



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Grado

Control de una bobina de magnetoterapia con  
Arduino.

Grado en Ingeniería eléctrica

Autor:

Diego Agustí Muñoz

Director y codirector:

Antonio Pardina Carrera y Juan Antonio Tejero Gómez

Memoria

Tomo 1/2



Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura  
**Universidad** Zaragoza

## Índice

Resumen .....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1 Motivación.....	3
1.2 Magnetoterapia, concepto y estado actual. ....	3
1.3 Objetivos .....	6
1.4 Enfoque y fases del proyecto .....	6
2. ANÁLISIS.....	8
2.1 Directrices de diseño.....	8
2.2 Recursos.....	9
3. DISEÑO.....	10
3.1 Diseño electromagnético de la bobina, modelado de una bobina en “MATLAB”..	10
3.2 Diseño electrónico, para el control y alimentación de la bobina.....	15
3.2.1 Fuente de alimentación doble .....	15
3.2.2 Control de la bobina de magnetoterapia.....	17
3.3 Diseño mecánico del conjunto.....	21
4. DESARROLLO.....	24
4.1 Fabricación y montaje de la electrónica de control y alimentación.....	24
4.2 Desarrollo del software de control.....	25
4.3 Fabricación y montaje del equipo.....	28
5. EVALUACION Y RESULTADOS .....	30
5.1 Comparación de resultados teóricos y reales.....	30
5.2 Conclusiones.....	37

# Control de una bobina de magnetoterapia con Arduino.

---

## Resumen

En este proyecto se va a diseñar y fabricar un prototipo de bobina de magnetoterapia. Abarcando todas las fases del diseño: cálculo de la bobina, diseño mecánico de la bobina, diseño electrónico del control de la misma, así como la fabricación del prototipo.

En cuanto al diseño de la bobina, se ha partido de trabajos previos en el campo de la magnetoterapia a través de campos magnéticos pulsantes, en los cuales, Antonio Pardina, codirector del proyecto, tiene una amplia experiencia<sup>1</sup>.

La singularidad de este proyecto es que, aplicando las nuevas tecnologías que van apareciendo, permite diseñar en todos sus aspectos, un producto a medida según los requerimientos deseados, tanto de tamaño como de potencia.

Para ello, se ha trabajado en la parametrización de la bobina en "MATLAB", de forma que se puede calcular cualquier bobina, ajustando los parámetros según las necesidades.

Una vez calculada, se ha procedido al diseño mecánico de la misma, usando el software de diseño en 3D, "SolidWorks", la impresión en 3D del prototipo y su montaje.

Además, en este caso, para el control de la bobina, se ha optado por la plataforma Arduino, de sobra conocida en el ámbito tecnológico que, por sus muchas cualidades, nos ofrece todo lo necesario para la realización del proyecto.

Por último, podremos comprobar la gran importancia de todas las áreas de conocimiento y disciplinas necesarias, como son la electricidad y el magnetismo, electrometría, electrónica, informática, programación de microcontroladores e incluso el diseño asistido por ordenador y la impresión en 3D.

---

<sup>1</sup> Ha realizado diversos estudios en el campo de la magnetoterapia, así como la construcción de bobinas de magnetoterapia de diferentes características.

# 1. INTRODUCCIÓN.

## 1.1 Motivación.

La idea del proyecto es sugerida por uno de los directores, en este caso Antonio Pardina, quien me comentó la posibilidad de, aprovechando las nuevas tecnologías que van llegando, darle un nuevo enfoque a un trabajo y estudio anteriores, también basado en el ámbito de la magnetoterapia. Así pues, decidí que sería interesante embarcarme en este proyecto ya que me daría la posibilidad de profundizar en ciertos conocimientos y herramientas en las cuales no tenía tanta experiencia.

Qué duda cabe que otra de las motivaciones era la de llevar dicho proyecto a la realidad, mediante la fabricación de un prototipo totalmente funcional. Algo que es muy gratificante al comprobar que lo que has diseñado, se comporta tal y como esperabas.

## 1.2 Magnetoterapia, concepto y estado actual.

Se denomina magnetoterapia o Terapia de campos Magnéticos Pulsantes (C.M.P.) al tratamiento mediante campos magnéticos, es decir; es un proceso que utiliza la aplicación de energía magnética al organismo para el tratamiento de distintas enfermedades.

Los Campos Magnéticos Pulsantes de bajas frecuencias están diseñados para ayudar al cuerpo a regenerar sus células y ayudar a acelerar el proceso normal de recuperación. Esta es una modalidad segura de usar, no provoca dolor y no precisa de medicamentos; diseñada para trabajar tanto en problemas en tejidos blandos como en condiciones de huesos dañados. En resumen, la terapia de Campos Magnéticos Pulsantes es una forma relativamente nueva y muy efectiva de terapia física.

El presente proyecto según su aplicación práctica, está encaminado a la terapia sanitaria y pertenece a una ciencia multidisciplinar denominada bioelectromagnetismo; siendo la magnetoterapia en consecuencia, una rama de éste.

El bioelectromagnetismo (a veces denominado parcialmente como bioelectricidad o biomagnetismo) es una nueva ciencia, comprendida dentro de las ciencias biológicas, con grandes aplicaciones en medicina y otras ciencias que contemplan la salud pública y el medio ambiente. Es una ciencia multidisciplinar, la cual, tiene por objeto el estudio de los campos electromagnéticos generados por los seres vivos en sus diversas manifestaciones vitales y sus interacciones con los campos electromagnéticos ambientales, tanto los naturales como los artificiales que provocan la llamada contaminación electromagnética, de interés social y sanitario creciente.

Los resultados teóricos y experimentales obtenidos en la investigación del efecto de los campos sobre el ser vivo; hacen numerosos los motivos para el uso de la

magnetoterapia. Por tanto, las evidencias observadas, hacen que el “equipo de magnetoterapia con control de pulsos” diseñado y analizado en el presente proyecto posea un alto grado de utilidad, siendo los efectos del campo magnético generado por dicho equipo; los siguientes:

- Magníficos resultados en todos los terrenos donde se ha investigado<sup>2</sup>.
- Ínfimos efectos secundarios si se sabe aplicar correctamente.
- Bajo coste de aplicación.
- El envejecimiento de la población lleva a la necesidad del tratamiento de muchas enfermedades degenerativas que la medicina oficial no sabe curar.
- Permite una reducción drástica del consumo de fármacos e intervenciones quirúrgicas con el consiguiente ahorro económico y en salud de la población.
- El coste del equipo de magnetoterapia es mínimo<sup>3</sup>, pudiendo desplazar el tratamiento desde el hospital al ambulatorio o incluso, a nuestra propia vivienda dada su portabilidad.

Las indicaciones generales de la magnetoterapia son múltiples, englobándose efectos analgésicos, antiinflamatorios, anticontracturantes, relajación generaliza. Estos efectos se usan en procesos reumáticos, trastornos de la osificación (osteoporosis), patologías vasculares, cirugía, neurología, trastornos derivados del estrés, etc. entre otros muchos.

Debido a todo esto, cada vez más deportistas de elite<sup>4</sup> hacen uso de este tipo de terapia para la recuperación de lesiones, así como a modo preventivo para evitar futuras lesiones., ya que entre sus beneficios también están fortalecer el sistema inmune, reforzar masa ósea, masa muscular y aumentar el transporte de oxígeno en la sangre.

Apenas tiene contraindicaciones, pero sí que hay en ciertas situaciones en las que no se recomienda su utilización, por ejemplo, en el embarazo, si el paciente usa marcapasos o si se tienen pérdidas de sangre o se está menstruando, por la activación de células en este caso agravaría la situación.

### **Características de los campos magnéticos empleados en terapia.**

Los campos magnéticos se crean mediante el paso de una intensidad eléctrica a través de una bobina o solenoide. De forma que controlando la intensidad eléctrica que pasa por el solenoide podemos establecer las características del campo magnético que se genera, ya que el campo magnético creado es proporcional a la intensidad.

---

<sup>2</sup> En el **Anexo I.a** se pueden encontrar referencias bibliográficas al respecto.

<sup>3</sup> El coste total de este prototipo está en torno a unos 200€.

<sup>4</sup> En el **Anexo I.c** se puede encontrar una web donde se habla del uso de magnetoterapia por parte de Rafael Nadal.

La intensidad del campo magnético que se usa en terapia es muy baja. No se suele exceder de 350 Gauss, aunque la cifra de 100 Gauss es más usual, el equipo diseñado será capaz de generar un campo de 90 Gauss en el interior del solenoide, pudiendo disminuir su valor hasta hacerlo desaparecer, controlando la intensidad que pasa por la bobina. Recuérdese que el Tesla = 10.000 Gauss y que el campo magnético terrestre es del orden de 0.5-1 Gauss.

Los campos magnéticos empleados son pulsantes, esto es: se repiten a intervalos iguales. El periodo es el tiempo que tardan en repetirse los impulsos y la frecuencia es el inverso del periodo. Cuando el periodo se mide en segundos, la frecuencia se mide en Hertzios (Hz). Mientras que en la electromagnetoterapia se emplean frecuencias elevada, desde los MHz hasta los GHz, en magnetoterapia se utilizan bajas frecuencias, de 10 a 1000 Hz. La corriente inducida por la ley de Faraday depende de la rapidez de la variación del campo magnético, y por tanto de la frecuencia. De esta forma en la electromagnetoterapia se producirán corrientes inducidas lo suficientemente altas como para inducir un calentamiento por efecto Joule.

En la magnetoterapia y debido a la baja frecuencia que se emplea no se producirán corrientes inducidas importantes. Con lo que, en principio, la magnetoterapia será un tratamiento atómico.

La polaridad del campo magnético puede ser norte o sur, dependiendo del signo de la corriente eléctrica que atraviere el solenoide. Esta polaridad puede por tanto controlarse por el magnetoterapeuta. La forma de la onda admite un grado de variación, así se pueden usar ondas senoidales, semisenoidales, cuadradas, cuadradas trapezoidales, triangulares etc. En este proyecto la forma de onda que se va a emplear es una onda senoidal a una frecuencia de 50 Hz.

Resumiendo, la magnetoterapia es una terapia segura, ofrece un tipo de tratamiento muy poco invasivo que no tiene efectos secundarios, con unos resultados muy buenos para cierto tipo de dolencias, como la artrosis o la osteoporosis, otro ámbito en el que ofrece buenos resultados es en la ayuda a la regeneración ósea después de una fractura o fisura.

En el **Anexo I.a** se puede encontrar el artículo “Efectos y aplicaciones de la magnetoterapia” el cual profundiza mas tanto en los efectos beneficiosos como los métodos de aplicación de este tipo de terapia.

### 1.3 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es la fabricación de un prototipo funcional, de un equipo de magnetoterapia.

Dicho equipo, formado por una bobina, la cual ha de ser capaz de generar un campo magnético de al menos 90 Gauss y la alimentación y control de la misma, los cuales están compuestos respectivamente por una electrónica de potencia y una placa “Arduino Nano” para el control.

Otro de los objetivos es profundizar en algunas áreas de conocimiento, así como nuevas tecnologías en las que se sustenta este proyecto, como el electromagnetismo, la electrónica, programación de microcontroladores, el diseño en 3D y la impresión en 3D.

### 1.4 Enfoque y fases del proyecto

El enfoque que se ha pretendido dar al proyecto ha sido muy concreto desde el inicio, hacer algo real, no quedarnos solo en lo teórico, y a su vez comprobar que realmente funciona.

Para ello, se han seguido una serie de fases determinadas, cuyo resumen sigue a continuación.

**Fase 1 – Análisis.** En esta fase se analizarán las necesidades que se pretenden cubrir con la fabricación de este prototipo. Además, se han de analizar, evaluar y valorar los equipos de características similares que previamente se han diseñado y adaptar la solución técnica que mejor se ajuste tanto del punto de vista técnico y funcional (diseño del equipo, seguridad, materiales, presupuesto, acabados, etc.), como desde el punto de vista del manejo del dispositivo por parte del usuario (facilidad de aprendizaje y uso).

También se han de estudiar en este punto, una vez hecho el análisis previo, los recursos tanto técnicos como económicos con que se cuenta, para tomar las decisiones oportunas acerca de en qué dirección se ha de dirigir el proyecto.

Por último, hay que afrontar el crucial momento de la toma de decisiones a todos los niveles, desde la fase de diseño hasta la fase de desarrollo y evaluación de resultados. Definiendo cada una de las fases que se deberán completar, para la correcta ejecución del proyecto. Con toda la información recopilada, es importante reflexionar y tratar de hacer las cosas de la forma más eficiente posible de cara a no tener que hacer las cosas varias veces.

**Fase 2 – Diseño.** Una vez hecho el análisis y definido las fases del proyecto, se ha de comenzar con el diseño propiamente dicho del dispositivo. En este proyecto se ha partido de un boceto o idea muy a groso modo, de lo que se quería conseguir y a partir de ahí se han definido las tres fases de diseño de las que se compone este proyecto.

1. Diseño electromagnético de la bobina, modelado de una bobina en “MATLAB”.
2. Diseño electrónico, para el control y alimentación de la bobina.
3. Diseño mecánico del conjunto.

**Fase 3 – Desarrollo.** Con la fase de diseño finalizada, llegamos a la parte de desarrollo del prototipo, o lo que es lo mismo convertirlo en algo real y funcional. Para ello es necesario hacer el acopio de materiales necesarios, así como planificar las fases de fabricación del mismo. En esta fase también entra la parte de programación del “Arduino”, ya que es clave para hacerlo funcional. Así pues, también podrían diferenciarse tres fases:

1. Fabricación y montaje de las placas electrónicas.
2. Fabricación y montaje de la bobina, tanto impresión 3D, como bobinado de la misma.
3. Desarrollo del software de control.

**Fase 4 – Evaluación y resultados.** Es el momento para confirmar el correcto funcionamiento de todas las hipótesis en todo proyecto. Huelga decir que todas las fases son importantes, lógicamente, pero ésta en verdad lo es, ya que nos va a dar los resultados de nuestro trabajo. Algo tan simple de decir tiene infinidad de implicaciones: principalmente comprobaremos si los requerimientos impuestos al inicio han sido cubiertos, que es la parte fundamental; veremos si los recursos empleados han tenido un aprovechamiento adecuado y por último comprobaremos si los conocimientos que se poseen son (o han sido suficientes) para completar el objetivo marcado.

Obviamente, durante el desarrollo habremos hecho las pruebas que hayamos considerado necesarias, pero, y vuelvo a decir, esto no es garantía de quedar a salvo de errores. Por ello, una vez completado el proceso de desarrollo, se ha de hacer una concienzuda prueba final para poder dar por concluido el proyecto, y dejar “en servicio” el dispositivo en manos del usuario para que pueda usarlo a partir de ese momento.

Una vez hecha la evaluación final, se han de recopilar e interpretar los resultados obtenidos, para comprobar si han sido satisfactorios o no. En caso afirmativo, los adjuntaremos al proyecto junto con nuestras conclusiones, y lo daremos por finalizado. Y en el caso contrario, tendremos que comprobar dónde nos hemos equivocado para estudiar la forma de realizar las modificaciones necesarias.

## 2. ANÁLISIS.

Una vez estudiada en qué situación se encuentra la tecnología referente a este campo, se va a proceder a definir las directrices de diseño que vamos a imponer, así como el ámbito de aplicación de nuestro prototipo.

Si bien una de las premisas de este proyecto era la posibilidad de fabricar a medida una bobina cualquiera, en este caso particular, tenemos la limitación que nos ofrece los recursos de los que dispone el proyectando, ya que la impresora 3D de la que se dispone tiene unas dimensiones a las cuales nos tenemos que ajustar, a pesar de estas limitaciones, se ha diseñado una bobina de dimensiones estándar para el tratamiento de articulaciones. Dicho esto, se podría imprimir una más grande en un centro de impresión.

### 2.1 Directrices de diseño.

A continuación, se exponen las directrices que se han de cumplir a la hora de realizar el diseño y desarrollo del equipo de magnetoterapia:

- En primer lugar, decir que se trata de un prototipo funcional, con un fin educativo. Sin intención de comercializarse.
- El dispositivo tiene que ser capaz de generar un campo pulsante de baja frecuencia de 90 Gauss.
- El dispositivo está diseñado para poder tratar las extremidades, de forma que su tamaño tiene que ser el adecuado para poder introducir las, sin olvidar lo anteriormente mencionado.
- Ha de contener en una sola carcasa toda la circuitería, fuente de alimentación, señalización, conectores y cableado necesarios, de modo que se minimice el número de elementos del dispositivo. Así facilitamos la instalación, y el uso por personas sin conocimientos técnicos.
- El consumo no puede ser alto para que la fuente de alimentación portátil pueda proporcionarlo.
- Otra limitación que nos encontramos es la densidad de potencia por unidad de superficie cuyo valor ensayado se limita a  $0.045\text{W/cm}^2$  para evitar el calentamiento en la superficie de la bobina por efecto Joule.
- Ha de ser un equipo seguro, para el usuario.

- El control del mismo se realizará mediante la plataforma de hardware libre Arduino, más concretamente la placa, “Arduino Nano”.
- El dispositivo contará con tres modos de funcionamiento, “Modo manual”, “Modo Automático” y “Modo Máxima Potencia”.
- La bobina se fabricará mediante una impresora 3D, usando como material ABS<sup>5</sup>.

Como ya se ha indicado, no se pretende un producto comercial, pero en caso de que ese fuese el objetivo de este proyecto, los equipos de magnetoterapia cuando se indican para el tratamiento de enfermedades o lesiones, tienen la consideración legal de producto sanitario, y están regulados en la Unión Europea por la Directiva (93/42/CEE, 2007), de 14 de junio, sobre productos sanitarios y en España, por el Real Decreto 1591/2009, de 16 de octubre, por el que se regulan los productos sanitarios, transposición al derecho español de la citada Directiva.

Los aparatos deben llevar el marcado CE en su etiquetado e instrucciones de uso, acompañado de un número de cuatro dígitos que identifica al organismo notificado que ha intervenido en su evaluación. (Las webs para consultar ambos documentos, están en el **Anexo I.b**, aunque en este caso no apliquen).

## 2.2 Recursos.

Los recursos de los que se dispone son limitados, aunque nos permiten cierta flexibilidad a la hora de la toma de decisiones sobre la tecnología comercial a utilizar. Y a nivel técnico, de herramientas, taller, etc., sólo se cuenta con los propios del proyectando y que en principio parecen suficientes, así como ciertos equipos de los que dispone la escuela.

Todos los materiales, así como también los componentes electrónicos, necesarios para la fabricación del prototipo los ha adquirido el autor del proyecto. Se puede consultar la lista de materiales en el **Anexo IV.c**.

---

<sup>5</sup> ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), Este material plástico procede del petróleo, es muy utilizado en la industria, al ser muy estable a altas temperaturas (80°C-90°C), tener una alta capacidad de mecanizado y ser muy resistente tanto a ataques químicos como a impactos.

### 3. DISEÑO.

Una vez fijadas las directrices por las que se va regir el proyecto y teniendo claros los recursos disponibles, se va a empezar la fase de diseño siguiendo el orden establecido en las fases del proyecto

#### 3.1 Diseño electromagnético de la bobina, modelado de una bobina en “MATLAB”.

El campo magnético creado por la bobina es debido al paso de la corriente eléctrica que circula por la misma. Nuestro objetivo es poder controlar ese campo magnético, por tanto y en base a lo anterior controlando la corriente eléctrica estaremos en disposición de controlar las características del campo magnético. Este control lo vamos a realizar mediante un tiristor.

El tiristor es un componente electrónico el cual nos permite dejar pasar o bloquear por completo el paso de la corriente eléctrica sin tener nivel intermedio alguno (aunque no están concebidos para soportar grandes sobrecargas de corriente). Una idea general del mismo es que se puede considerar como el equivalente electrónico de los interruptores mecánicos. El diseño del tiristor permite que éste pase rápidamente a encendido al recibir un pulso momentáneo de corriente en su terminal de control, denominada puerta (o en inglés, *gate*) cuando hay una tensión positiva entre ánodo y cátodo, es decir la tensión en el ánodo es mayor que en el cátodo (ver figura 8.1.). Solo puede ser apagado con la interrupción de la fuente de voltaje, abriendo el circuito, o bien, haciendo pasar una corriente en sentido inverso por el dispositivo. Si se polariza inversamente en el tiristor existirá una débil corriente inversa de fugas hasta que se alcance el punto de tensión inversa máxima, provocándose la destrucción del elemento (por avalancha en la unión).

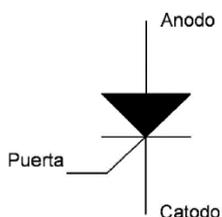


Figura 3.1-1. Tiristor

Se puede observar que a medida que se aumenta la corriente de puerta se desplaza el punto de disparo. Se puede controlar así la tensión necesaria entre ánodo y cátodo para la transición OFF -> ON, usando la corriente de puerta adecuada (la tensión entre ánodo y cátodo dependen directamente de la tensión de puerta, pero solamente para OFF -> ON). Cuanto mayor sea la corriente suministrada al circuito de puerta IG

(intensidad de puerta), tanto menor será la tensión ánodo-cátodo necesaria para que el tiristor conduzca. También podemos hacer que el tiristor empiece a conducir si no existe intensidad de puerta y la tensión ánodo-cátodo sea mayor que la tensión de bloqueo.

Para poder modelizar la bobina vamos a representarla por el valor de la resistencia del cobre del bobinado sumado a su valor inductivo. Por tanto, su representación va a estar caracterizada por una carga R-L.

El circuito resultante es:

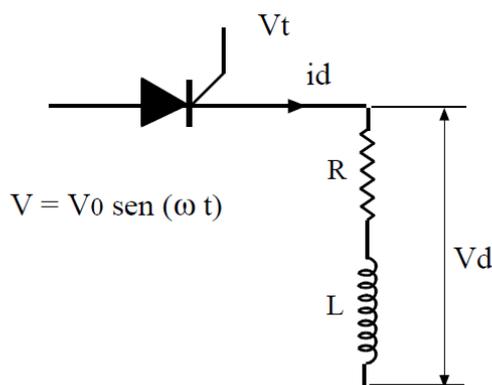


Figura 3.1-2. Control de pulsos mediante un tiristor

Aplicamos en el circuito una tensión de alimentación  $V_0 = V \sin(\omega t)$ , es decir, una entrada de tensión senoidal.

Podemos observar que desde  $\omega t = 0$  hasta  $\omega t = \pi$  el tiristor está polarizado en directa, sin embargo, desde  $\omega t = \pi$  hasta  $\omega t = 2\pi$  está polarizado en inversa. Por tanto, con el tiristor podemos controlar el tiempo de disparo (medido en grados o en ms) para controlar la caída de tensión en  $V_d$  (a través de, como hemos comentado arriba, un pulso momentáneo de corriente en su terminal de control o puerta). Consideraremos que el tiempo de disparo es de 0 ms para los cálculos que realizaremos más adelante, más específicamente para el cálculo de la intensidad  $i_d(t)$  que recorre la bobina.

Es decir, en nuestro caso el modelo del tiristor lo podemos tomar como un diodo, ya que polarizado en directa deja pasar toda la tensión entrante (ON) y en inversa pasa a corte (OFF).

Podemos observar los siguientes puntos:

- Cuando el tiristor pasa a ON, toda la tensión del generador senoidal cae bruscamente sobre la bobina.
- Cuando el tiristor pasa a OFF, la tensión de la bobina pasa bruscamente a cero.

- En este paso brusco de tensión a cero en la bobina aparece un valor máximo de corriente a través de la carga R-L que deberemos tener en cuenta a la hora de realizar cálculos ya que representaremos la forma de onda de la intensidad respecto al tiempo.

Para poder resolver la intensidad que recorre la bobina o solenoide  $i_d(t)$  se halla a partir de la ecuación que rige el comportamiento del circuito; la cuál corresponde a:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = V_0 \sin(\omega t)$$

Con los cálculos correspondientes, los cuales están desarrollados en el **Anexo III.a**, llegamos a la resolución de  $i_d(t)$ ; que nos resulta:

$$i_d = \frac{V_0}{Z} \sin \varphi \times e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{V_0}{Z} \sin(\omega t - \varphi)$$

Siendo:

$$Z = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$$

Con esta ecuación podemos hallar el valor de  $i_d(t)$  para cualquier instante de tiempo posterior al disparo (que, en nuestro caso, recordemos, son 0 ms). Más adelante mediante el programa de cálculo MATLAB y a través del uso de su lenguaje de programación; podremos calcular los valores instantáneos de la corriente además de poder dibujar las diferentes gráficas tanto de la corriente como de la tensión dependientes del tiempo. Es decir, a través de MATLAB podremos caracterizar en su totalidad la bobina o solenoide controlada su intensidad; a través del tiristor.

Para poder definir las características de la bobina, tras haber hecho un análisis de las limitaciones, ahora es el momento de determinar la mejor relación entre ellas y obtener los resultados más óptimos, es decir que sea más ligera, con menos cobre, alimentada a una tensión más baja, con menos consumo y minimizar el recalentamiento.

Inicialmente podemos tomar como un dato determinante el diámetro de la bobina. Se ajusta al máximo que nos permite la impresora, llegando también a un compromiso para que sea accesible para las extremidades, así pues, el diámetro de bobinado se ha fijado en 19cm y el interior de 18cm.

El consumo no puede ser alto para que la fuente de alimentación portátil pueda proporcionarlo.

Otra limitación que nos encontramos es la densidad de potencia por unidad de superficie cuyo valor ensayado se limita a 0.035W/cm<sup>2</sup> para evitar el calentamiento en la superficie de la bobina por efecto Joule.

Considerando las limitaciones y la mejor optimización obtenemos las siguientes características de nuestra bobina<sup>6</sup>:

NB	350 espiras
LB	12.5 cm
DB	19 cm
DH	1 mm
Vef	24 voltios

**Figura 3.1-3.** Características constructivas de la bobina

Para poder caracterizar por completo los parámetros de la bobina necesitamos obtener los valores de la resistencia de la bobina, coeficiente de autoinducción, densidad de corriente... Para ello es necesario aplicar las fórmulas que se detallan en el **Anexo III.b**.

Para favorecer los cálculos de las diferentes características eléctricas y constructivas de la bobina, estos se han realizado a través del programa de cálculo matemático MATLAB 7.0.1 de Mathworks.

Obteniendo los siguientes parámetros característicos de la bobina:

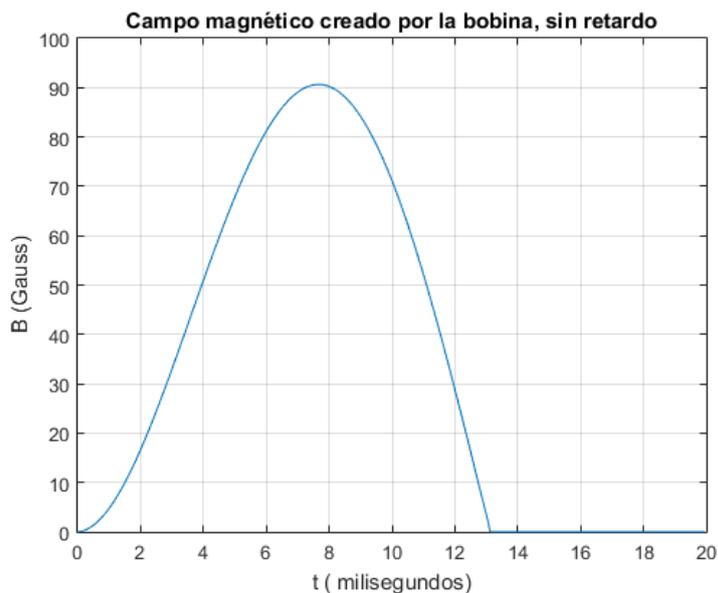
RESISTENCIA BOBINA	4.73 Ohmios
COEFICIENTE AUTOINDUCCION	21.22 mH
INICIO DEL DISPARO	0.0 ms
CORRIENTE DE PICO	4.74 A
CORRIENTE EFICAZ	2.53 A
DENSIDAD DE CORRIENTE	3.23 A/mm <sup>2</sup>
POTENCIA BOBINA	30.36 W
POTENCIA SUPERFICIAL	40.06 mW/cm <sup>2</sup>
CAMPO MAGNETICO	90.65 Gauss
PESO COBRE	1.48 Kg
NUMERO DE CAPAS	3 Capas

**Figura 3.1-4.** Características generales de la bobina

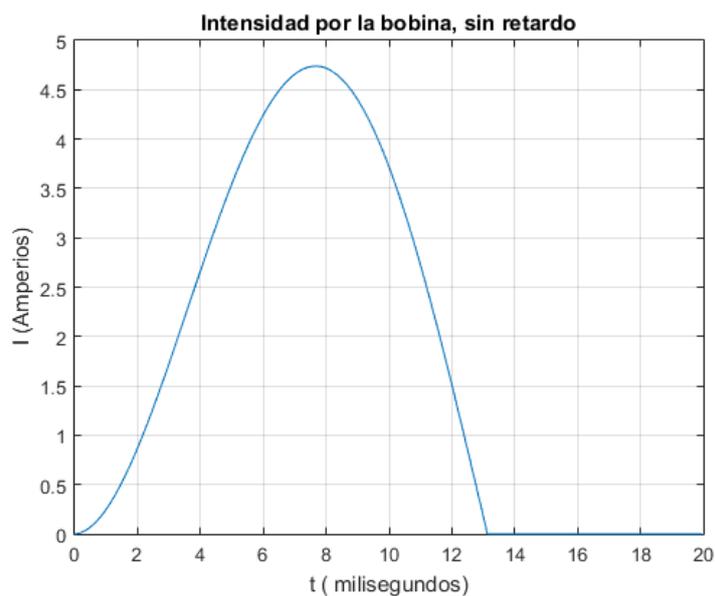
<sup>6</sup> NB = Número total de espiras  
 LB = Longitud de la superficie de la bobina  
 DB = Diámetro de la superficie de bobinado  
 DH = Diámetro del hilo de bobinado

El código fuente usado en MATLAB para llegar a los valores definitivos de los parámetros de la bobina reflejados en la Figura 3.1-4; está contenido en el **Anexo III.c**

A continuación, se muestran dos gráficos obtenidos en el programa de MATLAB con los parámetros mencionados en la anterior figura:



**Figura 3.1-5** Gráfico del campo magnético creado por la bobina.



**Figura 3.1-6.** Gráfico de la intensidad que circula por la bobina

## 3.2 Diseño electrónico, para el control y alimentación de la bobina.

A la hora de llevar a cabo el diseño electrónico del equipo, se ha pensado en dividir esta parte del diseño en tres fases diferentes, fase de alimentación (fuente de alimentación), fase de control (etapa de control) y por último la fase de potencia (etapa de potencia).

### 3.2.1 Fuente de alimentación doble

Para alimentar la etapa de control, se pensó en una fuente de alimentación doble de +9 V y -9 V, mediante regulador, este tipo de fuentes se pueden dividir en cuatro apartados, los cuales se explican a continuación.

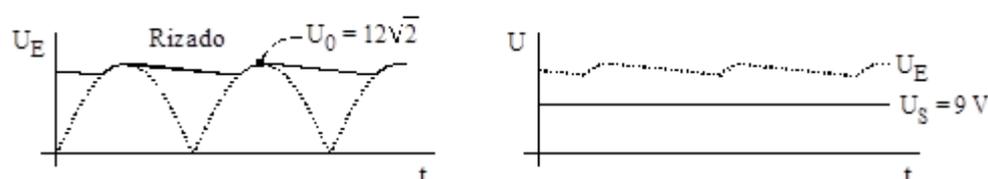
**TRANSFORMADOR:** Reduce la tensión de red a una tensión inferior cuyo valor de pico sea compatible con la tensión de entrada del estabilizador.

**PUENTE RECTIFICADOR:** Transforma la corriente alterna a corriente continua pulsante. Generalmente el puente rectificador suele implementarse con integrados de cuatro diodos para obtener una rectificación en onda completa.

**FILTRO:** Alisa con un cierto nivel de rizado la onda pulsante de salida. Está formado por uno o varios condensadores de capacidad adecuada conectados en paralelo con la salida del rectificador.

**ESTABILIZADOR:** Tiene por misión mantener constante la tensión a su salida aunque la tensión de entrada cambie o la corriente de carga varíe. Para garantizar que el estabilizador funcione adecuadamente, el nivel mínimo de la tensión de rizado deberá estar 3 V por encima de la tensión nominal de salida y el nivel máximo de la tensión de rizado no deberá superar los 35 V para que pueda soportar la potencia máxima. Hoja de características en el **Anexo.III**

Así pues, en la siguiente figura se muestran los niveles de tensión a la entrada y salida para un regulador de tensión positiva 78XX.



**Figura 3.2-1.** Niveles de tensión a la entrada y salida del regulador.

Las fuentes de alimentación dobles se pueden implementar utilizando un regulador de tensión positiva 78XX junto con un regulador de tensión negativa 79XX. Para este tipo de fuentes es necesario que el secundario del transformador sea de doble devanado o bien de un solo devanado con salida intermedia. En la figura 3.2-1 se indica

el esquema de una fuente de tensión doble de +9 V y -9 V, para entregar una corriente máxima de 500 mA, que se ha diseñado para este proyecto.

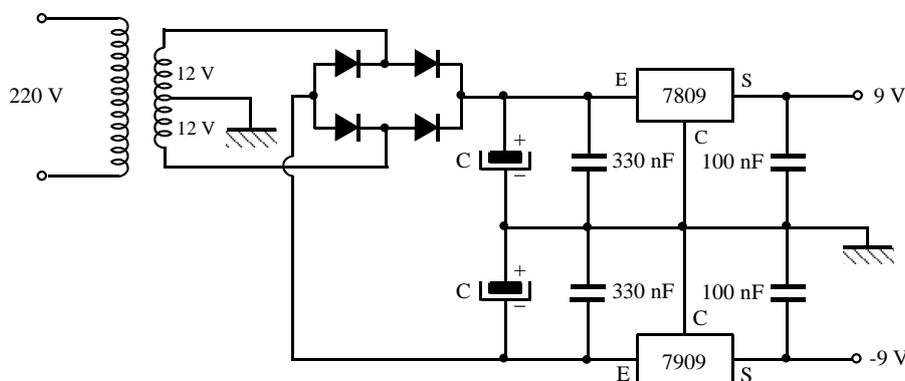


Figura 3.2-2. Fuente de alimentación con salida doble (+9 V, -9 V).

A continuación, se muestran los cálculos del condensador de filtro para que la tensión mínima del rizado no caiga por debajo de 12 V a la entrada del regulador:

Carga inicial:  $Q_i = C \cdot U_0$  (el condensador se carga en el pico de tensión)

Carga cedida en la descarga:  $Q_{des} = I_C \cdot t_{des}$  ( $I_C = 0,5 \text{ A}$ ,  $t_{des} = 0,01 \text{ s}$ )

La descarga real se produce en un tiempo ligeramente inferior a medio ciclo de la tensión de red, sin embargo, al no conocer su tiempo exacto se puede considerar medio ciclo para el cálculo (10 ms). Este error cometido será pequeño y además será favorable porque el rizado real será inferior al calculado. Como el regulador mantiene constante la tensión del circuito de carga, la corriente de descarga  $I_C$  es de 500 mA. La tensión mínima del rizado deberá estar 3 V por encima de la tensión de salida del regulador para garantizar su correcto funcionamiento, por lo tanto, la tensión final  $U_f$  como mínimo deberá ser de 12 V.

Carga final en la descarga:  $Q_f = Q_i - Q_{des} = C \cdot U_0 - I_C \cdot t_{des}$

$$\text{Como: } C = \frac{Q_f}{U_f} = \frac{C \cdot U_0 - I \cdot t_{des}}{U_f} \Rightarrow C = \frac{I \cdot t_{des}}{U_0 - U_f} = \frac{0,5 \times 10^{-3}}{17 - 12} = 10^{-3} \text{ F} = 1.000 \mu\text{F}$$

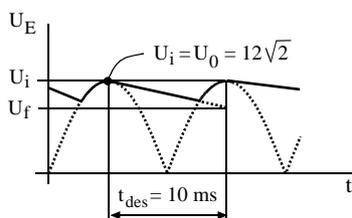


Figura 3.2-3. Rizado en el condensador de filtro.

Los condensadores de 330 nF y 100 nF conectados respectivamente a la entrada y a la salida del regulador son para filtrar el ruido electromagnético que pudiera entrar en

el circuito. Estos deben ser condensadores de poliéster para tengan un tiempo de respuesta rápido ante señales de frecuencia elevada.

El condensador de filtro debe ser electrolítico, dado que debe ser de capacidad elevada y por lo tanto su respuesta es lenta para señales de alta frecuencia, por esa razón es conveniente colocar en paralelo el condensador de 330 nF de respuesta rápida.

### 3.2.2 Control de la bobina de magnetoterapia.

A continuación, se muestra una imagen del diseño completo de la electrónica de control y de potencia.

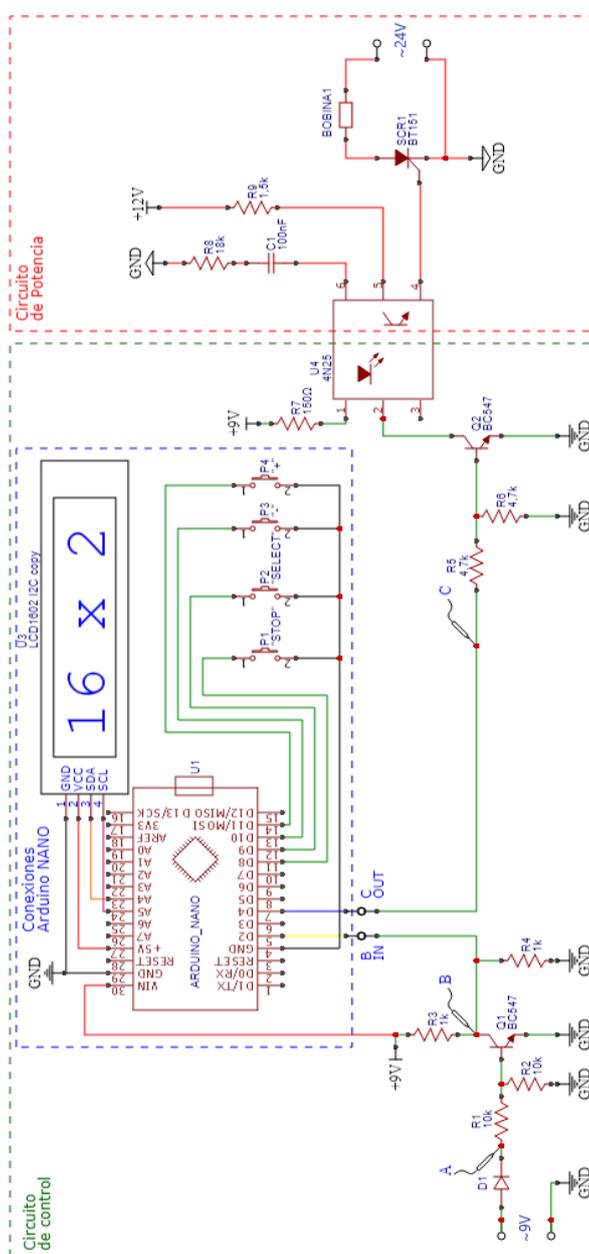


Figura 3.2.2-1. Esquema completo, circuitos de control y potencia.



### b. Circuito de control

Este circuito, a partir de una tensión de 9V en alterna, proporcionada por un transformador 230/2x9V 2,8 VA. Dicha tensión, se rectifica a media onda, mediante el uso del diodo D1, se obtiene así la forma de onda que se puede ver en el punto A la Figura 3.2.2-4.

Esta tensión llega a la base del transistor Q1, el cual cuando esta pasa de 1,4V se pone en conducción, de forma que se genera una corriente entre los +9V y GND, la cual mediante el divisor de tensión que forman R3 y R4, hace que la tensión en B (pin de interrupción del Arduino) sea de 4,5V, suficiente para activar la interrupción. Esta señal se mantiene en alto hasta que la onda vuelva a bajar por debajo de 1,4V.

Acto seguido el Arduino, devuelve un pulso  $t_{ret}$ , el cual va retardado varios milisegundos en función del porcentaje de campo que se quiera generar, a su vez este pulso llega a la base del transistor Q2, que actúa como interruptor del optoacoplador 4N35, el cual a su vez hace de separación galvánica entre el circuito de control y el circuito de potencia.

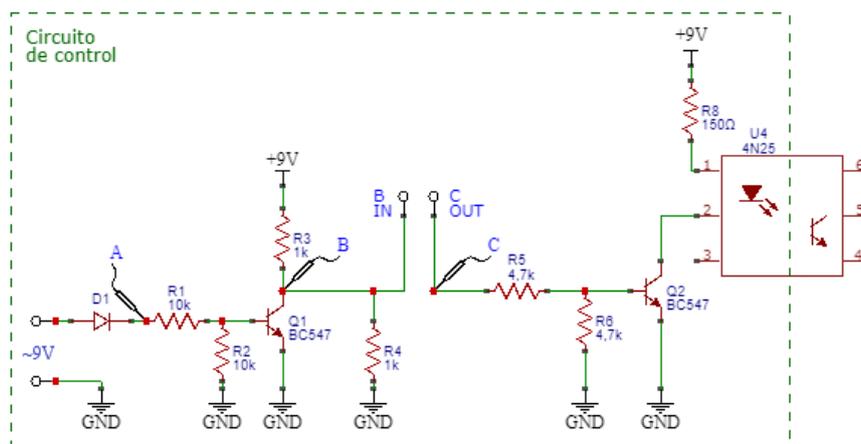


Figura 3.2.2-3. ~Circuito de control.

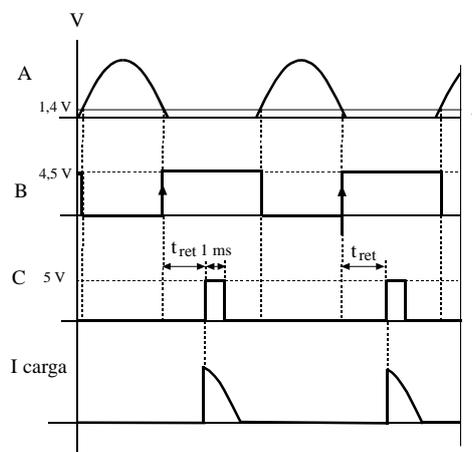


Figura 3.2.2-4. Grafica Tensión-Tiempo, en el circuito.

### c. Circuito de potencia

El circuito de potencia, se compone de una fuente de alimentación de 12V CC la cual alimenta el propio circuito. Esta se ha hecho usando uno de los devanados de un transformador 230/2x12V 2,8 VA, al cual se ha rectificado mediante un puente de diodos, el otro devanado, sirve para alimentar los 9 V en alterna del circuito de control.

Cuando el transistor Q2 entra en conducción, el fotodiodo del optoacoplador se activa, poniendo a su vez en conducción el transistor interno del optoacoplador, que manda un pulso a la puerta del tiristor BT151, energizando así la bobina. La cual se alimenta mediante un transformador toroidal de 230/24V de 80 VA.

Decir que se puso un condensador y una resistencia en la base del transistor del optoacoplador a modo de filtro, para evitar que pudiese entrar en conducción por ruido, el dimensionamiento del mismo se hizo de forma empírica.

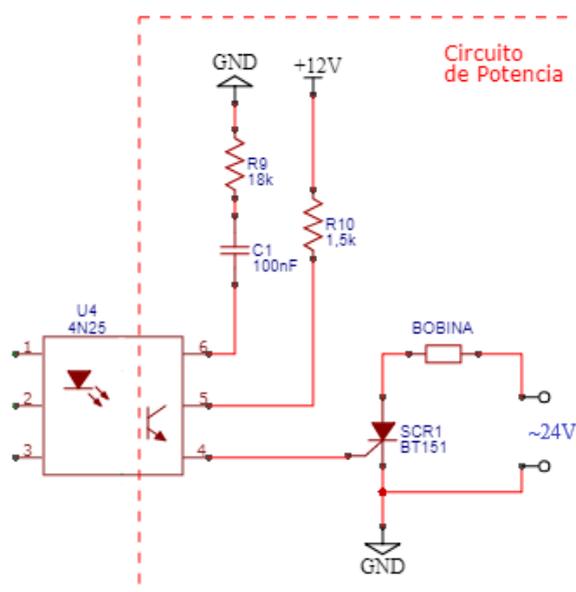


Figura 3.2.2-5. Circuito de potencia.

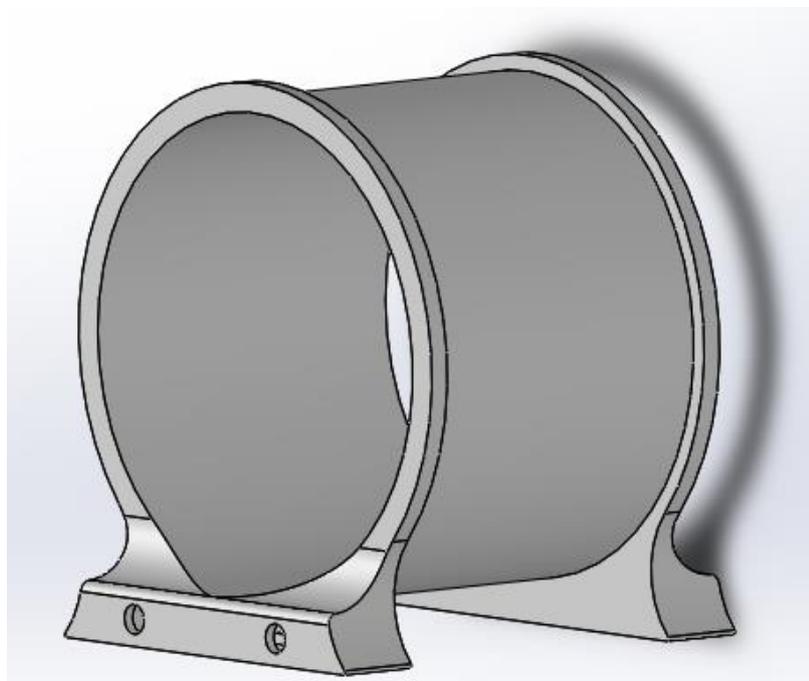
### 3.3 Diseño mecánico del conjunto.

Definidas ya las características generales de la bobina en el apartado anterior y con ellas sus medidas principales, en esta sección vamos a crear un diseño que cumpla tanto las directrices generales del proyecto como las medidas fijadas anteriormente.

Con estas premisas, podemos diferenciar dos partes en este apartado, el diseño de la propia bobina y el diseño de una carcasa contenedor de toda la electrónica de la que requiere el proyecto. Ambas piezas se han diseñado usando el software de diseño en 3D, SolidWorks.

A la hora de diseñar las piezas, sobre todo las de mayor dificultad, no solo hay que pensar en un diseño atractivo a la vez que funcional, sino que hay otro reto a tener en cuenta, que estas se van a fabricar mediante impresión 3D. Lo que implica que debido a la forma en que la impresora 3D trabaja, generando capas a partir de un plano, hay que hacer un diseño el cual, más allá del software de CAD, que todo lo aguanta, se pueda llevar a cabo, obteniendo la mejor calidad.

A continuación, se adjuntan unas imágenes de las piezas en 3D, para más detalle, los planos de fabricación se pueden encontrar en el **Anexo IV.d..**



**Figura 3.3-1.** Diseño 3D, Bobina

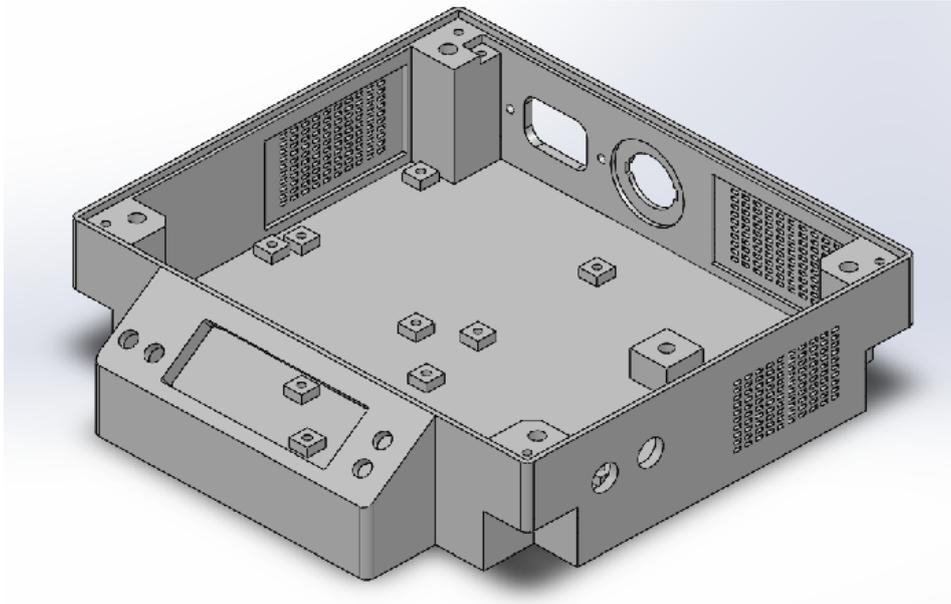


Figura 3.3-2. Diseño 3D, Carcasa contendor.

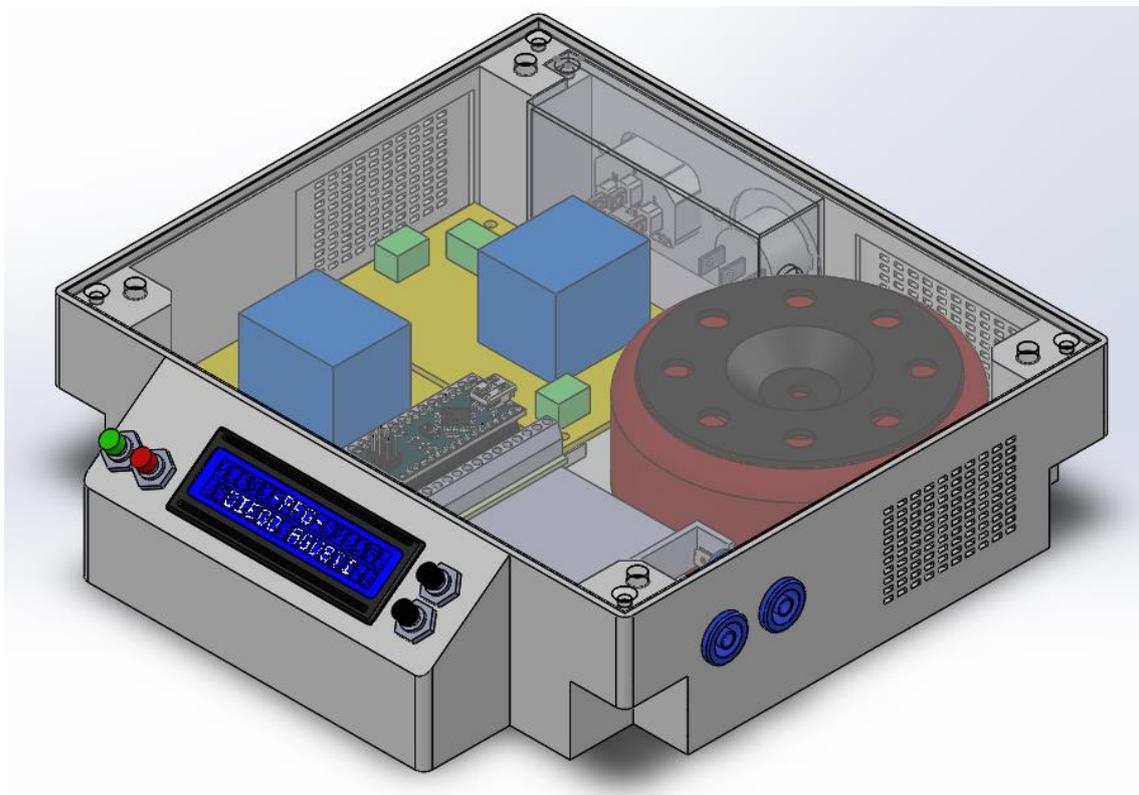
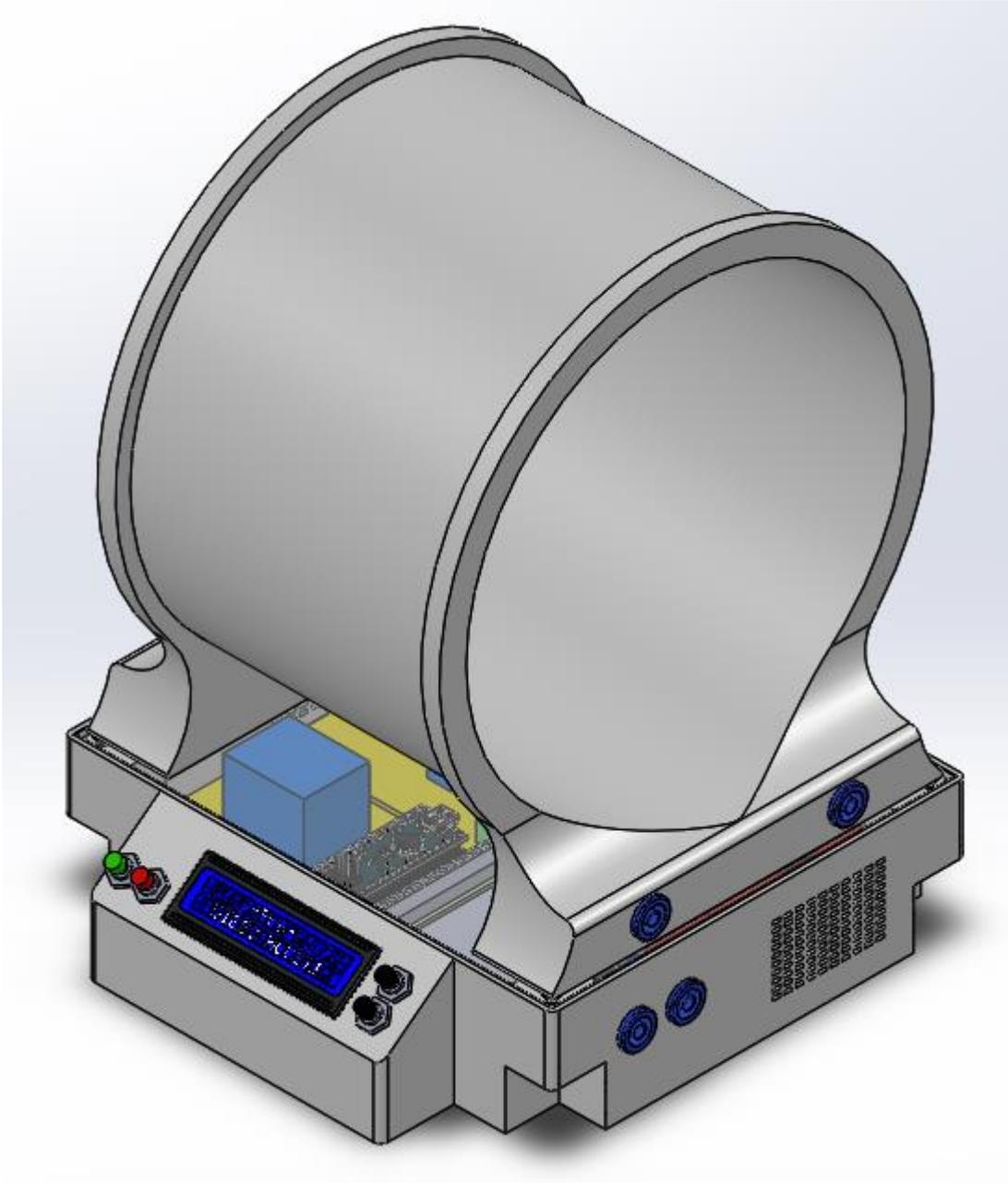


Figura 3.3-3. Diseño 3D, Ensamblaje carcasa contendor.



**Figura 3.3-4.** Diseño 3D, Ensamblaje equipo magnetoterapia.

## 4. DESARROLLO.

Una vez finalizada la fase de diseño, a partir de los cálculos teóricos y diseños se va a proceder a manufacturar el equipo. Como ya se explicó con anterioridad, se trata de un prototipo funcional, así pues, se han seguido tres fases en la parte de desarrollo:

### 4.1 Fabricación y montaje de la electrónica de control y alimentación.

Esta fue la primera fase de desarrollo, partiendo de los diseños de cada una de las tres etapas que se definieron, fuente de alimentación, circuito de control y circuito de potencia. Se procedió a la fabricación de cada una de ellas, mediante el método de insolación. El cual está explicado en el **Anexo IV.b**, además se puede encontrar también los fotolitos y los esquemas topográficos de cada una de las placas.

A continuación, se pueden ver tres fotografías con el resultado, una vez ya taladradas y con todos los componentes soldados.



Figura 4.1-1. Placa Fuente de alimentación doble.



Figura 4.1-2. Placa circuito de potencia.

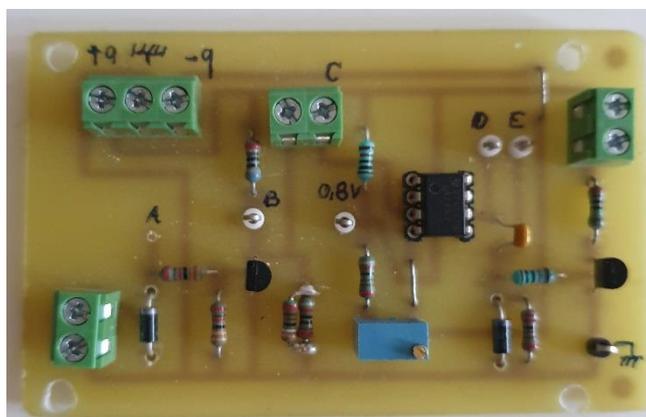


Figura 4.1-3. Placa Circuito de control.

## 4.2 Desarrollo del software de control.

En la fase de diseño se puso como requerimiento que el control del equipo debía ser realizado mediante la plataforma de hardware libre “Arduino”, la cual está basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñado para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios. Cuenta con una serie de entradas/salidas analógicas y digitales con las que interactuar con el entorno, y se programa en un lenguaje basado en Processing, una variante de Java y C++, también de software libre.

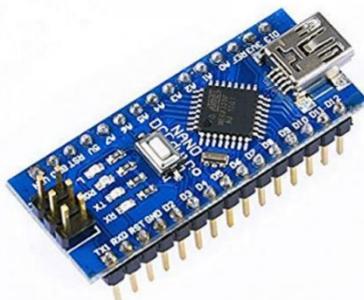


Figura 4.2-1. Placa Arduino Nano.

En el **Anexo III.a** podemos encontrar todas las características, más detalladas, de esta placa, así como de los módulos accesorios que serán nombrados en este apartado.

Dicho esto, la intención de usar Arduino, no era solo para poder controlar el retardo del disparo del tiristor, lo cual lo se hace mediante el uso de una interrupción física, usando una de las dos que ofrece esta placa, sino que además se pretendía generar una interface de forma que el usuario pueda interactuar y seleccionar los diferentes modos de funcionamiento que se han pensado y que se van a explicar a continuación.

Como se ha mencionado, para dar más entidad al proyecto, se pensó en crear una interface, la cual estaría formada, por una pantalla LCD de 16x2, la comunicación entre el “Arduino” y la pantalla se hará a través de un Módulo adaptador de LCD a interfaz I2C, en el **Anexo III.b** se explica más en profundidad este protocolo de comunicación. Además, para el uso de estos dos elementos es necesario incluir sus respectivas librerías en el código, las cuales se pueden descargar del repositorio oficial<sup>7</sup>. Y por último de cuatro pulsadores, (“Select”, “Stop”, “+” y “-”) que permitan al usuario moverse por los menús y seleccionar tanto el modo de funcionamiento como el tiempo del tratamiento.

Así pues, se pensó en tres modos de funcionamiento:

<sup>7</sup> <https://www.arduino.cc/en/Reference/Libraries>

1. **Modo manual:** El usuario puede ir variando el porcentaje de campo magnético<sup>8</sup>, desde 0% a 100%, en saltos de 10%. Pulsando el pulsador “+” o “-”, el primero para incrementar y el segundo para decrementar.
2. **Modo Automático:** El porcentaje de campo magnético<sup>4</sup>, va variando automáticamente primero de forma ascendente desde 20% hasta 100% una vez en 100% se mantiene y vuelve a descender hasta el 20%, en saltos de 20% (20% - 40% - 60% - 80% - 100% - 100% - 80% - 60% - 40% - 20%), cada salto corresponde con un periodo que es una décima parte del tiempo de tratamiento.
3. **Modo de Campo Máximo:** En este modo, el disparo del tiristor se hace a los 0.0 ms, consiguiendo así el máximo campo.

En la siguiente tabla se hace una relación entre el porcentaje, el campo y el retardo en el disparo.

<b>B (%)</b>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
<b>B (Gauss)</b>	0	9	18	27	36	45	54	63	72	81	90
<b>T_retardo (us)</b>	9900	8475	7725	7080	6475	5885	5265	4590	3820	2840	1000

Figura 4.2-2 Tabla relación porcentaje, campo magnético y retardo en el disparo

Cada uno de estos modos mencionados arriba se accede desde un menú principal, en el cual primero se selecciona el modo, usando los pulsadores “+” y “-”, confirmando con el pulsador “Select” y seguidamente se ajusta el tiempo del tratamiento en minutos, pudiendo elegir desde 1 minuto hasta 60 minutos, mismo procedimiento que para elegir el modo, en este caso de 1 a 3: Cada uno de los modos se ejecutará, mientras dure el tiempo del tratamiento, seleccionado previamente o se pulse el pulsador de “Stop”. Una vez acabado por cualquiera de las dos acciones anteriores, se mostrará un mensaje por pantalla y se volverá al menú principal.

A continuación, se muestra un diagrama de los estados, para entender mejor el funcionamiento del programa. En naranja están representados los eventos asociados a los pulsadores, en verde cambios o eventos generados por variables internas.

<sup>8</sup> El porcentaje de campo magnético corresponde a la siguiente relación: 100% = 90 G. Tiempo de retardo de disparo del tiristor de 1ms.

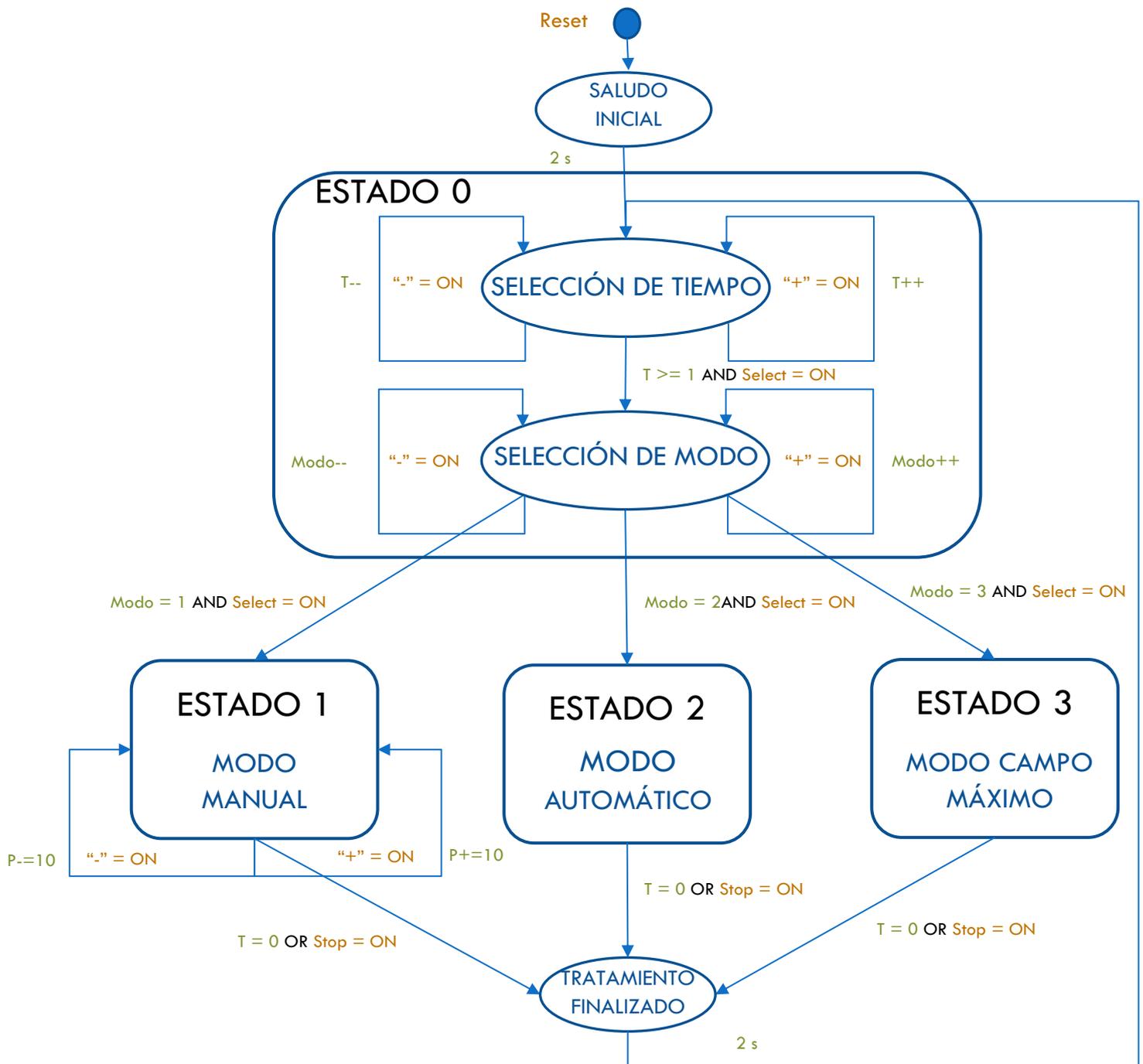


Figura 4.2-3 Diagrama de estados

Si se desea consultar el programa completo o sketch, con sus respectivos comentarios, este se adjunta en el **Anexo III.c**.

### 4.3 Fabricación y montaje del equipo.

Una vez finalizado el diseño en 3D y validado, llega la fase de transformar ese diseño en algo real. Para pasar del modelo de Solidworks, a un formato el cual la impresora 3D, en este caso una Ultimaker 2+, sea capaz de entender, hay que utilizar un software puente, en este caso se usara, Cura 4.5. Una vez abierto y ajustados los parámetros de impresión, tenemos el modelo listo para segmentar. Con el modelo segmentado, el archivo resultante ya se puede mandar a la impresora, para comenzar con la impresión.

A continuación, se muestra una tabla con los parámetros de impresión, para el tipo de material que vamos a utilizar, en nuestro caso ABS, de 2.85 mm de diámetro, el cual cumple con los requisitos mecánicos y de temperatura para el perfecto funcionamiento del prototipo y además es muy cómodo de imprimir:

Diámetro de extrusor	0.4 mm
Temperatura del extrusor:	235° C
Temperatura cama caliente	80° C
Velocidad de impresión	50 mm/s
Altura de capa	0.10 mm
Densidad de relleno	50%
Patrón de relleno	Cubico
Soporte	En todos los sitios
Angulo de voladizo del soporte	30°

Figura 4.3-1 Tabla de parámetros de impresión 3D

En las siguientes ilustraciones, se puede ver un par de pantallazos del software Cura, con el modelo de la bobina antes y después de segmentar.

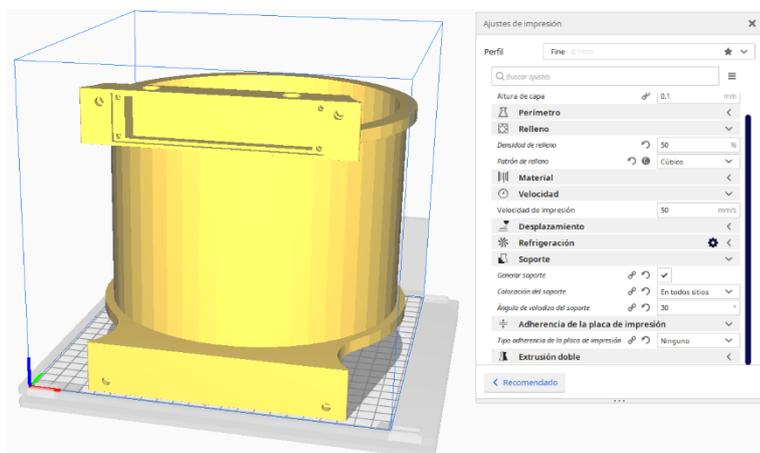


Figura 4.3-2. Modelo 3D Bobina Cura

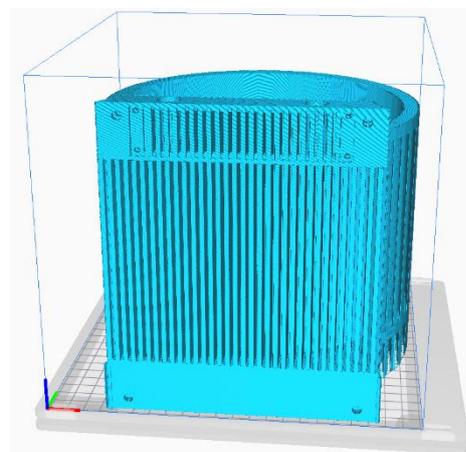


Figura 4.3-3. Modelo 3D Bobina segmentado

Se pensó en imprimir la bobina tumbada ya que ofrecería mayor precisión en la forma del solenoide y además supondría un ahorro de material, al tener que poner un menor número de soportes. La duración de la impresión fue de 6 días y 12 horas<sup>9</sup>, consumiendo un total de 768g de plástico.

A continuación, se muestran dos imágenes del proceso de impresión:

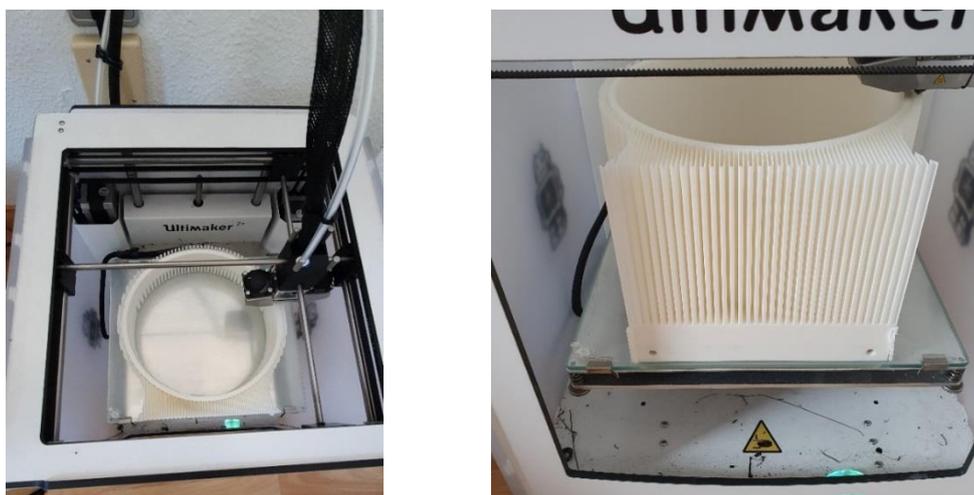
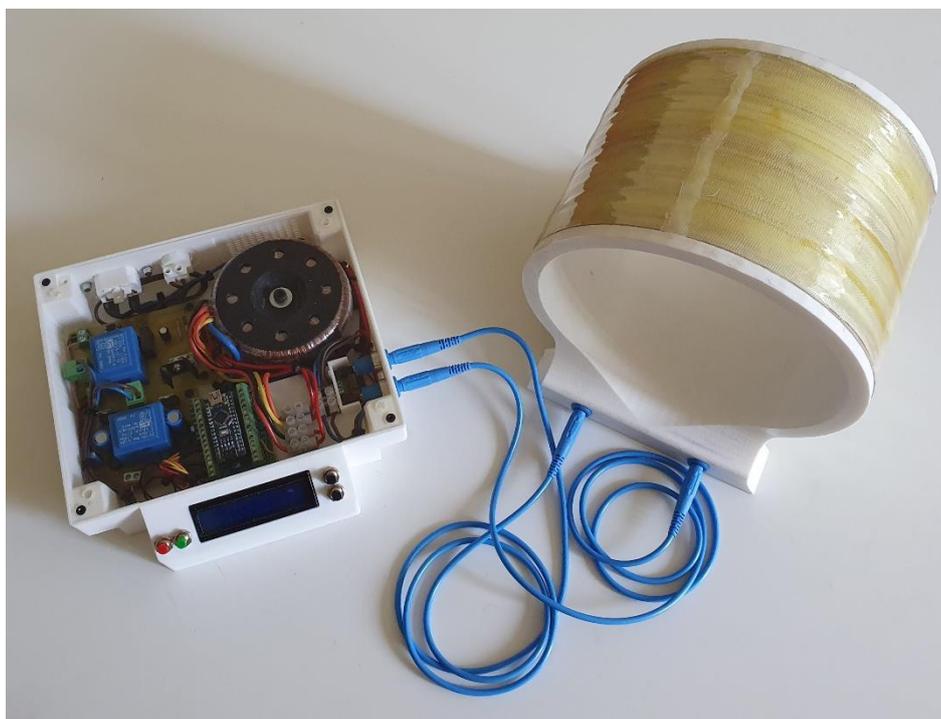


Figura 4.3-4 y Figura 4.3-5. Proceso de impresión.

Una vez acabada la impresión, se llevó a cabo el proceso de bobinado<sup>10</sup>, el ruteado de los cables y la conexión de estos en los conectores, obteniendo así el resultado que se muestra a continuación:



<sup>9</sup> Con una impresora profesional, esta cifra debería reducirse a menos de la mitad de tiempo.

<sup>10</sup> El bobinado lo realizó una empresa especializada en bobinados y reparaciones de motores.

## 5. EVALUACION Y RESULTADOS

Una vez que todos los elementos que componen el equipo de magnetoterapia han sido finalizados, se han de probar en el laboratorio de forma individual, comprobando que cada uno de ellos responde de la forma esperada por separado. Comprobando que las señales en los puntos de control son las adecuadas, es el momento de probar el funcionamiento real del equipo y compararlo con el teórico calculado en MATLAB.

### 5.1 Comparación de resultados teóricos y reales.

Para poder realizar las medidas, tanto de corriente como de campo se ha necesitado el uso de transductores, los dos equipos pertenecen a Antonio Pardina y ya han sido probados para anteriores proyectos.

Para poder medir la onda de corriente se ha usado un transformador de corriente el cual tiene una resolución de 4A por voltio, así pues, por cada voltio que leamos en el osciloscopio estarán pasando cuatro amperios por la bobina.

$$I = 4 \times V \text{ (Amperios)}$$

Para poder medir el campo, se ha utilizado un gaussímetro, que está compuesto por un detector de campo magnético de sensor hall, el cual ofrece una resolución de 100G por voltio, o lo que es lo mismo el campo que generará la bobina será cien veces la tensión que leamos en el osciloscopio.

$$B = 100 \times V \text{ (Gauss)}$$

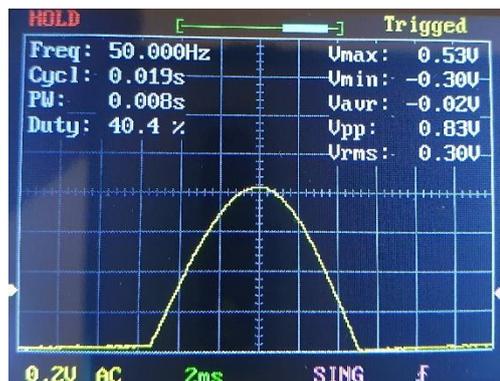
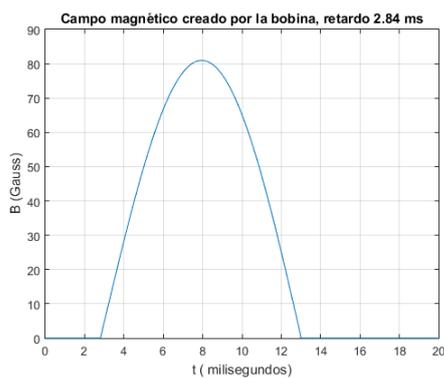
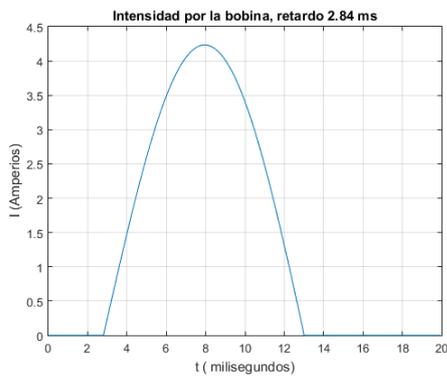
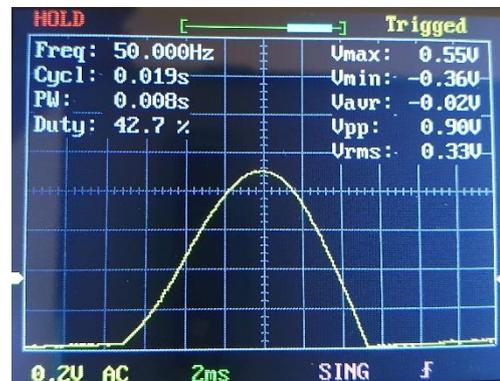
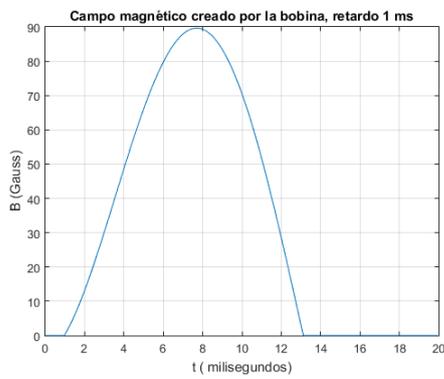
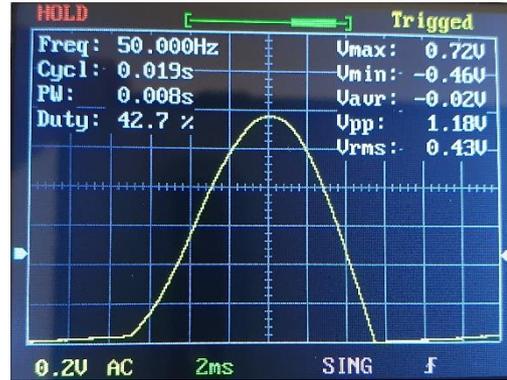
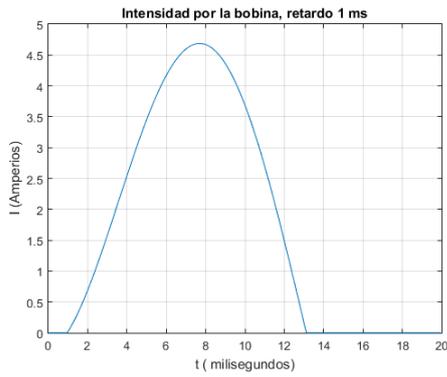


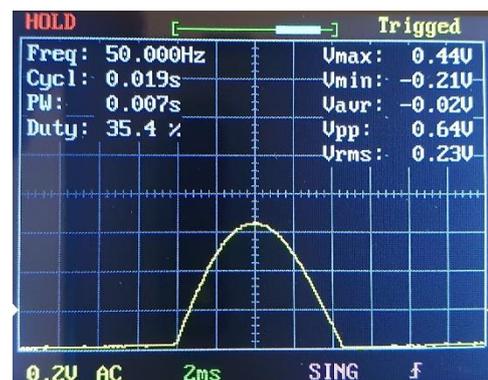
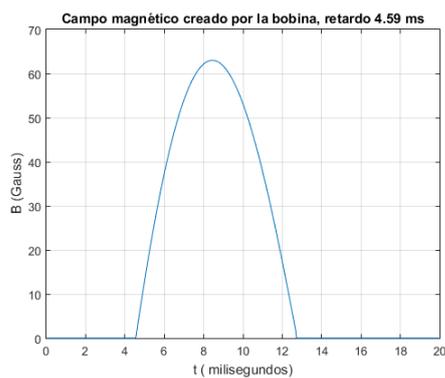
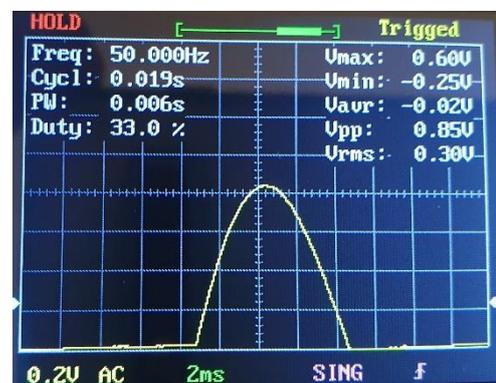
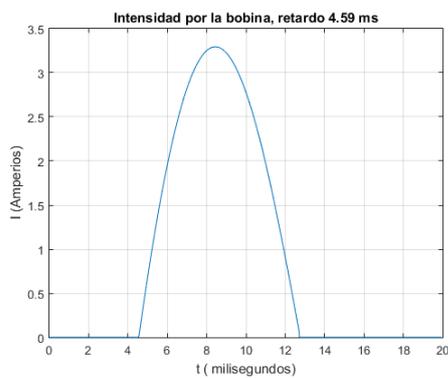
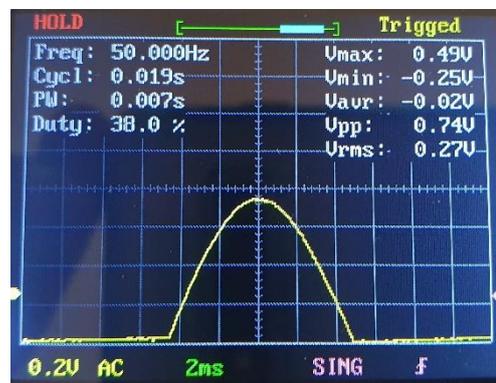
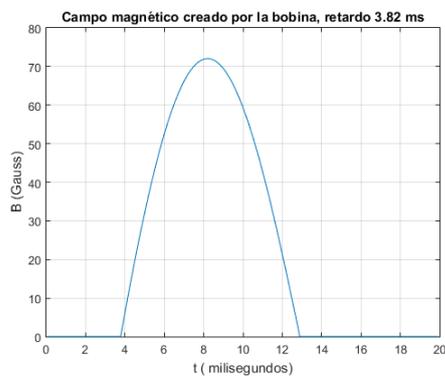
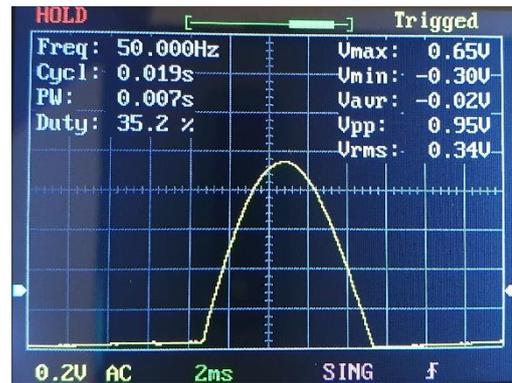
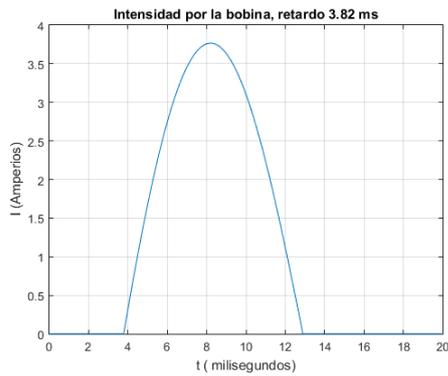
Figura 5.1-1 Transformador de corriente.

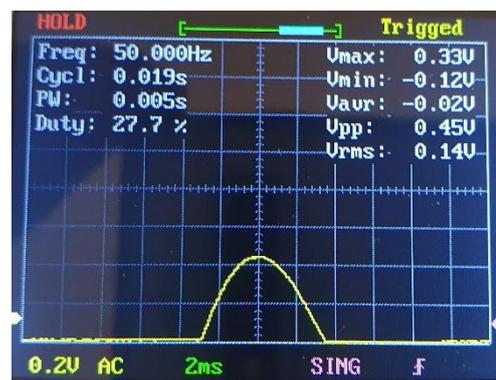
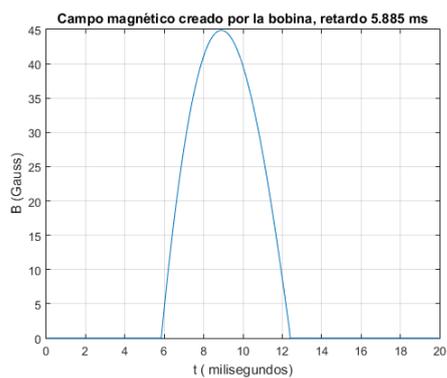
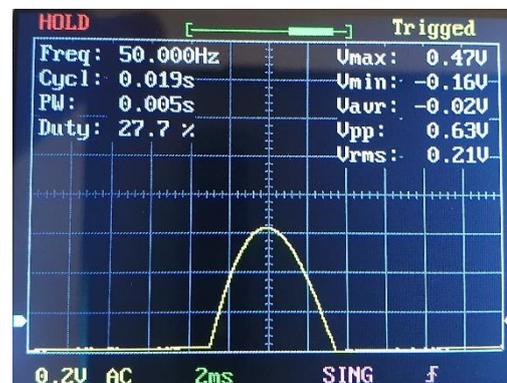
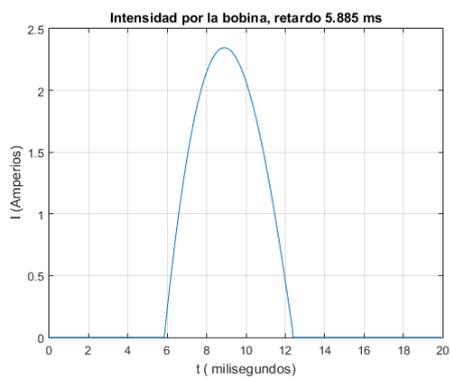
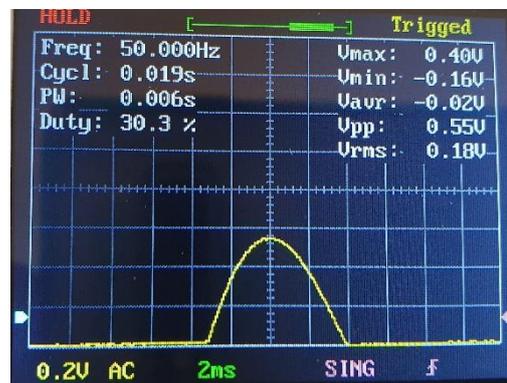
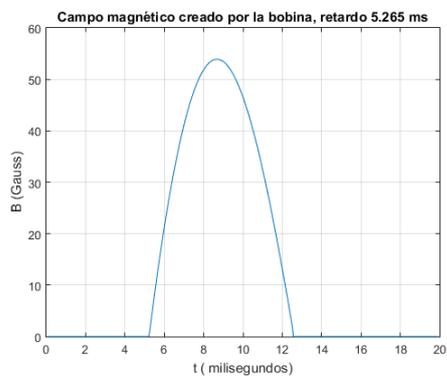
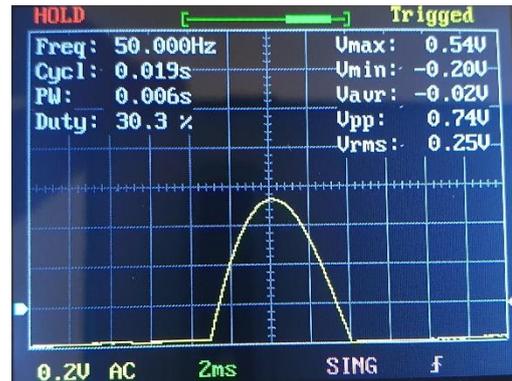
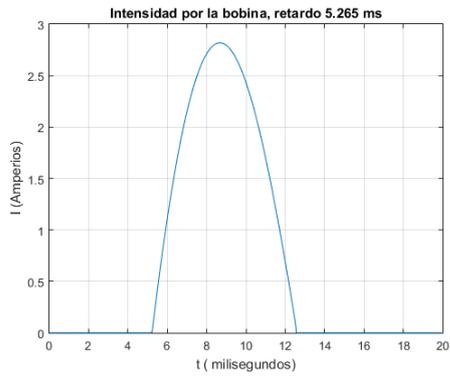


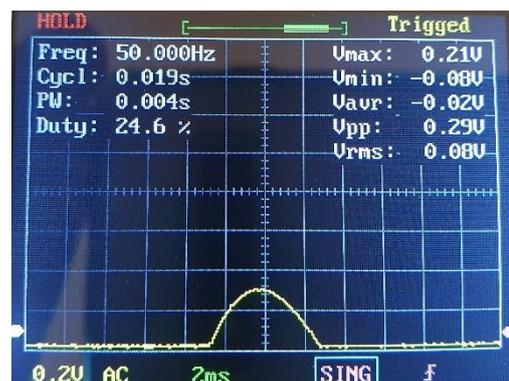
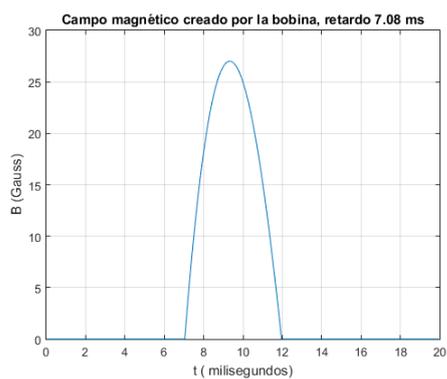
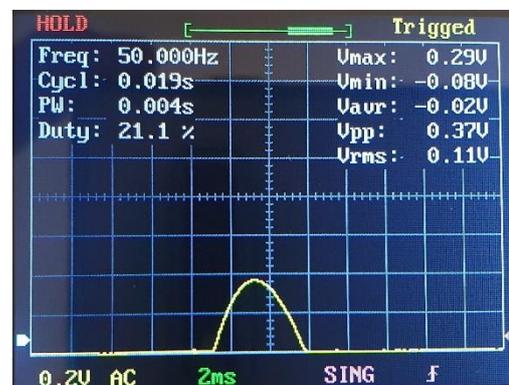
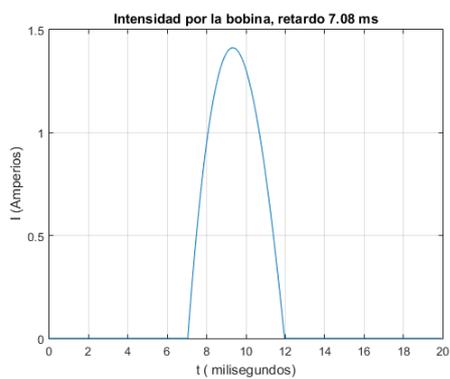
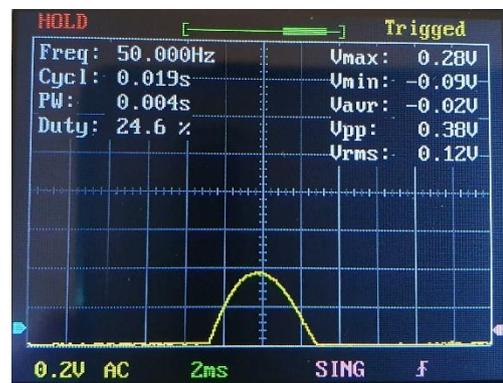
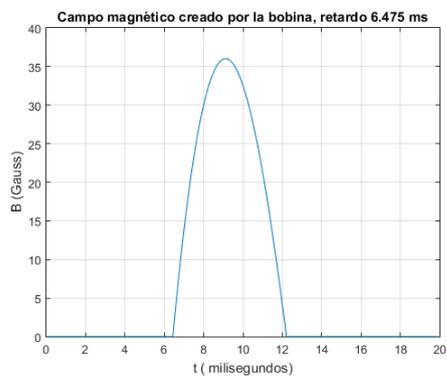
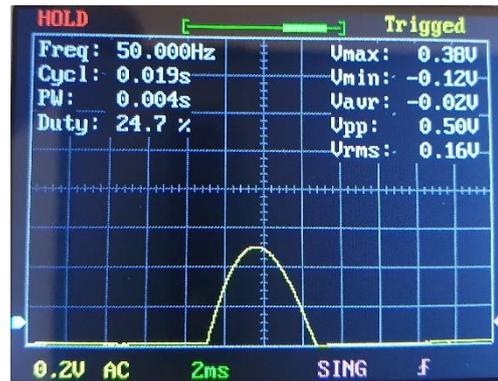
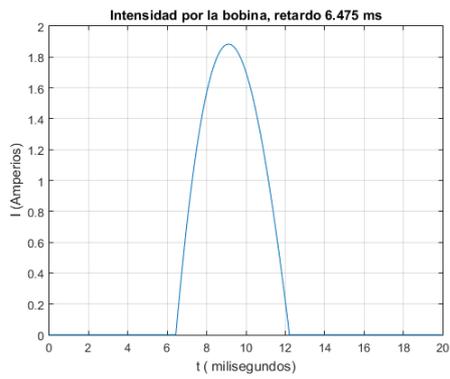
Figura 5.1-2. Gaussímetro.

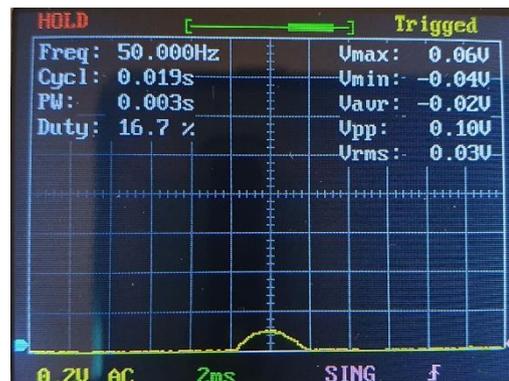
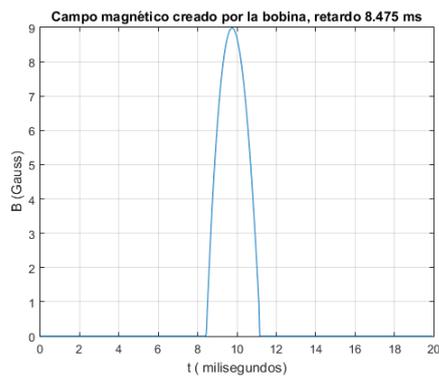
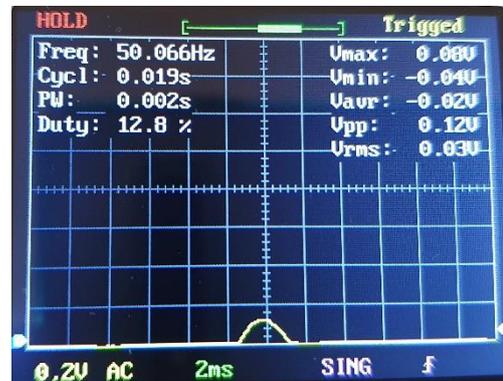
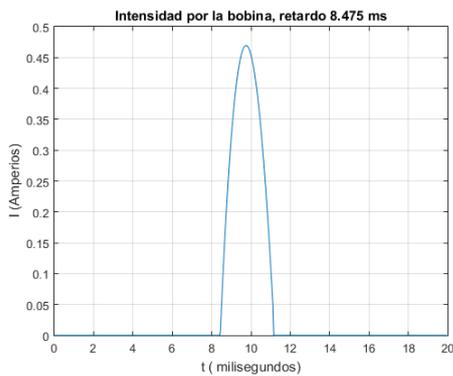
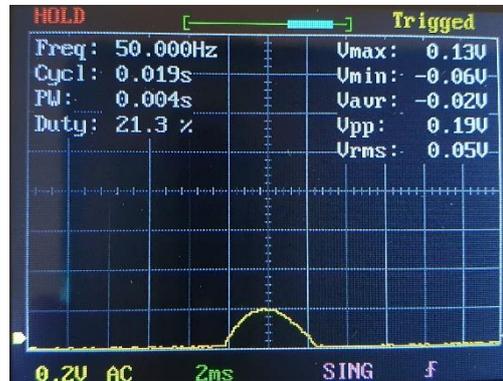
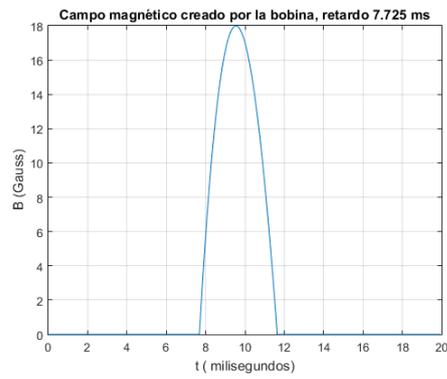
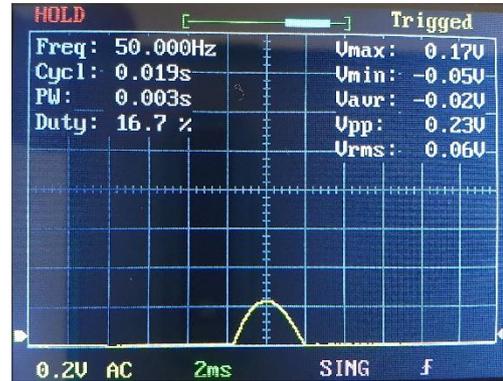
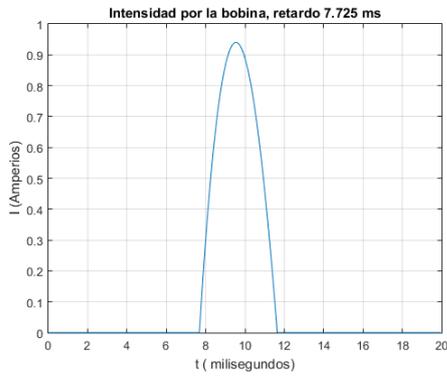
Aprovechando el modo de funcionamiento manual, se va a realizar una comparación entre los distintos niveles (0% hasta 100%), mostrando el valor obtenido en MATLAB para ese retardo en el disparo y el obtenido midiendo con el osciloscopio. Para esto se usarán los retardos en el disparo que aparecen en la tabla de la **Figura 4.2-2**.

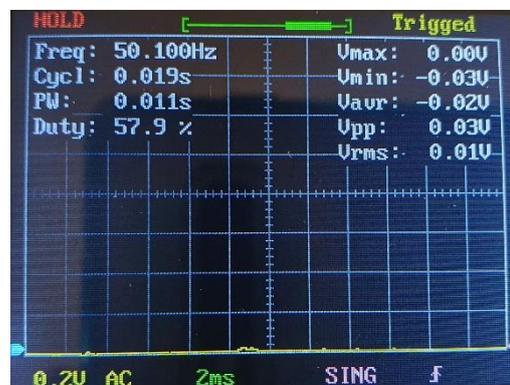
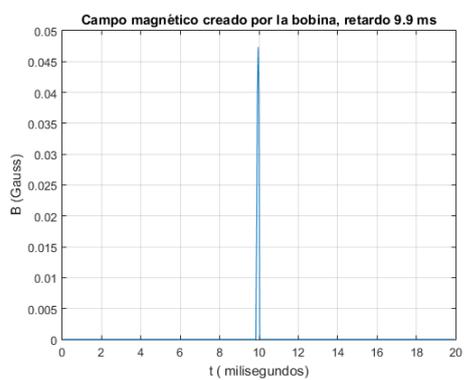
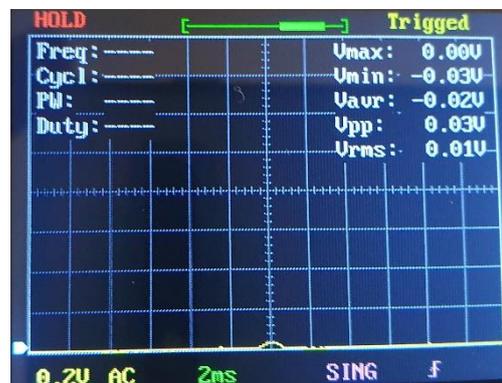
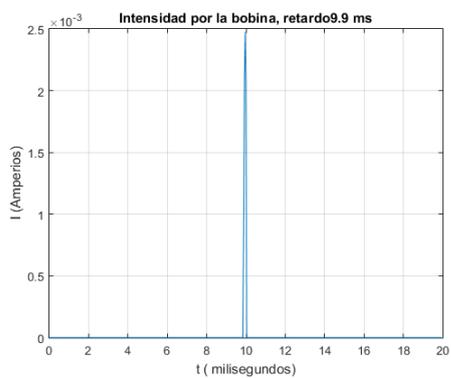












## 5.2 Conclusiones.

Tras el proceso de diseño, fabricación y montaje de este prototipo funcional, habiendo superado las dificultades que se han ido presentando en cada una de las fases, más si cabe destacar el estado de alarma lo cual hizo más difícil el acopio de materiales, el montaje, así como poder hacer las pruebas y medias pertinentes.

En cualquier caso, llegar a tener el equipo montado y funcionando es una gran satisfacción. Además, ver que los resultados que teóricamente se esperan, son obtenidos haciendo las medidas en el prototipo hace que el proyecto cobre un sentido y da la posibilidad de llevarlo a cabo de una forma más profesional, ya que, aunque se ha intentado hacerlo de la mejor manera posible, los recursos de los que se disponía, así como los materiales que se han utilizado no son de las más altas calidades. Aun con todo el prototipo tiene un acabado bastante “profesional” y lo que es más importante funciona correctamente.

Resumiendo, ha sido un largo proceso pasando por todas las fases de desarrollo de un producto, en este caso experimental y con un objetivo educativo, en el cual se ha podido profundizar en varios campos relacionados con la ingeniería, como el electromagnetismo, la electrónica y el diseño, también se ha indagado en tecnologías que en la actualidad están en pleno auge, como son la impresión en 3D o la programación.

Por todo esto, a nivel personal estoy orgulloso de lo conseguido, además con la realización de este proyecto he descubierto un gran interés tanto hacia la electrónica como hacia la programación, que espero poder seguir profundizando en esos campos en el futuro.