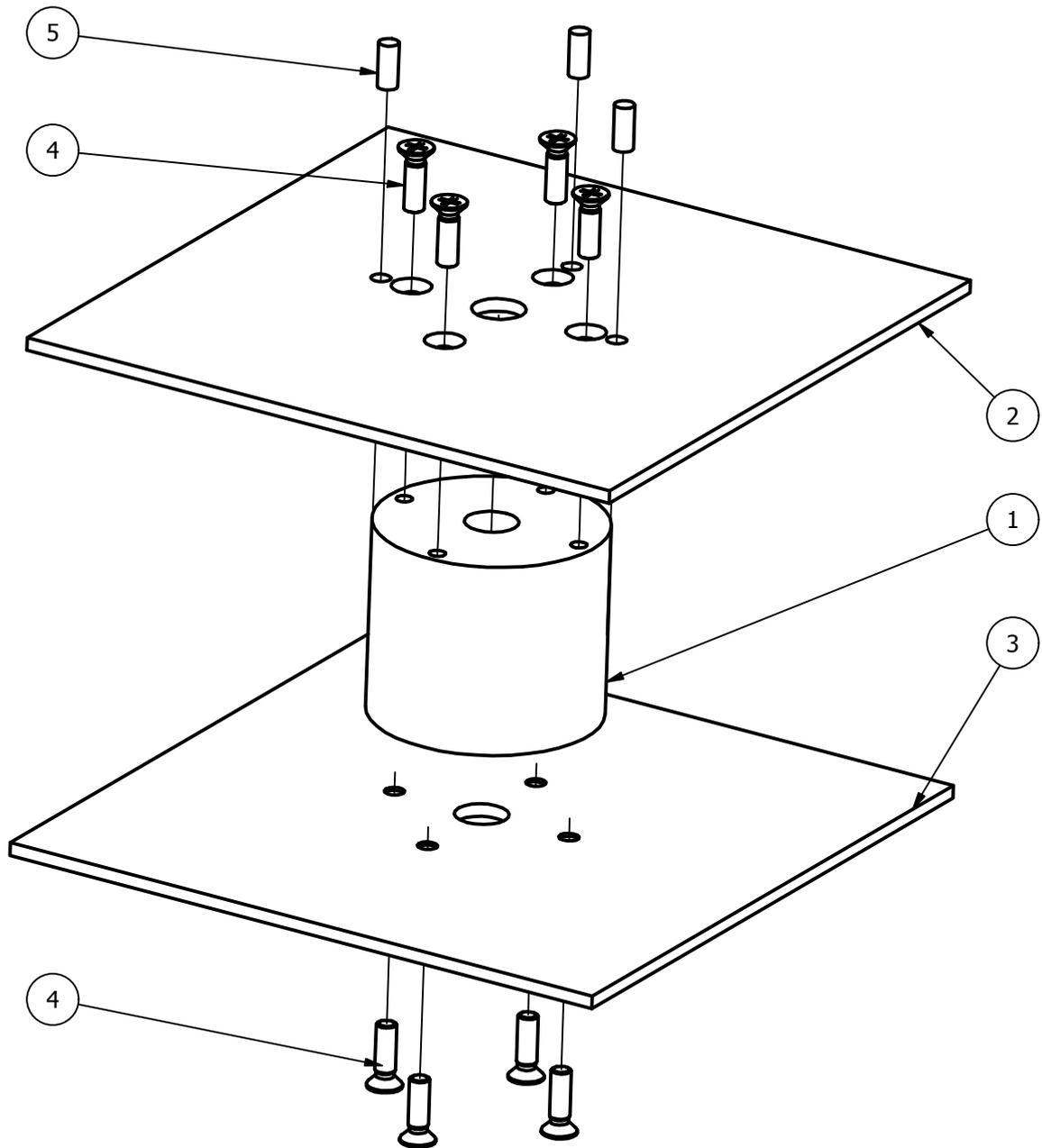
Tipo documento: Plano de detalle



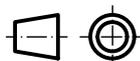
Escala: 1:1



<p>TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES Propietario legal:</p>	<p>Título plano: Pared trasera y viga inferior (piezas 6 y 7)</p>		
	<p>Título proyecto: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ESTIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA CULTIVOS CELULARES</p>		
<p>Tipo documento: Plano de detalle</p>	<p>Creado / Aprobado por: Marcos García Castelló</p>	<p>Fecha de creación: 27/05/2019</p>	<p>Fecha de edición: 27/05/2019</p>
	<p>Fecha de aprobación: 20/06/2019</p>	<p>Hoja: 5/8</p>	



Escala: 1:1



LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Base bobinas
2	1	Tapa con guía
3	1	Tapa sin guía
4	8	Tornillo AS 1427 - M3 x 10
5	3	Tope

TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN  
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES  
Propietario legal:



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

Título plano: Bobina desmontada

Título proyecto:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ESTIMULACIÓN  
ELECTROMAGNÉTICA PARA CULTIVOS CELULARES

Creado / Aprobado por: Marcos García Castelló

Hoja:

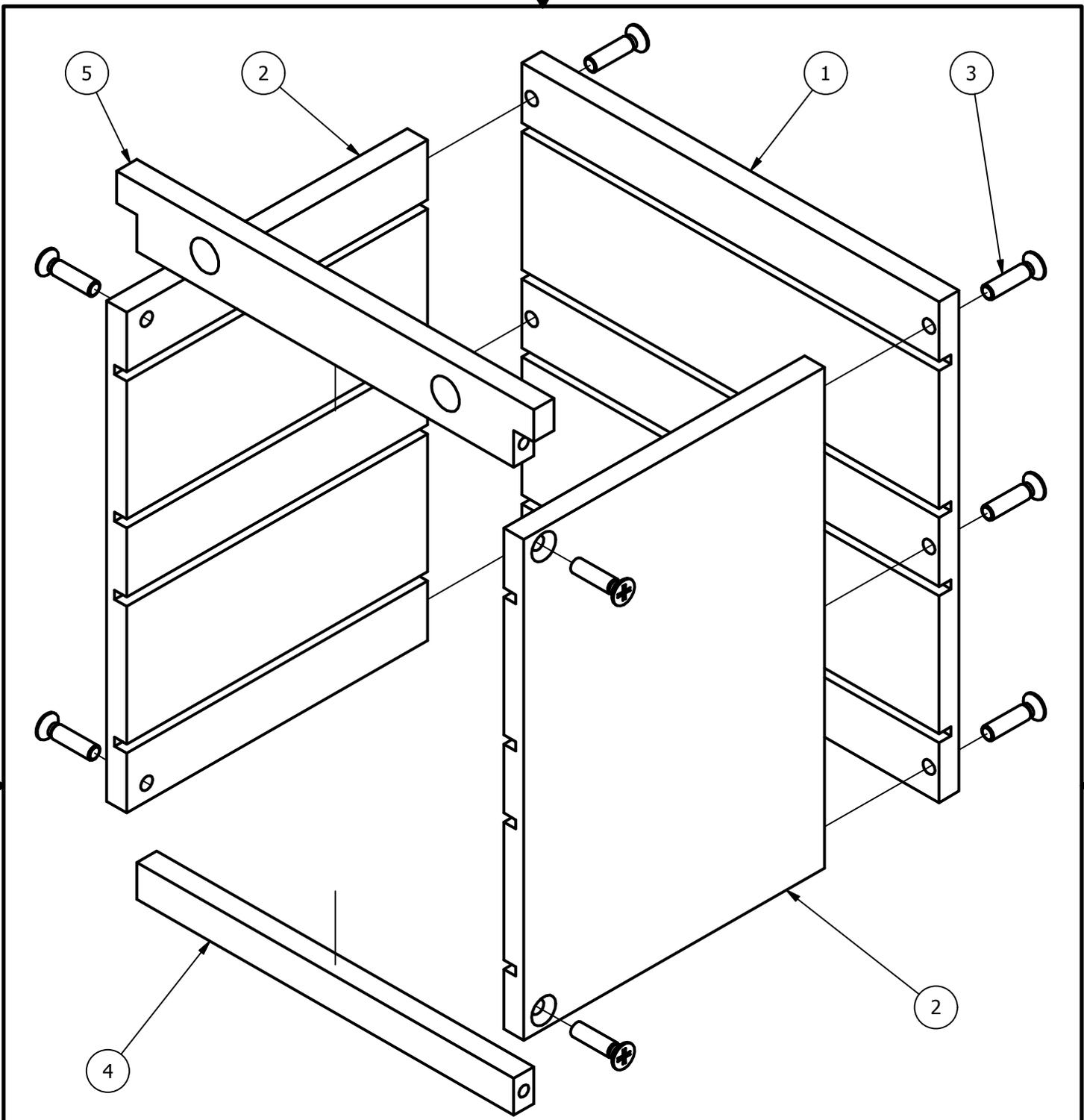
Fecha de creación:  
27/05/2019

Fecha de edición:  
27/05/2019

Fecha de aprobación:  
20/06/2019

6/8

Tipo documento: Plano de conjunto



Escala: 1:1



LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Pared trasera
2	2	Pared lateral
3	10	Tornillo AS 1427 - M3 x 12
4	1	Viga inferior
5	1	Viga superior

TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN  
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES  
Propietario legal:



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

Título plano: Bastidor desmontado

Título proyecto:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ESTIMULACIÓN  
ELECTROMAGNÉTICA PARA CULTIVOS CELULARES

Creado / Aprobado por: Marcos García Castelló

Hoja:

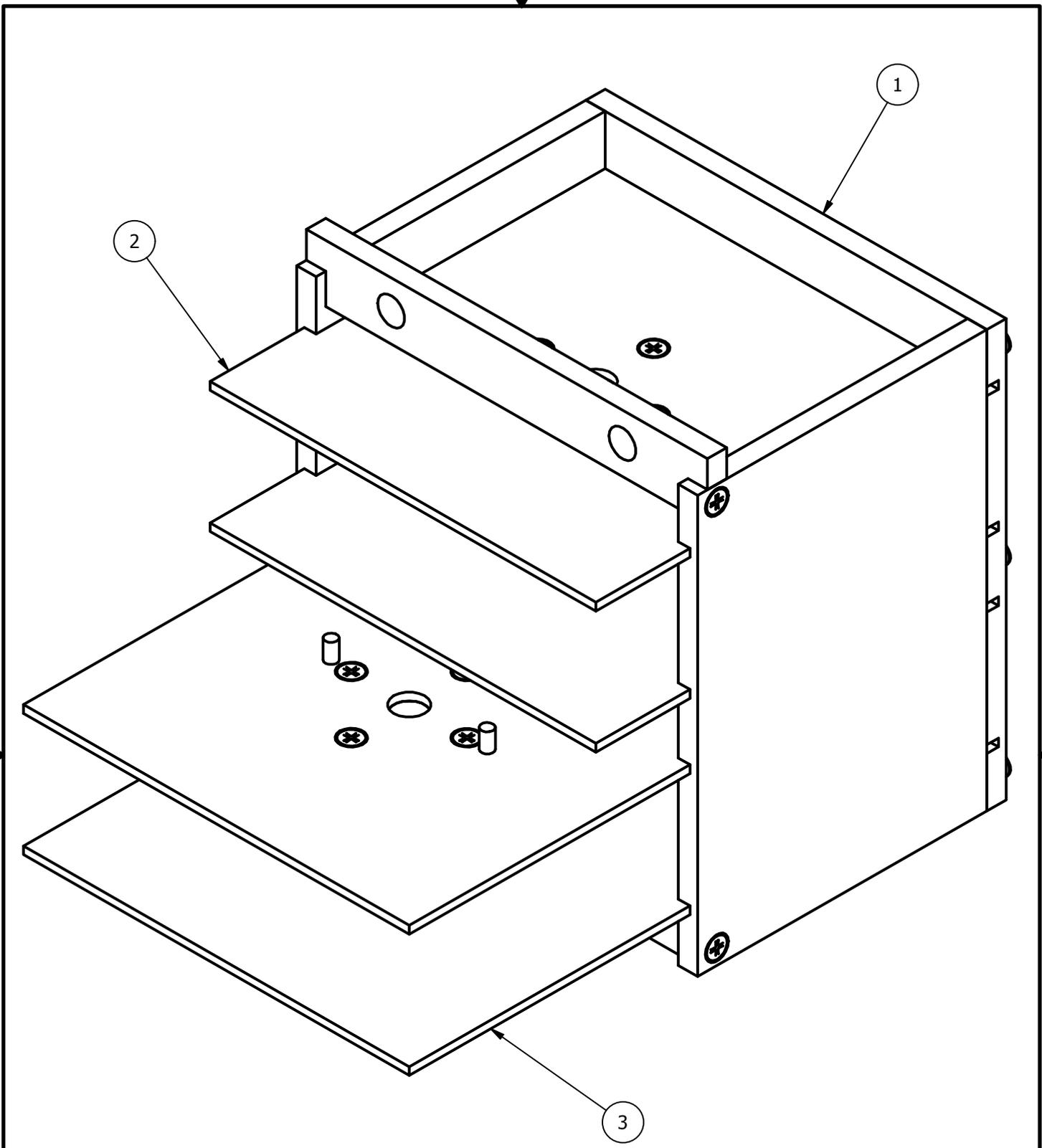
7/8

Tipo documento: Plano de conjunto

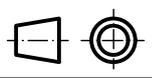
Fecha de creación:  
27/05/2019

Fecha de edición:  
27/05/2019

Fecha de aprobación:  
20/06/2019



Escala: 1:1



LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Bastidor
2	1	Bobina superior
3	1	Bobina inferior

TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN  
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES  
Propietario legal:

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS INDUSTRIALES VALENCIA

Título plano: Biorreactor desmontado

Título proyecto:  
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ESTIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA CULTIVOS CELULARES

Creado / Aprobado por: Marcos García Castelló

Hoja: 8/8

Fecha de creación: 27/05/2019	Fecha de edición: 27/05/2019	Fecha de aprobación: 20/06/2019
----------------------------------	---------------------------------	------------------------------------

Tipo documento: Plano de conjunto

## ANEJO A. CÁLCULOS DEL CAMPO MAGNÉTICO A PARTIR DE LA CORRIENTE A INDUCIR

### CÁLCULOS

En este anejo, se van a verificar los resultados obtenidos experimentalmente, con los obtenidos teóricamente a partir de las fórmulas presentadas en el apartado 2.3.

Para dicha comprobación, se supone una **espira** de **diámetro 3,2 cm**, con una resistencia de **20 Ω**. Asimismo, se va a crear el campo magnético primero a partir de **una única bobina**, y después, a partir de unas **bobinas Helmholtz**, de **longitud 3 cm** ( $L_{bobina}$ ), con un **diámetro interior** de **3,5 cm** y un **diámetro exterior** de **9,5 cm**. Dicha bobina consta de **1910 vueltas(N)** (**1 kg de cobre**).

Para averiguar la cantidad de vueltas, se ha hecho una aproximación sabiendo que en 100 g hay 39 m de hilo de cobre, dato aportado por el fabricante. Por lo tanto, a partir del perímetro de una circunferencia de radio 3,25 cm ( $R_{medio}$ ), y aproximando que en 1 kg de cobre hay 390 m de hilo de cobre, se obtienen **1910 vueltas**.

Como se lleva insistiendo a lo largo del proyecto, la intención es inducir **100 μA** en la espira. Para ello, se va a calcular la corriente necesaria, obtenida a partir de la red eléctrica española (**50 Hz**), para producir el campo magnético capaz de inducir la corriente deseada en la espira.

En primer lugar, se va a obtener dicho campo magnético a partir de la ley de Ohm y la ecuación (33):

$$I_{espira} \cdot R_{espira} = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot N_{espira} \cdot f \cdot \phi_{max}$$

$$\phi_{max} = \frac{I_{espira} \cdot R_{espira}}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot N_{espira} \cdot f} \quad (41)$$

$$\phi_{max} = \frac{100 \cdot 10^{-6} \cdot 20}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot 1 \cdot 50} = 9,0031 \cdot 10^{-6} \text{ Wb}$$

A partir del flujo, es posible obtener la inducción magnética necesaria, mediante la ecuación (28):

$$\phi_{max} = \int_{espira} \vec{B} d\vec{S} \approx B_{centro} S_{espira} \quad (42)$$

$$B_{centro} = \frac{\phi_{max}}{S_{espira}} = \frac{9,0031 \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot (1,6 \cdot 10^{-2})^2} = 0,011195 \text{ T} = 11,195 \text{ mT}$$

Ya es posible hacer una primera comprobación de resultados teóricos y experimentales.

$$B_{m\acute{a}x\_te\acute{o}rica} = 11,195 \text{ mT}$$

$$B_{m\acute{a}x\_experimental} = 10,1 \text{ mT}$$

Cálculos con un único solenoide

En segundo lugar, se va a averiguar qué fórmula se aproxima más al campo magnético para **una bobina**, con la corriente registrada en las pruebas eléctricas.

- Espira circular.
- Solenoide de varias capas.

Como radio de la bobina, se ha utilizado el radio medio de la bobina:

$$D_{medio} = \frac{D_{int} + D_{ext}}{2} = \frac{3,5 + 9,5}{2} = 6,5 \text{ cm} \quad (43)$$

En cuanto a la fórmula de la espira, ya fue presentada en el apartado 2.3.2. Entonces, la corriente necesaria para generar un campo magnético  $B_{teórica}$  en una espira circular, a una distancia  $d = 0$ , es:

$$B_{máx\_teórica} = \frac{\mu_0 \cdot I_{eficaz\_teórica} \cdot R_{medio}^2 \cdot N}{2 \cdot \sqrt{(R_{medio}^2 + d^2)^3}}$$

$$I_{eficaz\_teórica} = \frac{B_{máx\_teórica} \cdot 2 \cdot \sqrt{(R_{medio}^2 + d^2)^3}}{\mu_0 \cdot R_{medio}^2 \cdot N} \quad (44)$$

$$I_{eficaz\_teórica} = \frac{11,195 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot \sqrt{[(3,25 \cdot 10^{-2})^2 + 0^2]^3}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot (3,25 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 1910} = 0,30314 \text{ A}$$

Es turno de averiguar la corriente que ha de fluir por el solenoide. Pero antes, se va a comprobar que es posible hacer una aproximación para facilitar los cálculos. Como se dedujo en el apartado 2.3.4, la bobina está compuesta por varias capas de hilo de cobre, por ello se formuló la ecuación (19). Ahora, se va a verificar que es posible aproximar dicha fórmula, al radio medio de la bobina.

Siendo la distancia  $d = 0$ , una intensidad,  $I = 1 \text{ A}$ , con  $N = 2000$ , una longitud de bobina,  $L = 4 \text{ cm}$  y radios interiores y exteriores,  $R_{int} = 1,5 \text{ cm}$ ,  $R_{ext} = 3 \text{ cm}$  respectivamente:

$$B_{varias\_capas} = \frac{\mu_0 NI}{2L(R_{ext} - R_{int})} \left( (L + d) \ln \frac{R_{ext} + \sqrt{R_{ext}^2 + (L + d)^2}}{R_{int} + \sqrt{R_{int}^2 + (L + d)^2}} - d \ln \frac{R_{ext} + \sqrt{R_{ext}^2 + d^2}}{R_{int} + \sqrt{R_{int}^2 + d^2}} \right) = 41,0195 \text{ mT} \quad (45)$$

En cambio, utilizando el radio medio,  $R_{medio} = 2,25 \text{ cm}$ , con la fórmula (15), obtenemos:

$$B_{una\_capa} = \frac{\mu_0 NI}{2L} (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) = 41,0720 \text{ mT} \quad (46)$$

Por tanto, una vez se ha comprobado la aproximación anterior, es posible averiguar la corriente que fluye a través del solenoide con la fórmula (15) y utilizando el radio medio, pero esta vez,  $R_{medio} = 3,25 \text{ cm}$ , siendo la distancia,  $d = 0$ .

$$B_{m\acute{a}x\_te\acute{o}rica} = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I_{eficaz\_te\acute{o}rica}}{2 \cdot L_{bobina}} \cdot (\cos \theta_2 - \cos \theta_1)$$

$$I_{eficaz\_te\acute{o}rica} = \frac{2 \cdot L_{bobina} \cdot B_{m\acute{a}x\_te\acute{o}rica}}{\mu_0 \cdot N \cdot (\cos \theta_2 - \cos \theta_1)} \quad (47)$$

$$I_{eficaz\_te\acute{o}rica} = \frac{2 \cdot (3 \cdot 10^{-2}) \cdot 11,195 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1910 \cdot (0,678 - 0)} = 0,413 \text{ A}$$

Cabe recordar que el multímetro siempre mide corrientes y tensiones en valor eficaz. Entonces los resultados obtenidos y comparados con el experimental son:

$$I_{espira} = 0,303 \text{ A} \qquad I_{solenoides} = 0,413 \text{ A} \qquad I_{experimental} = 0,462 \text{ A}$$

Por consiguiente, el valor de intensidad más aproximado al valor real es el obtenido con el solenoide. Por lo que, para futuras aproximaciones o proyectos similares, se hará uso de la fórmula del solenoide antes que la de la espira. En cuanto a la diferencia que existe puede deberse a errores humanos, como, por ejemplo, la existencia de vacíos con aire durante la construcción de la bobina.

En tercer y último lugar, se va a obtener el coeficiente de autoinducción para averiguar la resistencia de la bobina, y obtener el voltaje que es necesario aplicarle para obtener la inducción magnética necesaria.

En corriente alterna, la impedancia se divide en parte real y parte imaginaria, tal y como se muestra en la Fig 45

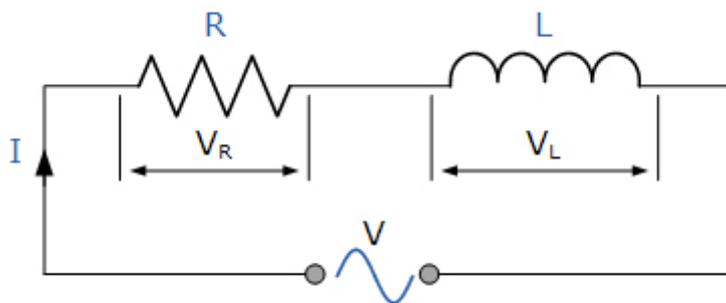


Fig 45. Resistencia serie-inductancia del circuito. Fuente: <http://tutorialesdeelectronica basica.blogspot.com>

La parte real es como la resistencia interna del propio devanado, la resistencia del hilo de cobre esmaltado. La resistencia es la oposición a la corriente. Para calcularla, haremos uso de la Tabla 8 y de la cantidad aproximada de cobre, 390 m.

*Tabla 8. Resistencia eléctrica de hilos de cobre esmaltados. Fuente: www.bnoack.com*

Diámetro [mm]	Nominal [ $\Omega/m$ ]
0,5	0,0838
0,6	0,0582
0,8	0,0328
1,0	0,0210

$$R_{solenoides} \cong 390 \cdot 0,0582 = 22,698 \Omega \quad (48)$$

En cuanto a la parte imaginaria, es conocida como impedancia. A la oposición a la corriente alterna se le denomina impedancia, y es proporcional a la frecuencia aplicada. En este caso, como la longitud del devanado no es mucho más grande que el radio, no es posible aplicar la aproximación de la ecuación (35), pues esta, está aplicada para cuando el solenoide es más largo que el radio. Por esta razón, utilizaremos la definición de la inductancia, ecuación (35):

$$L_{solenoides} = \frac{\phi_{max} \cdot N}{I_{solenoides}} = \frac{B_{m\acute{a}x\_te\acute{o}rica} \cdot S_{solenoides} \cdot N}{I_{solenoides}} = \frac{11,195 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot (3,25 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 1910}{0,413} = 171,8 \text{ mH} \quad (49)$$

Entonces, la impedancia queda:

$$X_{solenoides} = \omega \cdot L_{solenoides} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,1718 = 53,972 \Omega \quad (50)$$

Es turno de combinar ambas, y obtener la reactancia:

$$Z_{solenoides} = R_{solenoides} + jX_{solenoides} = 22,698 + 53,972j \Omega \quad (51)$$

Siendo su módulo:

$$|Z_{solenoides}| = \sqrt{R_{solenoides}^2 + X_{solenoides}^2} = 58,55 \Omega \quad (52)$$

Cabe recordar que un multímetro, como el utilizado en las pruebas eléctricas, mide la resistencia, no la impedancia. Por lo cual, cuando se mide la resistencia del devanado con el multímetro, se está midiendo la parte real:

$$R_{te\acute{o}rica} = 23,19 \Omega \quad R_{solenoides} = 22,698 \Omega$$

Por lo tanto, el voltaje eficaz,  $V_{eficaz}$ , que hay que aplicar al devanado se puede aproximar usando la ley de Ohm:

$$V_{eficaz} = |Z_{solenoides}| \cdot I_{solenoides} = 58,55 \cdot 0,413 = 24,18 \text{ V} \quad (53)$$

Asimismo, es posible calcular el voltaje eficaz, mediante el módulo del voltaje aplicado a la parte real del solenoide,  $V_R$ , y el voltaje aplicado a la parte imaginaria del solenoide,  $V_L$ , siendo el voltaje eficaz,  $V$ , todo representado en la Fig 46.

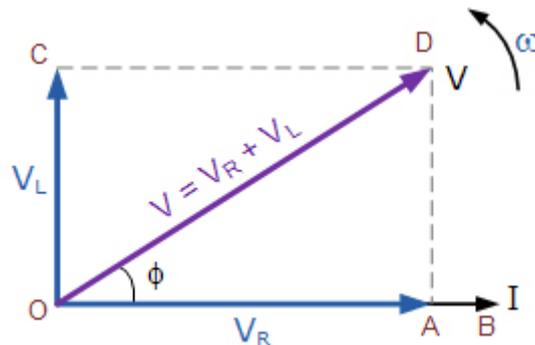


Fig 46. Diagrama vectorial de la tensión resultante. Fuente: <http://tutorialesdeelectronica basica.blogspot.com>

Finalmente, la tensión que hay que aplicar, coincide con la tensión experimental. Dando los cálculos como correctos.

$$V_{eficaz\_teórica} = 24,18 \text{ V}$$

$$V_{experimental} = 25 \text{ V}$$

#### Cálculos con bobinas Helmholtz

Ahora se han repetido los mismos cálculos, que por similitud serán más simplificados, pero ahora empleando las **bobinas de Helmholtz**, para observar cómo se asemeja la teoría de la parte experimental:

El campo magnético necesario será el mismo que el calculado anteriormente en las ecuaciones (41) y (42):

$$B_{máx\_teórica} = 11,195 \text{ mT}$$

$$B_{máx\_experimental} = 10,9 \text{ mT}$$

A partir de la ecuación (24) es posible obtener la corriente que atraviesa a cada una de las bobinas, siendo  $a$  la separación entre bobinas ( $a = 1,5 \text{ cm}$ ) y la  $R$ , el radio medio de la bobina, obtenido de dividir el diámetro medio de la ecuación (43):

$$B_{máx\_teórica} = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I_{eficaz\_teórica}}{2 \cdot L_{bobina}} \left( \frac{L_{bobina}}{\sqrt{R^2 + L_{bobina}^2}} + \frac{L_{bobina} + a}{\sqrt{R^2 + (L_{bobina} + a)^2}} - \frac{a}{\sqrt{R^2 + a^2}} \right) \quad (54)$$

Despejando la  $I_{eficaz\_teórica}$  y sustituyendo los demás valores se obtiene:

$$I_{solenoides} = 0,261 \text{ A}$$

$$I_{experimental} = 0,318 \text{ A}$$

En este caso, no se obtiene un valor de corriente tan cercano al experimental, como en el de un único solenoide. Pero este error puede deberse a emplear ecuaciones simplificadas, las cuales tampoco obtienen valores completamente exactos.

En cuanto a la resistencia de la bobina, la parte real es la misma:

$$R_{solenoides} \cong 390 \cdot 0,0582 = 22,698 \Omega \quad (55)$$

Mientras que la inductancia, empleando la ecuación (35), en una de las bobinas Helmholtz queda:

$$\begin{aligned} L_{solenoides} &= \frac{\phi_{max} \cdot N}{I_{solenoides}} = \frac{B_{m\acute{a}x\_te\acute{o}rica} \cdot S_{solenoides} \cdot N}{I_{solenoides}} = \\ &= \frac{7,081 \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot (3,25 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 1910}{0,261} = 171,95 \text{ mH} \end{aligned} \quad (56)$$

Pero en este caso, la  $B_{m\acute{a}x\_te\acute{o}rica}$  no es 11,195 mT, como en la ecuación (49), sino 7,081 mT, que es el campo obtenido por una bobina con las mismas características físicas en  $d = 0$ , pero atravesada por una corriente igual a  $I_{solenoides} = 0,261 \text{ A}$ . Pese a emplear distintos valores, se obtienen resultados similares. Esto se debe a que la inductancia depende únicamente del medio y de las características geométricas de la bobina.

Entonces, la impedancia queda:

$$X_{solenoides} = \omega \cdot L_{solenoides} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,1719 = 54,004 \Omega \quad (57)$$

Es turno de combinar ambas, y obtener la reactancia:

$$Z_{solenoides} = R_{solenoides} + jX_{solenoides} = 22,698 + 54,004j \Omega \quad (58)$$

Siendo su módulo:

$$|Z_{solenoides}| = \sqrt{R_{solenoides}^2 + X_{solenoides}^2} = 58,58 \Omega \quad (59)$$

Por lo tanto, el voltaje eficaz,  $V_{eficaz}$ , que hay que aplicar a ambas bobinas se puede aproximar usando la ley de Ohm:

$$V_{eficaz} = |Z_{solenoides}| \cdot I_{solenoides} = 58,58 \cdot 0,261 = 15,29 \text{ V} \quad (60)$$

Finalmente, la tensión que hay teórica, se aleja 3 V de la tensión experimental. Dando una posible aproximación para futuros cálculos.

$$V_{eficaz\_te\acute{o}rica} = 15,29 \text{ V} \qquad V_{experimental} = 18 \text{ V}$$

#### Cálculos de la uniformidad del campo magnético

Ahora se va a demostrar que la inducción magnética  $B$  es uniforme en el interior de dos solenoides. Para ello, se ha realizado un ejemplo numérico utilizando los siguientes datos y la ecuación (23):

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ESTIMULACIÓN ELECTROMAGNÉTICA PARA CULTIVOS CELULARES

- Radio interior de la bobina: 1,75 cm.
- Radio exterior de la bobina: 4,75 cm.
- Longitud de la bobina: 3 cm.
- Número de espiras: 1910 vueltas.
- Corriente por las bobinas: 0,3185 A.

Cabe recordar que la ecuación (23), la distancia  $d$ , comienza en el extremo de una bobina cualquiera. Pero en este caso, se ha calculado diferentes distancias y han sido ordenados los resultados, de forma que el punto central del eje que une ambas bobinas,  $O$ , sea el centro del eje de coordenadas, siendo  $z$ , la distancia del punto central  $O$  al punto donde se va a calcular la inducción magnética, tal y como se muestra en la Fig 47.

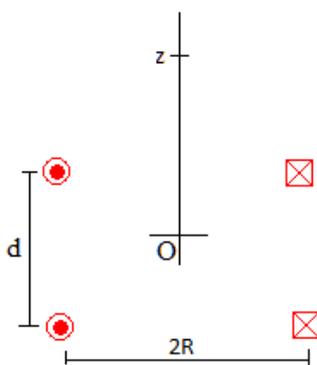


Fig 47. Punto central de las bobinas de Helmholtz en el eje  $z$ . Fuente: Pág web: <http://www.sc.ehu.es>, Autor: Ángel Franco García

Como se puede observar en la Fig 48, la inducción magnética es completamente uniforme en la longitud que separa ambas bobinas.

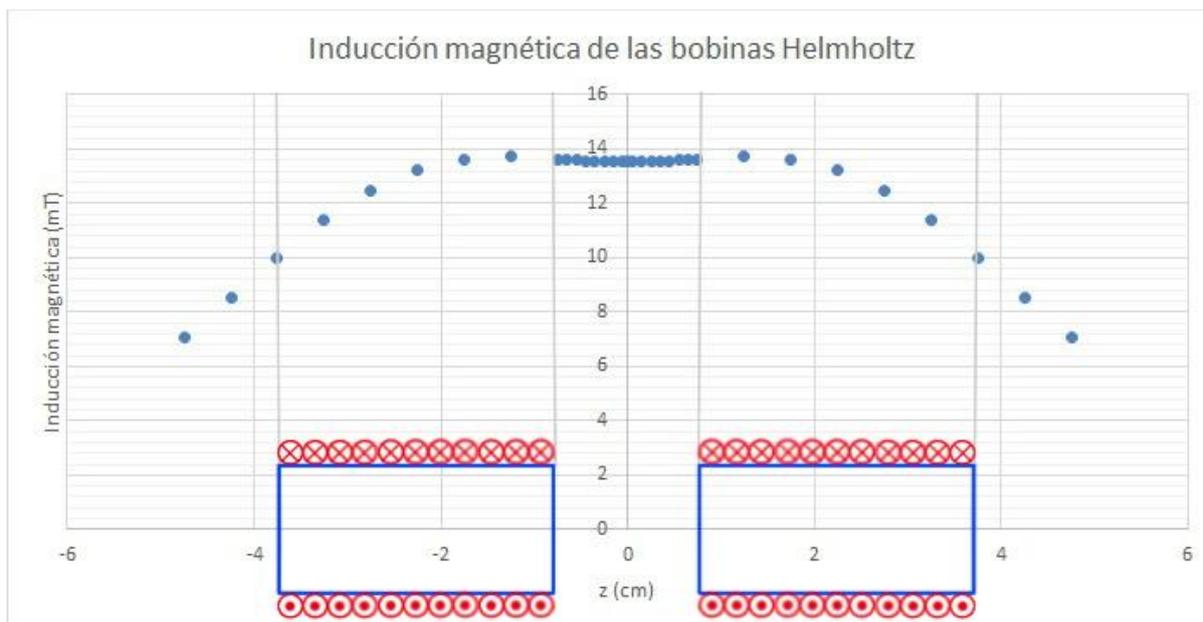


Fig 48. Inducción magnética de las bobinas Helmholtz a lo largo del eje  $z$ . Fuente: Propia

## ANEJO B. CÁLCULOS DEL EFECTO JOULE EN LAS BOBINAS

### CÁLCULOS

Se ha centrado este Anejo en averiguar una aproximación del efecto Joule en las bobinas del biorreactor, obteniendo la variación de temperatura en función de la intensidad  $I_{solenoides}$  y el periodo de tiempo de funcionamiento  $\Delta t$ .

Como ya se explicó, se va a establecer la igualdad entre la variación de energía interna  $\Delta U$  y la energía calorífica  $E$ :

$$\begin{aligned} E &= \Delta U \\ R \cdot I^2 \cdot \Delta t &= m \cdot c_v \cdot \Delta T \end{aligned} \quad (61)$$

Siendo:

- Resistencia de la bobina,  $R = 23,19 \Omega$
- Calor específico a volumen constante (supondremos el calor específico del aire, sabiendo que se trabaja en una zona con humedad y más temperatura)  $c_v = c_{25^\circ C} = 1,012 \frac{kJ}{kg K}$

En cuanto a la densidad del aire, se ha utilizado la versión simplificada de la fórmula CIPM-2007, versión exponencial (Manuel et al., 2010) que es función de la presión barométrica, humedad relativa y temperatura:

$$\rho_{aire} = \frac{0,34848 \cdot p - 0,009 \cdot h_r \cdot e^{0,061 \cdot T}}{273,15 + T} \quad (62)$$

Donde,

- Densidad del aire,  $\rho_{aire}$ , en  $\frac{kg}{m^3}$
- Presión barométrica,  $p = 1 atm = 101325 Pa = 1013,25 hPa$ , en  $hPa$
- Humedad relativa,  $h_r = 95\%$ , en % (Valor obtenido de las especificaciones técnicas de la incubadora)
- Temperatura,  $T = 37^\circ C$ , en  $^\circ C$  (Valor obtenido de las especificaciones técnicas de la incubadora y temperatura fisiológica)

De modo que se obtiene:

$$\rho_{aire} = \frac{0,34848 \cdot 1013,25 - 0,009 \cdot 95 \cdot e^{0,061 \cdot 37}}{273,15 + 37} = 1,1121 \frac{kg}{m^3} \quad (63)$$

De este modo se obtiene la masa de aire en el interior de la incubadora, sabiendo que el volumen de la incubadora es 50.8 x 54.1 x 68.1 cm, obteniendo  $V_{aire} = 0,18715 m^3$ , entonces la masa de aire es:

$$\rho_{aire} = \frac{m_{aire}}{V_{aire}} \quad (64)$$
$$m_{aire} = 0,18715 \cdot 1,1121 = 0,20814 \text{ kg}$$

Sustituyendo en la ecuación (61), queda:

$$\Delta T = \frac{R \cdot I^2 \cdot \Delta t}{m_{aire} \cdot c_v} = \frac{23,19}{0,20814 \cdot 1,012 \cdot 1000} \cdot I^2 \cdot \Delta t \quad (65)$$