



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

DISEÑO, MECANIZADO Y CONSTRUCCIÓN DE UN
BIOREACTOR PARA ESTIMULACIÓN ELÉCTRICA Y
MAGNÉTICA IN VITRO DE CULTIVOS NEURALES

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Mecánica

AUTOR/A: Ferrando Huertas, Paula

Tutor/a: Vidaurre Garayo, Ana Jesús

Cotutor/a: Más Estellés, Jorge

Director/a Experimental: GISBERT ROCA, FERNANDO

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

Índice general del trabajo

Documento nº1: Memoria	17
Documento nº2: Planos	33
Documento nº3: Pliego de condiciones	47
Documento nº4: Presupuesto.....	59
Anejo I: Estudio sobre la intensidad de corriente aplicada a las bobinas	69
Anejo II: Cálculos de la solución adoptada.....	79
Anejo III: Planificación del mecanizado.....	87

Agradecimientos

Me gustaría aprovechar para agradecer a mis tutores, en especial a Jorge, por darme la oportunidad de realizar este trabajo tan interesante y ayudarme durante todo el proceso, sobre todo en los momentos de incertidumbre que nos hemos encontrado.

Quiero destacar la labor del CBIT dentro de la investigación biomédica y su buen trato hacia las personas que trabajan con él, además de agradecerle permitir hacer realidad este trabajo.

A mi familia, mis padres y mis hermanos, les agradezco la paciencia y el apoyo que me han dado siempre. También a mis amigos, que me han acompañado en las distintas etapas de mi vida y estos cuatro años no ha sido menos.

Resumen

Los trastornos y las lesiones del sistema nervioso son un problema que la medicina aún no puede resolver. No obstante, nuevos métodos y técnicas de regeneración neural están en constante desarrollo. Uno de ellos es la estimulación celular de cultivos neurales, con el objetivo de favorecer su crecimiento y hacer posible su regeneración. En este trabajo se desarrolla un bioreactor capaz de estimular de forma eléctrica y magnética dichos cultivos. Para lograrlo, se ha diseñado un sistema de bobinas Helmholtz que generan un campo magnético para estimular las células. Además, este campo permite inducir una corriente eléctrica de 500 μA en una espira sumergida en el medio de cultivo, obteniéndose así la estimulación eléctrica. Para sujetar el sistema de bobinas y las muestras de cultivo, se ha realizado un diseño mecánico de un bastidor, siguiendo una serie de condiciones en las que destacan la funcionalidad y el esterilizado. Por último, se ha analizado el proceso de mecanizado del bastidor, donde se exponen los requisitos de fabricación y el proceso que se debe seguir.

Palabras clave: regeneración neural, estimulación electromagnética, bobinas de Helmholtz, diseño.

Resum

Els trastorns i les lesions del sistema nerviós són un problema que la medicina encara no pot resoldre. No obstant això, nous mètodes i tècniques de regeneració neural es troben en constant desenvolupament. Un d'ells és l'estimulació cel·lular de cultius neurals, amb l'objectiu d'afavorir el seu creixement i fer possible la regeneració. Aquest treball consisteix en el desenvolupament d'un bioreactor capaç d'estimular de manera elèctrica i magnètica aquests cultius. Per aconseguir-ho, s'ha dissenyat un sistema de bobines Helmholtz que generen un camp magnètic per a estimular les cèl·lules. A més, aquest camp permet induir una corrent elèctrica de 500 μA en una espira submergida en el medi de cultiu, d'aquesta manera s'obté l'estimulació elèctrica. Per tal de subjectar el sistema de bobines i les mostres de cultiu, s'ha realitzat un disseny mecànic d'un bastidor, seguint una sèrie de condicions, on destaquen la funcionalitat i l'esterilització. Per últim, s'ha analitzat el procés de mecanitzat del bastidor, on s'exposa els requisits de fabricació i el procés que s'ha de seguir.

Paraules clau: Regeneració neural, estimulació electromagnètica, bobines de Helmholtz, disseny.

Abstract

Disorders and injuries of the nervous system are a problem medicine still can't solve. However, new methods and techniques of neural regeneration are in continuous development. One type is the cell stimulation of neural cultures. This project develops a bioreactor able to electrically and magnetically stimulate those cell cultures. To achieve it, a Helmholtz coil system that creates a magnetic field has been designed to stimulate the cells. Also, this field allows inducing a 500 μA electric current in a closed wire submerged in the culture, obtaining the electric stimulation. In order to hold the coils system and the culture samples, a frame has been mechanically designed, following a list of conditions where the functionality and sterilization stands out. Finally, the machining process of the frame has been analysed, where the specifications and the steps of it are exposed.

Key words: Neural regeneration, electric and magnetic stimulation, Helmholtz coils, design.

Índice de figuras

Figura 1. Bobina.....	2
Figura 2. Esquema del corte longitudinal de una bobina.	3
Figura 3. Bobinas de Helmholtz.	4
Figura 4. Líneas del campo magnético generado por las bobinas de Helmholtz.....	4
Figura 5. Análisis de la uniformidad del campo magnético creado por un par de bobinas de Helmholtz. ...	5
Figura 6. Sistema nervioso humano.	6
Figura 7. Partes de la neurona.	7
Figura 8. Esquema del ensayo de tracción.	10
Figura 9. Gráfica tensión σ - deformación ϵ para material dúctil y frágil.....	10
Figura 10. Vistas superior e isométrica de la placa multipocillo nº1.	12
Figura 11. Disposición de las bobinas en la placa multipocillo nº1.	14
Figura 12. Vistas superior e isométrica de la placa multipocillo nº2.	14
Figura 13. Vistas superior e isométrica de la placa multipocillo nº3.	16
Figura 14. Disposición de las bobinas en la placa multipocillo nº3.	17
Figura 15. Esquema de la posición de las bobinas en las placas.	20
Figura 16. Bandeja de bobinas.	21
Figura 17. Estructura principal del bastidor.	21
Figura 18. Estructura principal del bastidor con las bandejas y placas.	21
Figura 19. Abertura en la parte central de la estructura principal del bastidor.	22
Figura 20. Cierre de la bandeja de bobinas.	22
Figura 21. Hendidura en el cierre de la bandeja de bobinas.	22
Figura 22. Agujeros para la salida de los cables.....	23
Figura 23. Diseño final del bastidor.	23
Figura 24. Generador Philips PM 5131.....	26
Figura 25. Fuente de alimentación DC.....	28
Figura 26. Multímetro.	28
Figura 27. Teslámetro.....	29
Figura 28. Numeración de superficies. Estructura principal.	92
Figura 29. Máquina de fresadora vertical.	97
Figura 30. Accesos de la herramienta a la pieza. Estructura principal.	97
Figura 31. Mordaza y superficies de referencia.....	99
Figura 32. Numeración de superficies. Bandeja.	100
Figura 33. Accesos de la herramienta a la pieza. Bandeja.	103

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Comparación de las propiedades de posibles materiales para la espira.</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 2. Dimensiones de la placa multipocillo nº1.</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 3. Parámetros y resultados del dimensionado para la placa multipocillo nº1.</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 4. Dimensiones de la placa multipocillo nº2.</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 5. Parámetros y resultados del dimensionado para la placa multipocillo nº2.</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 6. Dimensiones de la placa multipocillo nº3.</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 7. Parámetros y resultados del dimensionado para la placa multipocillo nº3.</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 8. Resultados finales de la solución adoptada para 75 Hz.</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 9. Resultados finales de la solución adoptada para 100 Hz.</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 10. Resumen general del mecanizado de la estructura principal.</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 11. Resumen general del mecanizado de la bandeja.</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 12. Condiciones específicas. Corriente eléctrica aplicada a las bobinas.</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 13. Condiciones específicas. Corriente eléctrica inducida en la espira.</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 14. Cuadro de costes de la mano de obra.</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 15. Cuadro de costes de los materiales.</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 16. Cuadro de costes del mecanizado del bastidor.</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 17. Estudio de la intensidad de corriente. Resultados para 50 Hz.</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 18. Estudio de la intensidad de corriente. Resultados para 75 Hz.</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 19. Estudio de la intensidad de corriente. Resultados para 100 Hz.</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 20. Datos iniciales para el cálculo de la solución adoptada.</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 21. Parámetros definidos para la solución adoptada.</i>	<i>84</i>
<i>Tabla 22. Características dimensionales generales. Estructura principal.</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 23. Análisis de la información geométrica. Estructura principal.</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 24. Alternativas generales de procesos – (operación).</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 25. Capacidades y costes de cada proceso.</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 26. Alternativas de procesos-(operación). Estructura principal.</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 27. Selección de máquinas. Estructura principal.</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 28. Agrupación de procesos-(operación) según el acceso. Estructura principal.</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 29. Plan de proceso de mecanizado. Estructura principal.</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 30. Posición de la estructura principal en cada amarre. Estructura principal.</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 31. Características dimensionales generales. Bandeja.</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 32. Análisis de la información geométrica. Bandeja.</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 33. Alternativas de procesos-(operación). Bandeja.</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 34. Selección de máquinas. Bandeja.</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 35. Agrupación de procesos-(operación) según el acceso. Bandeja.</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 36. Plan de proceso de mecanizado. Bandeja.</i>	<i>104</i>

Índice de ecuaciones

(Ec. 1).....	3
(Ec. 2).....	3
(Ec. 3).....	3
(Ec. 4).....	3
(Ec. 5).....	4
(Ec. 6).....	5
(Ec. 7).....	5
(Ec. 8).....	5
(Ec. 9).....	9
(Ec. 10).....	10
(Ec. 11).....	10
(Ec. 12).....	11
(Ec. 13).....	12
(Ec. 14).....	13
(Ec. 15).....	14
(Ec. 16).....	15
(Ec. 17).....	16
(Ec. 18).....	16
(Ec. 19).....	54

Documento nº1.

Memoria.

Índice

Capítulo nº1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETO	1
1.2 ANTECEDENTES, MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN.....	1
Capítulo nº2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS	2
2.1 ELECTROMAGNETISMO.....	2
2.1.1 Campo magnético generado por una corriente eléctrica.....	2
2.1.2 Bobinas de Helmholtz.....	2
2.1.3 Inducción electromagnética.....	5
2.1.5 Efecto Joule.....	5
2.2 REGENERACIÓN NEURAL.....	6
2.2.1 Sistema nervioso. Organización y funciones.....	6
2.2.2 Ingeniería Tisular.....	7
2.2.3 Estimulación electromagnética.....	7
Capítulo nº3: DIMENSIONADO DE LAS BOBINAS.....	9
3.1 PLIEGO DE CONDICIONES.....	9
3.2 ESTUDIO DEL MATERIAL DE LA ESPIRA.....	9
3.3 PROCESO DE DIMENSIONADO.....	11
3.3.1 Placa multipocillo nº1.....	12
3.3.2 Placa multipocillo nº2.....	14
3.4 SOLUCIÓN ADOPTADA.....	16
3.4.1 Placa multipocillo nº3.....	16
Capítulo nº4: DISEÑO DEL BASTIDOR.....	19
4.1 PLIEGO DE CONDICIONES.....	19
4.2 PROCESO DE DISEÑO.....	19
Capítulo nº5: PLANIFICACIÓN DEL MECANIZADO.....	24
5.1 ESTRUCTURA PRINCIPAL.....	24
5.2 BANDEJA.....	25
Capítulo nº6: MONTAJE DEL BIOREACTOR	26
Capítulo nº7: PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	28
7.1 EQUIPOS DE LABORATORIO UTILIZADOS.....	28
7.2 PROCEDIMIENTO.....	29
Capítulo nº8: CONCLUSIONES.....	30
8.1 TRABAJO FUTURO.....	30
REFERENCIAS.....	31

Capítulo nº1: INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETO

El objetivo de este trabajo es el diseño y construcción de un dispositivo, llamado bioreactor, que sea capaz de aplicar estímulos eléctricos y magnéticos sobre un conjunto de cultivos de manera simultánea. Los estímulos magnéticos se han logrado a partir de un sistema de bobinas. Gracias al campo magnético que generan, se consigue inducir una corriente eléctrica en una espira sumergida en el cultivo, por tanto, al estar en contacto con las células, se estimulan de forma eléctrica.

En este documento se expone tanto el proceso realizado como los fundamentos en los que se basa. Se estudian distintas soluciones y analizan los resultados. A esta memoria le acompaña otros documentos, con la finalidad de completar y detallar la información del trabajo y así facilitar su total comprensión. Estos documentos son: *Planos*, *Pliego de Condiciones* y *Presupuesto*, además de los Anejos I, II y III.

1.2 ANTECEDENTES, MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

Existen muchos problemas que la medicina aún no ha conseguido resolver. Uno de ellos es la regeneración de lesiones del tejido nervioso y los trastornos relacionados con él, los cuales se han incrementado en las últimas décadas. La principal razón es el envejecimiento general de la población. Es por ello, que se pretende buscar nuevos métodos y herramientas de regeneración para la reparación de las funciones motoras y sensoriales, además de mejorar la calidad de vida de los pacientes. Algunos de ellos consisten en el trasplante de células de Schwann (CS), las cuales cuentan con un papel fundamental en el crecimiento axonal de las neuronas. (Guardo-Gómez et al., 2022). Sin embargo, otros buscan regenerar directamente las CS dañadas. Esto se pudo conseguir a partir de diversas terapias de estimulación celular, dos de ellas son la eléctrica y magnética. Para desarrollar este método se necesitan profesionales de distintos campos, como pueden ser la física, la ingeniería, la química, la biología, etc. La unión de ellos busca complementar los conocimientos que cada uno puede aportar para desarrollar esta técnica.

Un ejemplo de ello es el trabajo de investigación que se realiza en el Centro de Biomateriales e Ingeniería Tissular (CBIT) de la Universitat Politècnica de València. En él, se investigan diversos métodos de regeneración neural. Entre ellos se encuentra es la estimulación electromagnética de cultivos neurales. Es aquí donde surge este TFG, que pretende mejorar un trabajo anterior, elaborado por el alumno Marcos García Castelló, para avanzar en el desarrollo de este método elaborando un dispositivo que permita perfeccionar la estimulación neural, pero sobre todo las condiciones en las que se realiza.

Capítulo nº2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 ELECTROMAGNETISMO.

Como este trabajo consiste en mejorar el anterior bioreactor, los fundamentos teóricos se basan en el trabajo ya realizado por Marcos García Castelló (García Castelló, 2019). En él se explica detalladamente el proceso de obtención de las expresiones que rigen el campo magnético generado por un par de bobinas Helmholtz. Por tanto, en este apartado se muestran las expresiones que se han extraído para la realización de este trabajo. No obstante, se ha realizado una pequeña explicación de algunos conceptos básicos.

2.1.1 Campo magnético generado por una corriente eléctrica.

Un experimento realizado en 1819 por el físico y químico danés Hans Christian Oersted dio a conocer los efectos magnéticos de una corriente eléctrica. Se observó que una varilla imantada que se encontraba cerca del conductor durante el experimento sufrió un pequeño desplazamiento. Se dedujo entonces que el campo electrostático y el campo magnético eran dos manifestaciones distintas de una sola propiedad de la materia: la carga eléctrica. Por lo que, el magnetismo es un efecto del movimiento de cargas eléctricas. (Solana Quirós, 2011)

Se llegó a la conclusión que, además de crear un campo eléctrico, toda carga eléctrica es capaz de crear un nuevo efecto a su alrededor, el campo magnético. No obstante, para crear dicho efecto es necesario que la carga se encuentre en movimiento, a diferencia del campo eléctrico, que se genera independientemente del estado cinético. De este modo, una carga en movimiento situada en un punto del espacio en un momento dado genera a su alrededor un efecto. Esto hace que si otra carga en movimiento entra en la zona de efecto de la primera carga sufrirá una atracción o repulsión (según el sentido de sus velocidades). Este efecto, por tanto, se da en corrientes eléctricas y se llama inducción o campo magnéticos. (Solana Quirós, 2011).

2.1.2 Bobinas de Helmholtz.

Una bobina es un componente eléctrico formado por varias capas de cable o espiras enrolladas sobre un mismo eje. Por dicho cable circula una corriente eléctrica, con una intensidad I , que genera un campo magnético B a su alrededor. Estas capas se superponen entre sí, creando un diámetro exterior de la bobina y uno interior.



Figura 1. Bobina.

Fuente: <https://www.cetronic.es/>.

En la figura 2 se muestra un esquema de un corte longitudinal de una bobina. Se aprecian las dimensiones de la bobina y la sección circular de cada vuelta de cable sobre el eje central.

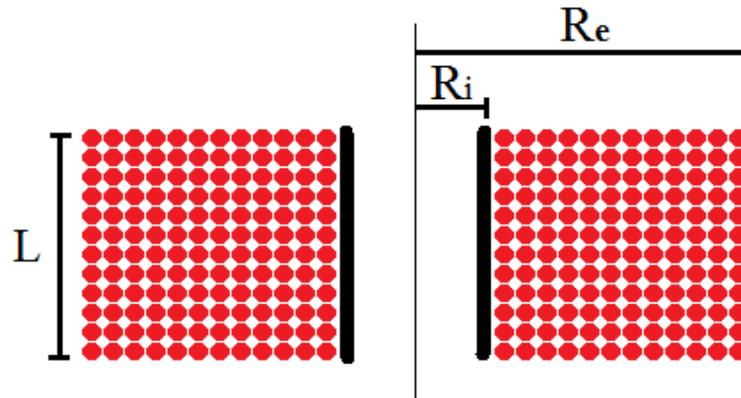


Figura 2. Esquema del corte longitudinal de una bobina.

Del esquema se deduce que la dirección longitudinal contiene N_L espiras, y la dirección radial N_R espiras. Por tanto, las espiras de la bobina se pueden calcular como:

$$N = N_L \cdot N_R \quad (Ec. 1)$$

Donde:

$$N_R = \frac{R_e - R_i}{\phi_{cable}} \quad (Ec. 2)$$

$$N_L = \frac{L}{\phi_{cable}} \quad (Ec. 3)$$

La bobina cuenta con dos radios, exterior R_e e interior R_i . Sin embargo, para simplificar los cálculos, se pueden aproximar a un valor medio entre ellos, el radio medio. (García Castelló, 2019).

$$R_m = \frac{R_e + R_i}{2} \quad (Ec. 4)$$

Para obtener un campo magnético uniforme, el sistema de bobinas de Helmholtz es la mejor opción. (Petkovic & Radic, 2015). Este sistema consiste en dos bobinas circulares paralelas y coaxiales. Ambas tienen las mismas dimensiones, es decir, el mismo radio R , la misma longitud L y el mismo número de espiras N , como se observa en la figura 3.

Por ellas circula una corriente eléctrica con intensidad I . Con esta disposición se logra generar un campo magnético más intenso y uniforme que el generado por una única bobina o solenoide. (Petkovic & Radic, 2015). Las bobinas de Helmholtz son muy usadas en proyectos de investigación, sobre todo cuando es necesaria la aplicación de campos magnéticos de baja frecuencia. (Detroye & Chase, 1994).

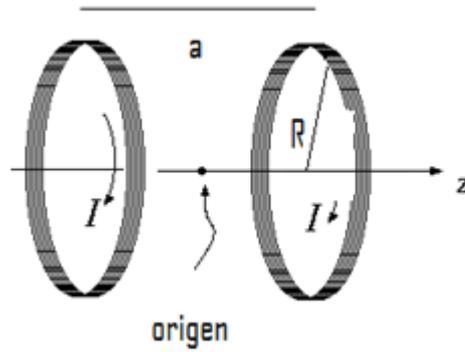


Figura 3. Bobinas de Helmholtz.
Fuente: <https://www.uv.es/>.

El campo magnético generado por las dos bobinas en un punto P situado a una distancia $d = 0$ de una de las bobinas, y a de la otra es el siguiente:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{2 \cdot L} \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{R^2 + L^2}} + \frac{L + a}{\sqrt{R^2 + (L + a)^2}} - \frac{a}{\sqrt{R^2 + a^2}} \right) \quad (\text{Ec. 5})$$

En la figura 4 se presenta las líneas del flujo del campo magnético generado por el par de bobinas.

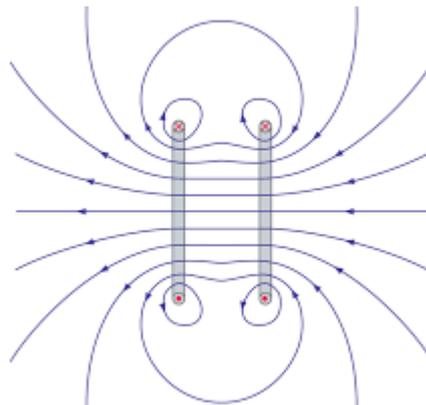


Figura 4. Líneas del campo magnético generado por las bobinas de Helmholtz.
Fuente: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>.

Se puede analizar el grado de uniformidad del campo generado a través de la distancia a que separa el par de bobinas. Como se puede ver en la figura 5, si $a = R_m$, el campo toma valores constantes en el eje de las bobinas, es decir, para un punto cualquiera situado entre las dos bobinas, el campo magnético será igual a otro punto distinto situado en el mismo espacio. No obstante, si $a = 2 \cdot R_m$, el campo magnético pierde intensidad en la zona entre las dos bobinas, y si $a = \frac{R_m}{2}$, el campo alcanza un pico en el centro de la distancia a , pero no se mantiene uniforme en toda ella. (Dep. de Física Teórica, n.d.).

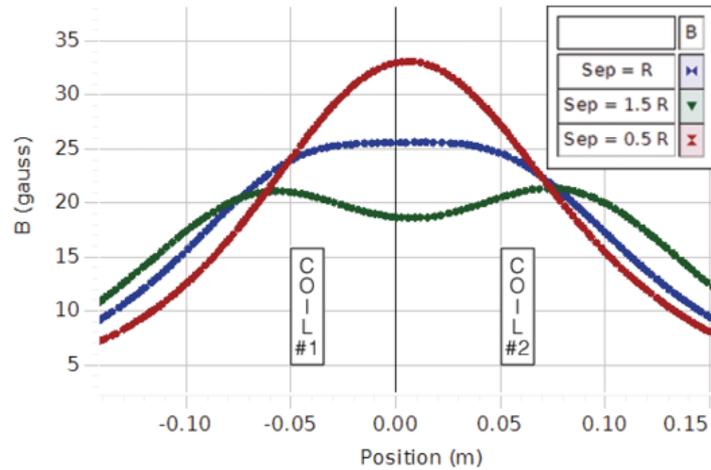


Figura 5. Análisis de la uniformidad del campo magnético creado por un par de bobinas de Helmholtz.
Fuente: <https://www.pasco.com/>.

2.1.3 Inducción electromagnética.

En 1831, el científico británico Michael Faraday realizó una serie de experimentos. En ellos descubrió que se producía una corriente eléctrica en una espira circular cerrada sometida a un campo magnético que varía con el tiempo. Este fenómeno se conoce como inducción electromagnética. (Sanjurjo Navarro, 2011).

De esta manera, a partir del campo magnético generado por las bobinas Helmholtz, se puede inducir una corriente eléctrica con corriente I_{espira} en una espira. Esta corriente depende de la resistencia eléctrica del material que la forma, y también del flujo magnético ϕ que atraviese la espira, que se puede calcular mediante su sección S y el campo B generado en un punto situado en su centro. Además, varía en función de la frecuencia de la corriente eléctrica que circula por las bobinas.

$$\phi = B_{centro} \cdot S_{espira} \quad (Ec. 6)$$

$$I_{ef-espira} \cdot R_{espira} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot \phi_{max} \quad (Ec. 7)$$

2.1.5 Efecto Joule.

El físico inglés James P. Joule estudió el fenómeno del proceso de calentamiento en un material conductor al recorrer por él una corriente eléctrica. Esto se debe a la resistencia de dicho material, ya que las cargas de la corriente chocan con el resistor, haciendo que parte de la energía cinética de las cargas se disipe en forma de energía térmica en el material y su entorno. La potencia P disipada por una bobina es directamente proporcional a su resistencia R y a la intensidad I de la corriente aplicada a cada bobina. (Cuevas Guzmán et al., 2017).

$$P = I^2 \cdot R \quad (Ec. 8)$$

2.2 REGENERACIÓN NEURAL.

2.2.1 Sistema nervioso. Organización y funciones.

El sistema nervioso (SN) humano consta de dos partes, el sistema nervioso central (SNC) y el sistema nervioso periférico (SNP). El SNC está formado por la médula espinal y el encéfalo. Este último está compuesto por el cerebro, el cerebelo y el bulbo raquídeo. El SNC se sitúa en el cráneo y la columna vertebral, constituyendo así el neuroeje. (López-Prieto et al., 1976). Por otra parte, el SNP está formado por los nervios raquídeos, los nervios espinales y los ganglios nerviosos, y su función principal es mantener la comunicación entre el SNC y el resto de los tejidos del organismo. (Fortoul van der Goes, 2017) (Perdomo & Spinel, 2004). En la figura 6 se aprecia las distintas partes del SN y los principales nervios.

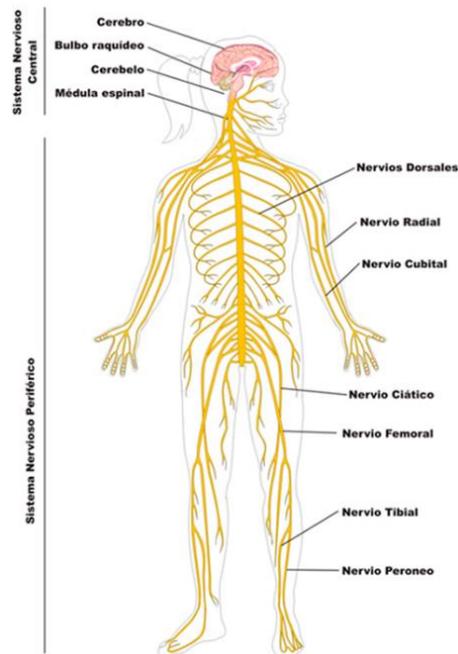


Figura 6. Sistema nervioso humano.
Fuente: <https://www.clikisalud.net/>.

El sistema nervioso es capaz de transmitir las señales del cerebro a los nervios. De esta manera, controla todas las funciones corporales, como son recibir, analizar, transmitir y almacenar información en forma de estímulos. (MedlinePlus, 2022). Estos estímulos pueden ser tanto externos al cuerpo como internos. Esto hace que sea capaz de regular funciones vitales, como la alimentación, el sueño, la respiración, etc. También es origen de otras funciones más abstractas, como es el aprendizaje, el pensamiento o la memoria. (Fortoul van der Goes, 2017).

La neurona es la unidad estructural y funcional que forma el sistema nervioso. Es la célula encargada de transmitir información en forma de señales eléctricas y químicas a través del sistema, haciendo posible las distintas funciones del SN. (Ruiz, 2021). Dentro de la neurona se pueden diferenciar nueve partes distintas, como se muestra en la figura 7.

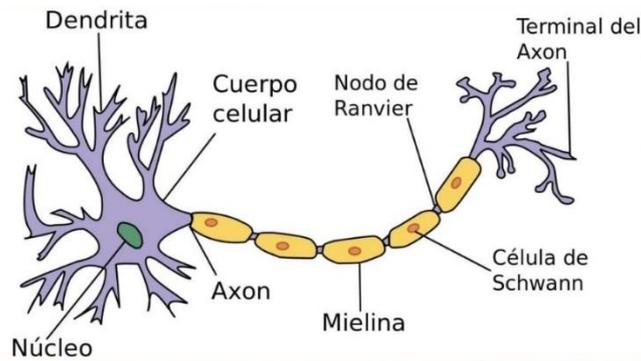


Figura 7. Partes de la neurona.

Fuente: <https://www.psyciencia.com/neurona-que-es-y-cuales-son-sus-partes/>.

Entre sus partes, destaca las células de Schwann (CS), cuya función principal es proteger y mantener viva a la neurona. Las CS se localizan recubriendo el axón de la neurona, el cual conduce la señal recibida por las dendritas hacia la terminal del axón, donde se transmitirá a la neurona contigua. (Ruiz, 2021). En el proceso de creación de la neurona, el axón y las CS desarrollan una relación muy íntima. (Perdomo & Spinel, 2004).

2.2.2 Ingeniería Tisular.

El daño de órganos y tejidos del organismo debido a enfermedades, traumatismos o envejecimiento es un problema muy frecuente que se intenta tratar con fármacos, trasplantes de órganos u otras soluciones como hígados bioartificiales, dializadores renales, etc. Sin embargo, esos tratamientos cuentan con varios problemas, como la compatibilidad entre los órganos artificiales y el organismo o el rechazo inmunológico a los órganos naturales trasplantados. (Ikada, 2006; Orive et al., 2003).

El avance en tecnología y en ciencias de la salud de las últimas décadas han hecho posible la apertura de un nuevo camino que solucione esta problemática. Así surge la ingeniería tisular, en donde se busca regenerar directamente el propio tejido u órgano del paciente. De esta manera se evitan problemas de compatibilidad y baja funcionalidad. (Orive et al., 2003). Esta disciplina consiste en el desarrollo de estructuras biológicas, células y biomateriales, para utilizarlo en tratamientos específicos y así lograr la regeneración o el mantenimiento de los tejidos u órganos dañados. (Orive et al., 2003).

2.2.3 Estimulación electromagnética.

Actualmente, la principal razón de los trastornos del sistema nervioso se debe al envejecimiento de la población. (Guardo-Gómez et al., 2022). Las lesiones en el tejido nervioso afectan a la vida de los pacientes, ya que suponen pérdidas de funciones sensoriales, motoras y autónomas. Existen numerosas terapias celulares. Una de ellas es la estimulación electromagnética para incentivar la regeneración de células de Schwann (CS) *in vitro*, es decir, en un ensayo controlado y realizado fuera del organismo vivo. (Seladi-Schulman, 2019) (Liu et al., 2015). Este enfoque es muy interesante, ya que, como se ha comentado anteriormente, las CS recubren el axón, encargado de conducir las señales eléctricas dentro de la neurona. De esta forma, estimulando las CS se logra regenerar las funciones dañadas por trastornos del tejido nervioso. (Perdomo & Spinel, 2004).

Por un lado, la aplicación de estímulos a partir de campo eléctricos promueve el crecimiento axonal del tejido dañado, aumentando la velocidad y el éxito de la reparación nerviosa al promover directamente el crecimiento axonal. (Koppes et al., 2013). Adicionalmente, la estimulación de lesiones nerviosas por parte de campos magnéticos mejora su regeneración. El resultado son varios factores biológicos, como la síntesis de proteínas o la secreción de factores de crecimiento. (Qian et al., 2019). Por tanto, si se combinan estas dos vías de estimulación, se obtiene como resultado un tratamiento prometedor para los trastornos y lesiones del sistema nervioso.

Capítulo nº3: DIMENSIONADO DE LAS BOBINAS

En este capítulo se expone el proceso que se ha realizado para diseñar el sistema de bobinas del bioreactor.

3.1 PLIEGO DE CONDICIONES.

Previo al trabajo, se ha realizado un estudio de requisitos y necesidades, tanto del campo magnético generado por las bobinas, como de la corriente eléctrica inducida en la espira. Como resultado, se ha obtenido una serie de condiciones recogidas en el Documento nº3: *Pliego de condiciones*.

A continuación, se muestra un resumen de ellas:

- Aumentar la capacidad de muestras de cultivo estimuladas simultáneamente.
- Conseguir reducir en lo posible el tamaño del conjunto.
- La corriente eléctrica aplicada a las bobinas tendrá un valor de 40 mA y su frecuencia estará dentro del rango de 50-100Hz.
- Para lograr un campo magnético uniforme, el radio medio de la bobina será similar a la distancia de separación entre las dos bobinas del par.
- La intensidad de la corriente inducida en la espira será de 500 μ A.

3.2 ESTUDIO DEL MATERIAL DE LA ESPIRA.

En cuanto al material empleado, se ha valorado distintas opciones siguiendo las condiciones explicadas en el Documento nº3: *Pliego de condiciones*. Las características que debe de tener el material de la espira son las siguientes:

- Conductor eléctrico.
- Metal noble, es decir, inerte químicamente.
- Ductilidad alta.

Para medir el nivel de conductividad del material se ha estudiado su resistividad ρ . Esta es la propiedad que define la resistencia eléctrica específica de cada material, dependiendo así de su naturaleza y su temperatura. Por lo que un conductor eléctrico tendrá una baja resistividad. (FÍSICALAB). (Salas Vicente et al., 2019). Se calcula a partir de la expresión:

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \Delta T) \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

- ρ_0 es la resistividad a temperatura estándar o ambiente (20°C).
- α es el coeficiente térmico de resistividad. Es un parámetro del material y su unidad es $^{\circ}\text{C}^{-1}$.
- ΔT es la variación entre la temperatura estándar o ambiente (20°C) y la temperatura de cálculo.

Por otro lado, los metales nobles son aquellos que no reaccionan químicamente con compuestos químicos. Esto hace que sean materiales inertes, químicamente hablando. Como no tienen tendencia (o muy poca) a la corrosión u oxidación, son ideales para formar la espira, ya que ésta irá sumergida en un medio acuoso. (QUÍMICA, n.d.)

En cuanto a la ductilidad, es la capacidad que tienen algunos materiales, como los metales, de sufrir una deformación plástica sin llegar al límite de rotura. (Bozzo & Barbat, 2004) De esta manera, se pueden obtener de él hilos o alambres. (QUÍMICA, n.d.). Esta propiedad se puede medir mediante un ensayo de tracción (figura 8), el cual evalúa la resistencia mecánica del material. Consiste en la deformación progresiva de una probeta mediante unas fuerzas longitudinales aplicadas en los extremos de la probeta. Estas fuerzas aumentan respecto al tiempo. (Salas Vicente et al., 2019).

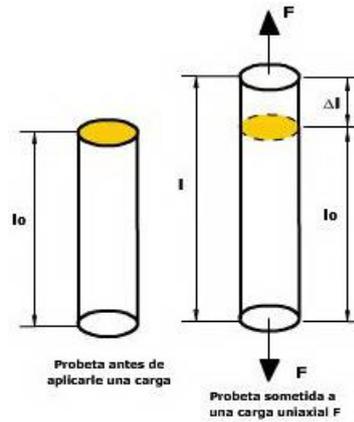


Figura 8. Esquema del ensayo de tracción.
Fuente: <https://www.cienciasfera.com/>.

Como resultado, se obtienen los valores de alargamiento y fuerza. Con ellos, se diseña una gráfica tensión-deformación (figura 9). Esta gráfica se rige por las expresiones siguientes:

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (Ec. 10)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (Ec. 11)$$

Donde:

- σ es la tensión generada.
- F es la fuerza aplicada.
- S_0 es la sección inicial de la probeta.
- ε es la deformación unitaria.
- L_0 es la longitud inicial de la probeta.
- ΔL es el incremento de longitud que ha sufrido la probeta debido a las fuerzas aplicadas.

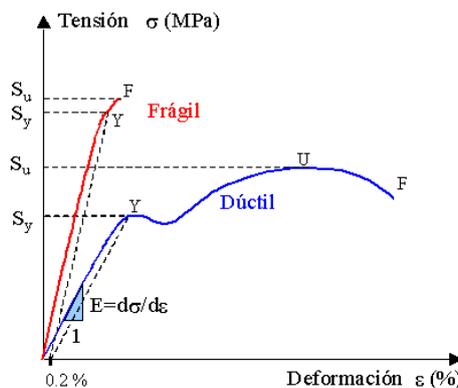


Figura 9. Gráfica tensión σ - deformación ε para material dúctil y frágil.
Fuente: <https://www.uji.es/>.

Como la ductilidad mide el intervalo de deformación plástica previo al límite de rotura, se puede calcular comparando la distancia inicial L_1 entre dos puntos fijos de la probeta sin aplicar ninguna fuerza, y la distancia L_2 entre esos mismos puntos tras haber realizado el ensayo (habiéndose recuperado así la deformación elástica).

$$\% \text{ deformación} = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \cdot 100 \quad (\text{Ec. 12})$$

Por tanto, se necesita un material dúctil para formar el hilo de la espira sin romperse, capaz de soportar una corriente eléctrica sin oponer una gran resistencia e inerte químicamente para no contaminar el cultivo. En la tabla 1 se muestra la comparación de las propiedades de distintos metales dúctiles y conductores que se pueden encontrar en tiendas comerciales especializadas.

Tabla 1. Comparación de las propiedades de posibles materiales para la espira.

Metal	ρ (Ωm , 20-25°C)	Metal noble o inerte
Plata	$1,59 \times 10^{-8}$	Si
Cobre	$1,71 \times 10^{-8}$	Seminoble
Oro	$2,35 \times 10^{-8}$	Si
Aluminio	$2,82 \times 10^{-8}$	No
Hierro	$8,9 \times 10^{-8}$	No
Acero inoxidable 301	72×10^{-8}	No

Tras analizar los datos de la tabla 1, se ha elegido el oro como material de espira por su destacable característica inerte y su baja resistividad. Pese a tener un elevado coste, es un material fácil de trabajar.

3.3 PROCESO DE DIMENSIONADO.

El principal objetivo es lograr generar un campo magnético capaz de inducir una corriente de $500 \mu\text{A}$ en la espira mediante la Ley de Faraday. Como este es el único parámetro definido, se ha llevado a cabo un dimensionado en base a las condiciones comentadas anteriormente. Este consiste en dar diferentes valores los parámetros no definidos, obteniéndose así múltiples resultados. Tras analizarlos, se escoge la solución que más se adapta a las condiciones del trabajo. Los cálculos se han realizado a partir de las expresiones expuestas en el apartado 2.1 del capítulo nº1: *Fundamentos teóricos*, las cuales dependen de los parámetros siguientes:

Características de la espira:

- Resistencia eléctrica R (Ω Ohm), es decir, la oposición que ejerce el material al paso de la corriente eléctrica por él.
- Sección S (mm^2). A su vez, la sección dependerá del diámetro D (mm).
- Intensidad I_{espira} (μA) de la corriente eléctrica inducida en la espira.

Características de la bobina:

- Intensidad I_{bobina} (mA) de la corriente eléctrica aplicada a las bobinas.
- Radio exterior R_e (mm).
- Radio interior R_i (mm).
- Longitud L (mm).
- Separación a (mm) entre las bobinas.
- Número de espiras N de cada bobina, es decir, el número de vueltas de cable bobinado.

Otros parámetros:

- Frecuencia f (Hz) de la corriente aplicada a las bobinas.
- Diámetro \emptyset (mm) del cable empleado para el bobinado.

Para cumplir el requisito de poder estimular varias muestras de cultivo simultáneamente, se ha optado por usar placas multipocillo. Estas placas, también llamadas placas microtituladoras, cuentan con varias cavidades (pocillos) que se emplean a modo de tubos de ensayo. La primera placa multipocillo se fabricó a mano en 1951 por el físico e investigador húngaro Dr. Gyula Takásty. Una epidemia en su país le llevó a hallar una solución a la necesidad de encontrar un método rápido y económico de estudiar varias muestras al mismo tiempo, diseñando así este tipo de placa. Actualmente, su uso está muy extendido y es esencial en laboratorios, como pueden ser los de biología, química y biotecnología. (Drecker, n.d.).

A continuación, se muestra el proceso de dimensionado de las soluciones alternativas. El proceso se ha hecho teniendo en cuenta una intensidad I_{bobina} de corriente aplicada a las bobinas de 40 mA, como se explica con más detalle en el Anejo I: *Estudio sobre la intensidad de corriente aplicada a las bobinas*. También se considera una resistencia eléctrica del material de espira de 0,25 Ω , como se explica en el apartado anterior.

3.3.1 Placa multipocillo nº1.

La primera placa escogida cuenta con las dimensiones y geometría indicadas en la tabla 2 y figura 10.

Tabla 2. Dimensiones de la placa multipocillo nº1.

Largo (mm)	122
Ancho (mm)	80
Alto (mm)	22
Nº pocillos	24
Diámetro del pocillo (mm)	17

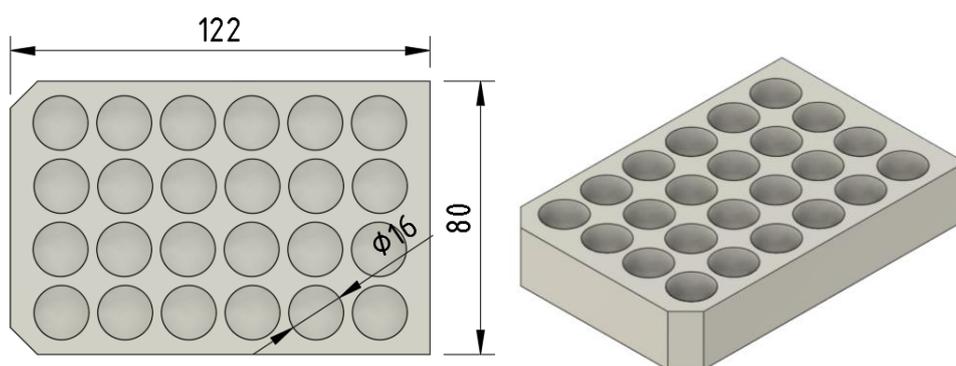


Figura 10. Vistas superior e isométrica de la placa multipocillo nº1.

Para empezar, se ha definido el tamaño de la espira. Este se ve restringido por el tamaño del pocillo, ya que esta debe poder colocarse dentro sin problemas. Por ello, se ha dado un valor de diámetro de la espira de 14 mm, menor al diámetro del pocillo.

$$\emptyset_{espira} = 14 \text{ mm} < \emptyset_{pocillo} = 17 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 13})$$

Por otro lado, para que el campo sea uniforme, el radio medio R_m de la bobina debe ser similar a la separación a entre las dos bobinas del par. Dicha distancia viene marcada por el alto de la placa multipocillo, ya que es la mínima separación que puede haber. Como se busca reducir todo lo posible el tamaño de las bobinas, a será igual al alto de la placa, por tanto:

$$R_m \approx a = \text{alto placa muestras} = 22 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 14})$$

Después, se ha calculado el campo magnético (Ec. 5) generado por el par de bobinas (idénticas), para una corriente aplicada de intensidad $I_{bobina} = 40 \text{ mA}$ y $d = 0$. Esta expresión depende de varias variables: radio medio, separación entre bobinas, longitud de cada bobina y número de espiras N . Como solo se ha definido el radio medio y la separación, el cálculo del campo magnético se ha realizado para distintas longitudes de la bobina.

Luego, se ha determinado el número de espiras N de forma geométrica para cada longitud de bobina, (Ec. 1) (Ec. 2) (Ec. 3). Para ello se ha definido los valores de radio exterior R_e y radio interior R_i (Ec. 4) en función del radio medio R_m ya definido.

Por último, se ha obtenido la intensidad I_{espira} de la corriente eléctrica inducida (Ec. 6) (Ec. 7) para cada campo magnético calculado.

Como resumen, la tabla 3 muestra todos los parámetros definidos en el proceso, junto a los resultados de los cálculos comentados. Se ha considerado un diámetro de cable de 0,5 mm.

Tabla 3. Parámetros y resultados del dimensionado para la placa multipocillo n°1.

f (Hz)	R_e	R_i	L (mm)	N (vueltas)	B (mT)	I_{espira} (μA)
50	30	14	10	640	0,853689	261
			15	960	1,1513	291
	34	10	10	960	1,28053	324
			15	1440	1,7269	436
75	30	14	10	640	0,85368	324
			15	960	1,1513	436
	34	10	10	960	1,2805	485
			15	1440	1,7269	655
100	30	14	10	640	0,8536	431
			15	960	1,1513	582
	34	10	10	960	1,2805	647
			15	1440	1,7269	873

Es posible lograr inducir una intensidad I_{espira} de 655 μA en la espira usando una bobina de dimensiones $R_e = 34$, $R_i = 10$ y $L = 15$ mm, y una frecuencia de 75 Hz. En la figura 11 se muestra la mejor disposición que se puede conseguir en la placa con esta bobina.

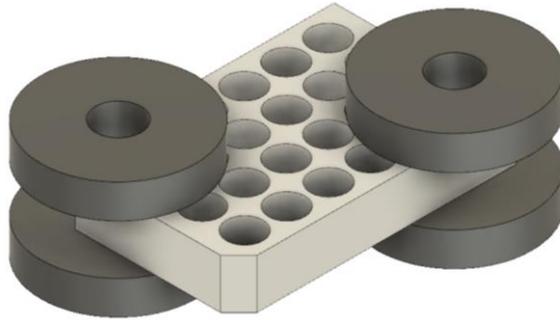


Figura 11. Disposición de las bobinas en la placa multipocillo nº1.

Debido a su tamaño, solo se pueden colocar 2 pares de bobinas en la placa, pudiendo estimular solo dos pocillos con cultivo. Así pues, para lograr un mayor número de cultivos estimulados habría que usar varias placas y, además, el resto de los pocillos libres de bobinas quedarían inutilizados. Por tanto, se descarta esta solución para intentar alcanzar un menor tamaño de las bobinas.

3.3.2 Placa multipocillo nº2.

Como la separación a entre las dos bobinas del par restringe el tamaño de la bobina (Ec. 14), se ha buscado una placa cuya altura sea menor que la anterior, haciendo así que a también lo sea. En cuanto al pocillo, en este caso es rectangular. Sus dimensiones y geometría se indican en la tabla 4 y en la figura 12.

Tabla 4. Dimensiones de la placa multipocillo nº2.

Largo (mm)	76
Ancho (mm)	24
Alto (mm)	13
Nº pocillos	8
Largo del pocillo (mm)	17,9
Ancho del pocillo (mm)	10

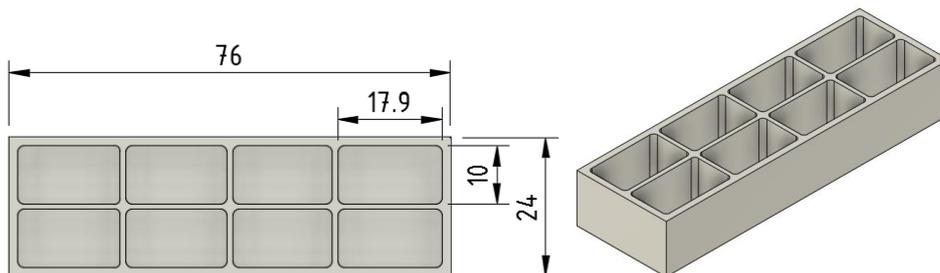


Figura 12. Vistas superior e isométrica de la placa multipocillo nº2.

El proceso de dimensionado adaptado a esta placa se ha realizado del mismo modo que para la anterior. Primero, se ha definido el tamaño de la espira en función del tamaño del pocillo. Como es rectangular, la espira se verá limitada por el lado del pocillo más pequeño, el ancho.

$$\Phi_{\text{espira}} = 8 \text{ mm} < \text{Ancho pocillo} = 10 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 15})$$

Luego, se ha dado el valor al radio medio siguiendo la deducción explicada para la expresión (Ec. 14).

$$R_m \approx a = \text{alto placa muestras} = 13 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 16})$$

Por último, se han definido los radios exterior R_e e interior R_i (Ec. 4) (Ec. 16), y el número N de espiras (Ec. 1) (Ec. 2) (Ec. 3).

Siguiendo los pasos explicados para las placas multipocillo nº1 y 2, se obtiene la tabla 5. En ella se muestran parámetros definidos en el proceso, junto a los resultados de los cálculos.

Tabla 5. Parámetros y resultados del dimensionado para la placa multipocillo nº2.

f (Hz)	R_e	R_i	L (mm)	N (vueltas)	B (mT)	I_{espira} (μA)
50	15	11	5	80	0,144	12
			9	144	0,228	18
	20	6	5	280	0,505	41
			9	504	0,801	64
75	15	11	5	80	0,144	18
			9	144	0,228	28
	20	6	5	289	0,505	62
			9	504	0,801	96
100	15	11	5	80	0,144	23
			9	144	0,228	37
	20	6	5	280	0,505	82
			9	504	0,801	129

Se ha logrado reducir el tamaño de la bobina, sin embargo, al ser la espira muy pequeña, la intensidad I_{espira} de corriente inducida en ella es demasiado baja. Por tanto, esta solución se ha descartado.

Pese a que no cumplen las condiciones, las soluciones alternativas han servido para extraer las siguientes conclusiones:

- El tamaño de la espira se ve muy restringido por la altura de la placa. Por un lado, si la altura es muy grande, la distancia a que separa las bobinas también lo será, y como resultado, el radio medio R_m aumentará. Un tamaño de las bobinas excesivo impedirá colocar varias bobinas en una única placa. Sin embargo, un tamaño de bobina demasiado pequeño deriva en un número N de espiras más bajo y no se podrá lograr generar el campo magnético B necesario para inducir en la espira la intensidad I_{espira} corriente deseada.
- El pocillo debe permitir un tamaño de la espira suficiente para lograr la intensidad inducida en ella, ya que son directamente proporcionales (Ec. 6) (Ec. 7).

3.4 SOLUCIÓN ADOPTADA.

3.4.1 Placa multipocillo nº3.

La solución adoptada consiste en una placa con la misma altura que la nº1, en cambio el tamaño del pocillo es mayor. Esto posibilita aumentar el diámetro de la espira y, en consecuencia, aumentar la intensidad inducida en ella (Ec. 6) (Ec. 7). Como el campo magnético necesario disminuye, el número N de espiras necesarias también, consiguiendo así reducir el tamaño de la bobina. Las dimensiones y geometría de la placa multipocillo nº3 se indican en la tabla 6 y figura 13. No obstante, en el Documento nº2: *Planos*, se presentan los planos suministrados por el fabricante de la placa.

Tabla 6. Dimensiones de la placa multipocillo nº3.

Largo (mm)	127,6
Ancho (mm)	85,6
Alto (mm)	22
Nº pocillos	12
Diámetro del pocillo (mm)	21
Profundidad del pocillo (mm)	15,7

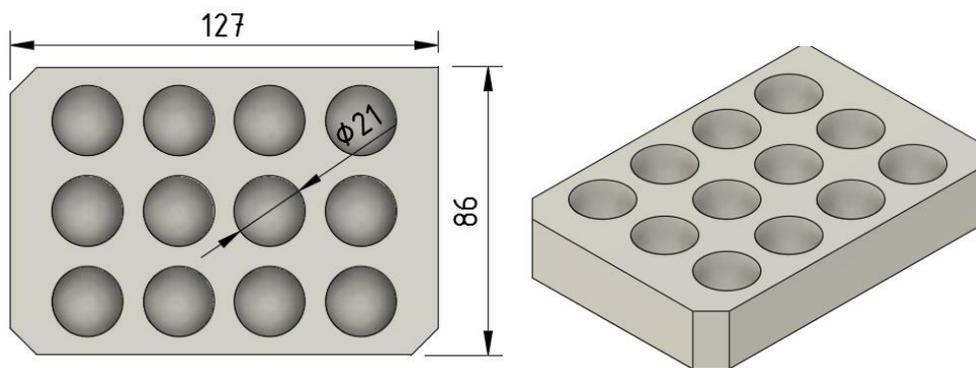


Figura 13. Vistas superior e isométrica de la placa multipocillo nº3.

Se han definido los parámetros del mismo modo que las soluciones alternativas. El diámetro de la espira y el radio medio de la bobina serán:

$$\phi_{espira} = 20 \text{ mm} < \phi_{pocillo} = 21 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 17})$$

$$R_m \approx a = \text{alto placa muestras} = 22 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 18})$$

También se han definido el número N de espiras y los radios exterior R_e e interior R_i . Una vez definidos los parámetros, se ha calculado el campo magnético generado por el par de bobinas (para $d = 0$) y la correspondiente intensidad I_{espira} de la corriente inducida para cada valor.

Como resumen, la tabla 7 muestra todos los parámetros definidos en el proceso, junto a los resultados de los cálculos comentados. Se ha considerado un diámetro de cable de 0,5 mm.

Tabla 7. Parámetros y resultados del dimensionado para la placa multipocillo nº3.

f (Hz)	R_e	R_i	L (mm)	N (vueltas)	B (mT)	I_{espira} (μA)
50	24	14	10	400	0,571	249
			15	600	0,756	329
	28	16	10	480	0,64	279
			15	720	0,863	376
75	24	14	10	400	0,571	373
			15	600	0,756	494
	28	16	10	480	0,64	418
			15	720	0,863	564
100	24	14	10	400	0,571	498
			15	600	0,756	658
	28	16	10	480	0,64	557
			15	720	0,863	752

Las dimensiones más reducidas con las que se puede lograr una intensidad inducida cercana a la deseada son las siguientes. El radio medio no es igual a la distancia a , sino similar.

$$R_e = 24; \quad R_i = 14; \quad R_m = 19; \quad L = 15 \text{ mm}$$

La disposición de las bobinas en la placa se muestra en la figura 14. Se ha conseguido aumentar el número de muestras estimuladas simultáneamente a 4, cumpliendo así una de las condiciones principales.

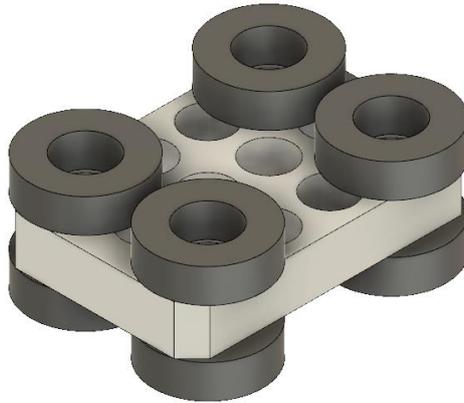


Figura 14. Disposición de las bobinas en la placa multipocillo nº3.

Se ha escogido la frecuencia de 75 Hz, ya que deja un margen de aumento en el caso de querer aumentar la intensidad I_{espira} en el laboratorio. Para esta frecuencia, el campo magnético B creado por el par de bobinas y la intensidad inducida en la espira son:

$$B = 0,756 \text{ mT}; \quad I_{espira} = 494 \mu A$$

La potencia disipada en forma de calor por el efecto Joule (Ec. 8) es:

$$P = 9,86 \text{ mW}$$

A la hora de fabricarla, se ha hecho con un cable de bobinado de 0,4 mm de diámetro, en vez del valor simbólico considerado de 0,5 mm. De este modo, se ha logrado aumentar el número N de espiras para el mismo tamaño de bobina, aumentando así el campo magnético generado

por el par de ellas y la intensidad de corriente inducida en la espira. Los resultados de la bobina final se explican con más detalle en el Anejo II: *Cálculos de la solución adoptada*. Sin embargo, en las tablas 8 y 9 se muestra un resumen de ellos.

Tabla 8. Resultados finales de la solución adoptada para 75 Hz.

Material espira	Oro
R_{oro} (Ω)	0,25
ϕ_{espira} (mm)	20
a (mm)	22
R_e (mm)	24
R_i (mm)	14
L (mm)	15
ϕ_{cable} (mm)	0,4
N (espiras)	650
f (Hz)	75
B (mT)	0,819
I_{espira} (μA)	534,7
P (mW)	16,592

Tabla 9. Resultados finales de la solución adoptada para 100 Hz.

B (mT)	0,819
I_{espira} (μA)	712,933
P (mW)	16,592

Esta solución cumple con las condiciones establecidas, ya que se puede alcanzar la intensidad deseada en la espira, pudiendo estimular varias muestras de cultivo a la vez y operando con frecuencias entre 50 y 100 Hz.

Capítulo nº4: DISEÑO DEL BASTIDOR

Tras haber dimensionado las bobinas que se van a usar para estimular los cultivos, se ha realizado un diseño de un bastidor capaz de sujetarlas correctamente, junto a la placa multipocillo. La finalidad del bastidor es asegurar el funcionamiento del biorreactor, desde un punto de vista funcional y cómodo de usar.

El anterior bioreactor cuenta con algunos problemas en cuanto a su manipulación. Es por eso por lo que, en el proceso del nuevo diseño, han de tenerse presentes e intentar solventarlos. Estos problemas son:

- Áreas del material que han sufrido deformaciones y dificultan el anclaje de las distintas piezas.
- Solo permite estimular 1 muestra de cultivo.
- Dificultad de esterilización y contaminación en zonas de unión entre piezas, sobre todo en los elementos externos que las unen.

Para aumentar el número de muestras de cultivo estimuladas de forma simultánea, se ha decidido usar 2 placas multipocillo. Por tanto, como en cada placa se colocan 8 bobinas (4 pares) (figura 14), el conjunto de dos placas tendrá 16 bobinas en total (8 pares). De este modo, se pueden estimular 8 cultivos a la vez.

4.1 PLIEGO DE CONDICIONES.

Con el fin de mejorar el antiguo bioreactor, se ha planteado, con ayuda del personal de laboratorio, varias condiciones y objetivos explicados en el Documento nº3: *Pliego de Condiciones*. A continuación, se muestra un resumen de ellos:

- El material del bastidor es el POM (Polioximetileno).
- Se debe reducir su tamaño todo lo posible.
- Se debe evitar el uso de elementos externos de unión.
- Las geometrías sencillas serán prioritarias.
- Se deben usar herramientas de diseño para evitar deformación del material.
- Las bobinas deben estar alineadas con el pocillo donde se pone la muestra de cultivo.

4.2 PROCESO DE DISEÑO.

Como es un bioreactor fruto de las necesidades específicas de un proyecto de investigación del CBIT, su diseño se ha realizado desde un punto de vista más personalizado. Es decir, no se ha pensado en su fabricación en serie.

Para no usar elementos externos de unión (tornillos, pasadores, remaches, etc.) entre las piezas, se ha propuesto mecanizar el bastidor a partir de un bloque de material. Se ha escogido un sistema de “cajones” o “estantes”, donde las bobinas van situadas dentro de una estructura principal. En medio se sitúan las placas multipocillo. Así se logra que las muestras de cultivo se ubiquen entre las bobinas de cada par, donde el campo magnético generado es uniforme.

El primer paso ha sido definir la posición de las bobinas respecto a las placas. El eje de cada par de bobinas debe coincidir con el del pocillo que contiene la muestra de cultivo, como en la

figura 14). De este modo, el flujo magnético que atraviese la espira sumergida en el cultivo será lo más uniforme y máximo posible. Con las medidas de la placa multipocillo indicadas en los planos suministrados por el fabricante y las dimensiones de las bobinas, se obtiene el esquema presentado en la figura 15.

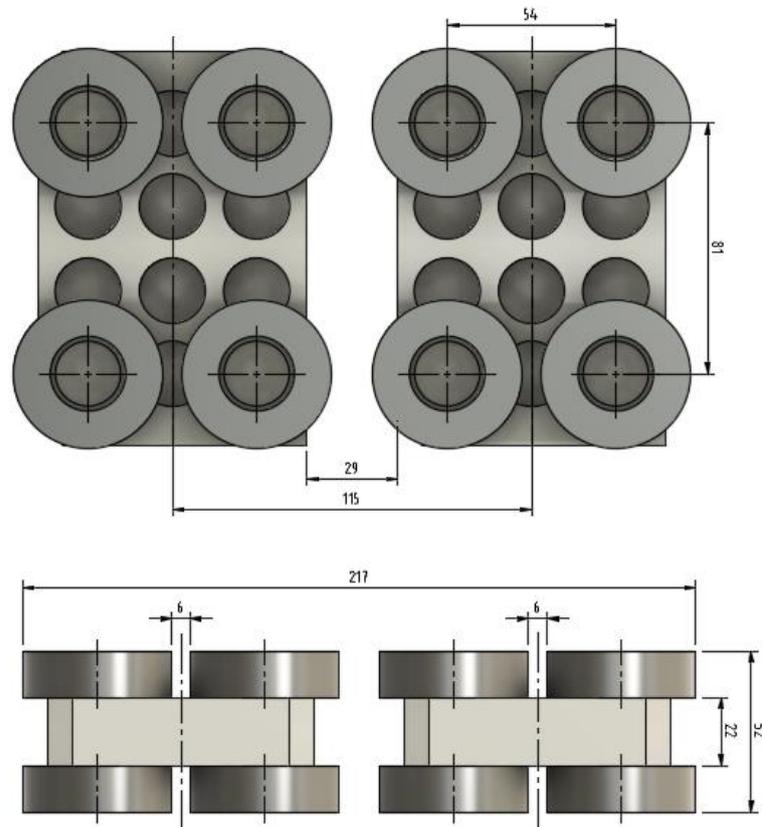


Figura 15. Esquema de la posición de las bobinas en las placas.

El segundo paso es colocar las bobinas y las placas en la posición ya definida en la estructura principal. Como se ha comentado anteriormente, el bastidor se ha diseñado a partir de un bloque de material para evitar elementos externos de unión. Por tanto, se han hecho tres ranuras en dicho bloque. En dos de ellas, la superior y la inferior, van situadas las bobinas (8 en cada ranura), mientras que en la del medio van las placas multipocillo. Fijando así la disposición mostrada en la figura 15.

Las placas se pueden colocar y extraer fácilmente de la estructura, en cambio, es inviable colocar cada una de las 16 bobinas dentro de la ranura de forma correcta y bien posicionadas. Como solución, se ha diseñado una bandeja para cada ranura de bobinas. Esta bandeja permite colocar al mismo tiempo las 8 bobinas de cada ranura. Asimismo, se ha diseñado un sistema de sujeción para asegurarse que las bobinas están en la posición correcta. Este consiste en una pequeña disminución del espesor de la bandeja en el área ocupada por cada bobina, evitando así geometrías complejas como ganchos, cuñas, etc. En la figura 16 se muestra el diseño de la bandeja, donde se colocan 8 bobinas con las posiciones y distancias definidas en la figura 15.

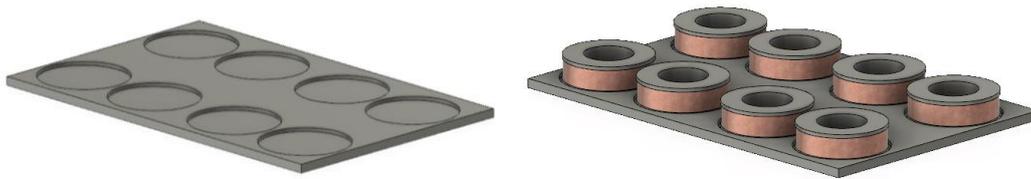


Figura 16. Bandeja de bobinas.

Ahora solo es necesario que las ranuras de la estructura principal donde se sitúan las bobinas y placas cumplan las posiciones y distancias de la figura 15, para asegurar que el flujo del campo magnético generado sea el máximo posible en la espira sumergida en el cultivo. Así se obtiene el bastidor que sujeta todo el conjunto y asegura su correcto funcionamiento (figuras 17 y 18).

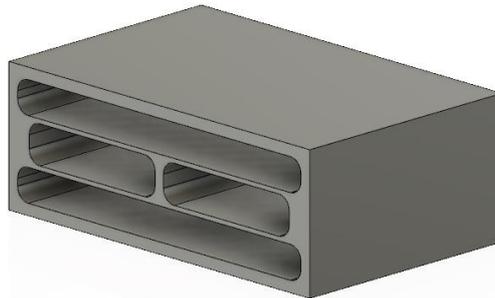


Figura 17. Estructura principal del bastidor.

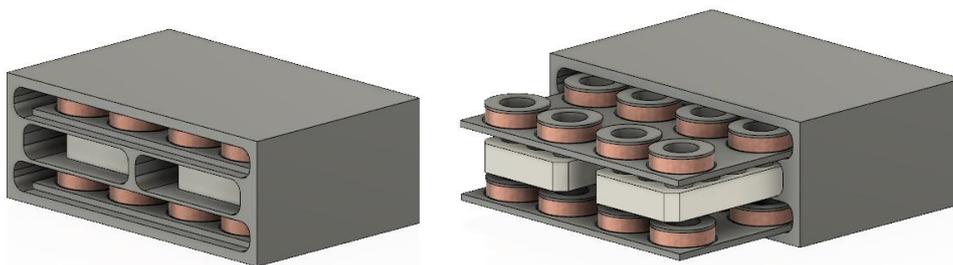


Figura 18. Estructura principal del bastidor con las bandejas y placas.

El tamaño de las ranuras corresponde a las dimensiones de las placas y de las bandejas, evitando así que se muevan y desalineen. Esto se puede ver con más detalle en el Documento nº2: *Planos*. Cabe destacar que el espesor del material que se encuentra entre las placas y las bobinas se ha intentado que sea el menor posible, para así no modificar la uniformidad del campo magnético generado. No obstante, se ha minimizado las zonas con espesor pequeño, ya que tienden a deformarse.

Con este diseño se ha logrado las condiciones y objetivos propuestos. Sin embargo, para facilitar su uso se han añadido varias modificaciones. A fin de facilitar la extracción de las placas, se ha incluido una pequeña abertura en la parte central de la estructura principal. De esta forma se evitará inclinar el bastidor para extraer las placas y será más cómodo.

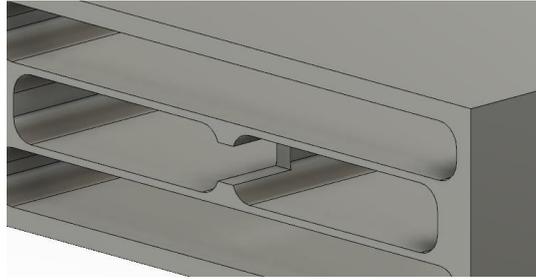


Figura 19. Abertura en la parte central de la estructura principal del bastidor.

A la hora de esterilizar el bastidor, sería interesante poder hacerlo sin la necesidad de desarmar todas las bobinas de su bandeja, ya que cada bobina irá conectada a la fuente de corriente. De este modo de cada bobina saldrán dos cables para la conexión, por tanto, el proceso de esterilización de las piezas del bastidor se dificulta si cada vez se ha de extraer y luego volver a colocar las 16 bobinas con sus respectivos cables. Para solucionarlo, se ha añadido a las bandejas un cierre hermético para poder esterilizar el conjunto sin la necesidad de extraer las bandejas (figura 20). Aunque este cierre se puede abrir si se desea limpiar todas las piezas.

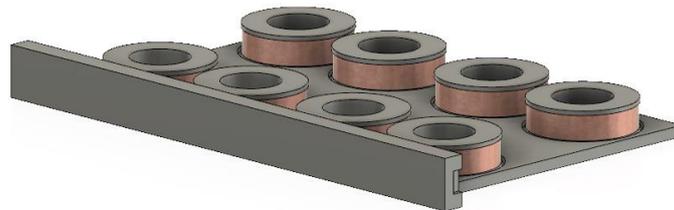


Figura 20. Cierre de la bandeja de bobinas.

Además se ha añadido una pequeña hendidura, de 5 mm de ancho y 2 mm de profundidad (figura 21), en cada extremo del cierre para facilitar su uso. En consecuencia, se ha añadido a la estructura principal dos aberturas (una en cada extremo) en ambas ranuras de las bobinas para posibilitar el cierre.

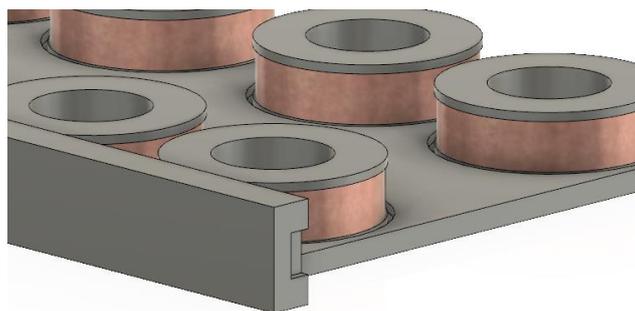


Figura 21. Hendidura en el cierre de la bandeja de bobinas.

Por último, se han hecho dos pequeños agujeros para la salida de los cables mencionados (figura 22). Este agujero se puede sellar posteriormente en el laboratorio para mantener el cierre hermético. En resumen, el diseño final del bastidor se muestra en la figura 23.

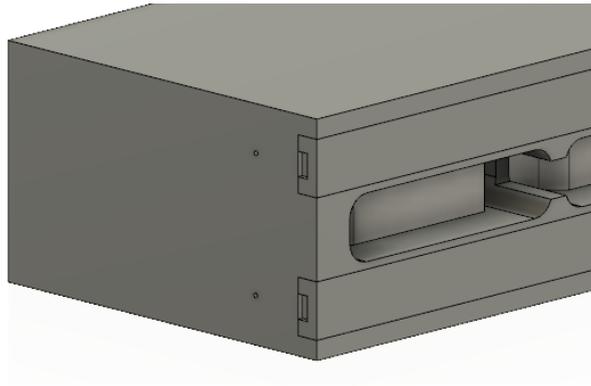


Figura 22. Agujeros para la salida de los cables.



Figura 23. Diseño final del bastidor.

Las dimensiones del bastidor son 25,8 cm de ancho, 9,5 cm de alto y 16,5 cm de profundo.

Capítulo nº5: PLANIFICACIÓN DEL MECANIZADO

En este capítulo se presenta un resumen del resultado del análisis de la planificación del mecanizado del bastidor. No obstante, en el Anejo III: *Planificación del mecanizado*, se explica más detalladamente el proceso que se ha realizado, siguiendo los criterios y pasos marcados por el libro *Planificación de procesos de mecanizado*, escrito por profesores de la Universitat Politècnica de València. (González & Meseguer Calas, 2015).

Se ha analizado el mecanizado de las dos piezas distintas que conforman el bastidor: la estructura principal y las bandejas.

5.1 ESTRUCTURA PRINCIPAL.

Tras estudiar todos los posibles procesos-(operación) que se pueden realizar en la pieza, según sus características geométricas, se ha llegado al resultado mostrado en la tabla 10.

Tabla 10. Resumen general del mecanizado de la estructura principal.

MÁQUINA	UTILLAJE	ACCESO	SUPERFICIE	PROCESO
FRESADORA VERTICAL	Mordaza	D	6-7-8-9-10	Fresado frontal-periférico (general) [D y A]
			11-12-13-14-15	Fresado frontal-periférico (general) [D y A]
			16-17-18-19-20	Fresado frontal-periférico (general) [D y A]
			21-22-23	Fresado frontal-periférico (general) [D y A]
			24-25-26-27-28	Fresado frontal (planeado) [A]
			29	Fresado frontal (planeado) [A]
			32	Fresado frontal (planeado) [D y A]
		PI	30-31	Fresado (taladrado) [D]
			4	Fresado frontal (planeado) [A]
		S	1	Fresado frontal (planeado) [A]
		I	2	Fresado frontal (planeado) [A]
		PD	3	Fresado frontal (planeado) [A]
		T	5	Fresado frontal (planeado) [A]

La herramienta empleada es la fresadora vertical. Con ella se realiza todas las operaciones del mecanizado. Por otro lado, para todos los procesos, el amarre utilizado es la mordaza, debido a su versatilidad en piezas prismáticas y bajo coste. Los accesos de la herramienta a la pieza y las superficies de esta se indican en más detalle en el Anejo III.

5.2 BANDEJA.

En el bastidor encontramos dos bandejas idénticas, por lo tanto, se realizará dos veces el mismo mecanizado. Del mismo modo que para la estructura principal, se muestra un resumen del resultado del proceso de análisis de su mecanizado en la tabla 11.

Tabla 11. Resumen general del mecanizado de la bandeja.

MÁQUINA	UTILLAJE	ACCESO	SUPERFICIE	PROCESO
FRESADORA VERTICAL	Bridas	PD	2	Fresado frontal–periférico (general) [D y A]
			17	Fresado frontal–periférico (general) [D y A]
		PI	4	Fresado frontal–periférico (general) [D y A]
			16	Fresado frontal–periférico (general) [D y A]
		S	6-7	Fresado frontal–periférico (general) [D y A]
			8-9-10-11-12-13-14-15	Fresado frontal–periférico (general) [D y A]
			18	Fresado frontal (planeado) [A]
		T	1	Fresado frontal (planeado) [A]
		D	3	Fresado frontal (planeado) [A]
			6	Fresado frontal (planeado) [A]
		I	5	Fresado frontal (planeado) [A]

Al igual que en el primer mecanizado, la herramienta usada es la fresadora vertical. Ahora bien, debido a la forma y dimensiones de la bandeja, el utillaje de amarre empleado en todos los procesos son las bridas. Esto se debe a los problemas de deformaciones o roturas que pueden aparecer si se usa la mordaza, ya que algunas dimensiones de la pieza son mucho mayores que otras. Por ejemplo, el ancho de la pieza (25,8 cm) es más de 10 veces mayor que su altura (2,3 cm). Esto puede causar dificultades en la sujeción de la pieza para ciertos accesos de la herramienta a ella.

Capítulo nº6: MONTAJE DEL BIOREACTOR

El conjunto de bobinas ha sido fabricado por la empresa Millenium XXI. Se ha optado por esta vía ya que cada bobina cuenta con 650 vueltas y unas dimensiones relativamente pequeñas, por lo que fabricarlas en la universidad complicaría notablemente el proceso al no contar con el equipo adecuado. Además, como es una bobina totalmente personalizada, el carrete que sujeta el cable también lo es. Esto hace completamente imposible adquirirlo en una tienda comercial de materiales, por lo que la empresa también se encargó de fabricar estos carretes. Como se indica en el capítulo nº4, el número total es de 16 bobinas.

Por otro lado, el mecanizado del bastidor se ha llevado a cabo en la empresa Mecanizados S.A. En un primer instante se planteó realizarlo en los laboratorios del CBIT ya que sí podría ser viable. No obstante, no se encontraban disponibles. Esto, añadido a las necesidades dimensionales del bastidor (como tolerancias o rugosidades) hizo que se decidiera encargar el mecanizado a una empresa especializada y que ya había trabajado con el centro.

Una vez fabricadas todas sus partes, se debe montar el bioreactor. Para ello se necesita una fuente de alimentación o generador para aplicar la corriente a las bobinas e iniciar la actividad del biorreactor. El disponible en el laboratorio es el generador PM 5131, de la marca *Philips* (figura 24). Con él también es posible regular la frecuencia de la corriente, en concreto, este modelo es capaz de proporcionar una corriente con frecuencias entre 0,1 Hz y 2 MHz.



Figura 24. Generador Philips PM 5131.

El montaje debe seguir los siguientes pasos:

1. Colocar correctamente las bobinas en las bandejas. Para ello, se ha de asegurar que el sentido de bobinado sea el mismo en las 16 bobinas. De este modo, los campos generados por ellas no se anularán por su bobina pareja, si no que se reforzarán.
2. Empalmar los cables de cada bandeja. Por un lado, se unirán los cables del polo positivo, y por otro, los del negativo. Como resultado, se obtendrá en cada bandeja dos cables, uno positivo y otro negativo. En total, 4 cables.
3. Introducir las bandejas en la estructura principal del bastidor, con especial atención a sacar con cuidado los cables de cada bandeja por el agujero correspondiente.
4. Una vez cerradas las bandejas, se empalma los cables de cada una. Finalmente, se tiene 2 cables, los cuales se conectan al generador.

5. Introducir las espiras en los pocillos correspondientes de las placas con las muestras de cultivo.
6. Situar las placas multipocillo en sus ranuras del bastidor.
7. Conectar el generador o fuente de alimentación a los dos cables finales y escoger la intensidad I_{bobina} y frecuencia f de corriente deseada.

Una vez realizado estos pasos, el bioreactor está listo para su funcionamiento.

Capítulo nº7: PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Se ha comprobado que el campo magnético generado por las bobinas es el calculado. Para ello, la forma más sencilla ha sido medir el campo creado por una de ellas. Se ha realizado en un laboratorio de la universidad.

7.1 EQUIPOS DE LABORATORIO UTILIZADOS.

Para realizar la prueba, se han empleado los siguientes equipos proporcionados por la Universitat Politècnica de València:

Fuente de alimentación DC o de corriente continua.

Este dispositivo es capaz de convertir la corriente de la red eléctrica en una señal de corriente continua, que se puede aplicar al circuito que se desee (figura 25). En este caso, la bobina de estudio.



Figura 25. Fuente de alimentación DC.
Fuente: <https://www.compelelectronica.com/>.

Multímetro.

Es un instrumento que permite medir los distintos parámetros eléctricos, como la resistencia, la corriente, etc. Esta corriente puede ser tanto alterna, como continua. Hoy en día, el más usado es el digital (figura 26), sin embargo, los primeros multímetros eran analógicos.

Para esta prueba, se ha utilizado el multímetro a modo de amperímetro. Cuando trabaja así, se puede medir la intensidad de la corriente de un circuito conectándolo en serie al instrumento. Es posible medir esta intensidad en varias escalas, como son la de 1 A, 10 mA o 100 mA.



Figura 26. Multímetro.
Fuente: Revista española de electrónica. <https://www.redeweb.com/>.

Teslámetro.

Para medir la fuerza o el campo magnético generado por un circuito se puede emplear un teslámetro o magnetómetro (figura 27). Con ayuda de una sonda, se puede medir el campo generado en el punto que se desee estudiar.



Figura 27. Teslámetro.

Fuente: <https://www.3bscientific.com/>.

7.2 PROCEDIMIENTO.

En primer lugar, se ha conectado la bobina en serie a la fuente de alimentación y se ha aplicado una corriente eléctrica de intensidad I a la bobina. Para poder regular esta intensidad se ha utilizado el multímetro, ya que cuenta con más precisión que la fuente de alimentación, otorgándole un valor de 40 mA. Este valor es el utilizado en los cálculos. De esta manera, ya se ha puesto en marcha la bobina.

El siguiente paso ha sido medir el campo magnético generado con el teslámetro. Como los resultados del Capítulo nº3 muestran el campo creado en un punto cuya distancia a la bobina es $d = 0$, se ha colocado la sonda en el borde de la bobina. Cabe destacar que este punto se encuentra en el eje central, por lo que la sonda también. Al principio surgieron problemas, ya que el valor medido por el teslámetro presentaba incongruencias. Tras hacer una pequeña prueba con un solenoide modelo del laboratorio, se llegó a la conclusión que la sonda utilizada no funcionaba correctamente. Es por ello por lo que se decidió cambiar la sonda y repetir la medición, en la que sí se obtuvo el resultado esperado, no encontrándose desviaciones entre el valor experimental y el teórico superiores al 15%.

Capítulo nº8: CONCLUSIONES

En este trabajo se ha planteado los problemas encontrados en el anterior bioreactor, y, por tanto, los objetivos y las condiciones que se han de cumplir en este nuevo diseño. Se ha calculado y desarrollado un sistema de bobinas Helmholtz, además de analizarse distintas alternativas y justificar de la solución adoptada. Por otra parte, se ha llevado a cabo el diseño mecánico de un bastidor para sujetar dicho sistema y asegurar su correcto funcionamiento y analizado el proceso de su mecanizado.

Se han obtenido las siguientes conclusiones:

- Las dimensiones de una bobina tienen un claro papel dentro del campo magnético B que genera, ya que cuanto mayor es, el número N de espiras aumenta.
- Al aumentar la frecuencia de la corriente aplicada a las bobinas se obtiene un campo B más intenso. Pero al mismo tiempo la potencia disipada en calor es mayor. Es por ello, que es aconsejable condicionar los cálculos y diseñar una bobina capaz de generar el campo B deseado utilizando frecuencias bajas o cercanas a la de la red eléctrica. De este modo se asegura que el bioreactor puede trabajar con dichas frecuencias, y poder aumentarlas si se desea.
- La corriente inducida en la espira depende del valor del campo magnético B , no obstante, el tamaño de dicha espira influye en gran medida. Esto hace posible contrarrestar el tamaño reducido de una bobina. Es decir, al aumentar el tamaño de la espira, se puede obtener una intensidad de corriente mayor con la misma bobina.
- Realizando el bastidor a partir de un bloque de material se consigue reducir las uniones entre piezas, por tanto, el uso de elementos externos de unión. Así se evitan posibles focos de contaminación y se facilita el esterilizado. Sin embargo, complica el proceso de su fabricación al tener que realizarse más operaciones de mecanizado.

Tras realizar el trabajo, se puede afirmar que se ha aprendido sobre temas que no se abarcan con detalle en el grado, como es el electromagnetismo, u otros ajenos a la titulación, como la regeneración celular y sus aplicaciones. Además, se ha desarrollado competencias como análisis y resolución de distintos problemas, planificación del tiempo o elaboración de proyectos.

8.1 TRABAJO FUTURO.

Tras fabricar el bastidor, sería idóneo ampliar la realización de pruebas para verificar su funcionamiento, tanto eléctricas y magnéticas como térmicas. También sería interesante comprobar los resultados en el laboratorio para otras frecuencias de corriente aplicada a las bobinas.

Por otro lado, partiendo de este trabajo, se puede adaptar este dispositivo o desarrollar uno nuevo para investigar la estimulación neural *en vivo*. Esto supondría cambiar el cultivo de células por un organismo vivo de estudio. De este modo, se le daría un nuevo enfoque a la regeneración neural y un avance en su desarrollo.

REFERENCIAS

- Bozzo, L. M., & Barbat, A. H. (2004). *Diseño sismorresistente de edificios*. Editorial Reverté, S.A.
- Coronado, G., & Fernández, J. L. (2022). *FISICALAB*.
- Cuevas Guzmán, A. I., Silva Roy, D., & Pérez Lobato, G. A. (2017, May 2). Calor específico del agua con efecto Joule. *Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Dep. de Física Teórica. (n.d.). *Relación e/m del electrón*. Universidad de Valencia. Retrieved June 22, 2022, from https://www.uv.es/inecfis/QPhVL/p3/p3_intro.html
- Detroye, D. J., & Chase, R. J. (1994). *The Calculation and Measurement of Helmholtz Coil Fields*.
- Drecker, S. (n.d.). *Necessity is the mother of invention*. Bio-Tek Instruments.
- Fortoul van der Goes, T. (2017). *Histología y Biología Celular* (3a ed.). McGraw-Hill.
- García Castelló, M. (2019). *Diseño y construcción de un sistema de estimulación electromagnética para cultivos celulares*.
- González, C. F., & Meseguer Calas, M. D. (2015). *Planificación de procesos de mecanizado*. Universitat Politècnica de València.
- Guardo-Gómez, V., Fajardo-Perdomo, M. A., Muñoz, A. L., & Gómez, L. A. (2022). Ingeniería Tisular Para Regeneración Nerviosa: Una Revisión. *Revista Chilena de Neuro-Psiquiatría*, 58(1).
- Ikada, Y. (2006). Challenges in tissue engineering. *Journal of the Royal Society Interface*, 3(10), 589–601. <https://doi.org/10.1098/rsif.2006.0124>
- Koppes, A. N., Nordberg, A. L., Paolillo, G. M., Goodsell, N. M., Darwish, H. A., Zhang, L., & Thompson, D. M. (2013). Electrical Stimulation of Schwann Cells Promotes Sustained Increases in Neurite Outgrowth. *Tissue Engineering*, 20(3–4).
- Liu, L., Liu, Z., Huang, L., Sun, Z., Ma, T., Zhu, S., Quan, X., Yang, Y., Huang, J., & Luo, Z. (2015). Pulsed magnetic field promotes proliferation and neurotrophic genes expression in Schwann cells in vitro. *International Journal of Clinic & Experimental Pathology*, 8(3).
- López-Prieto, R., Palafox Marqués, S., & Pérez Casas, A. (1976). *Cómo funciona nuestro sistema nervioso* (3ª).
- MedlinePlus. (2022, May 25). *Neurosciences*.
- Orive, G., Hernández, R. M., Garcón, A. R., Igartúa, M., & Pedráz M, J. L. (2003). Ingeniería Tisular: retos y realidades. *Vitae, Revista de La Facultad de Química Farmacéutica*, 10(2), 46–51.
- Perdomo, S., & Spinel, C. (2004). La célula de Schwann. *Acta Biológica Colombiana*, 9(2).
- Petkovic, D., & Radic, M. (2015). Generalization of Helmholtz coil problem. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, 12(3), 375–384. <https://doi.org/10.2298/sjee1503375p>
- Qian, Y., Cheng, Y., Cai, J., Zhao, X., Ouyang, Y., Yuan, W.-E., & Fan, C. (2019). Advances in electrical and magnetic stimulation on nerve regeneration. *Regenerative Medicine*, 14(10).

QUÍMICA. (n.d.).

Ruiz, L. (2021). *Neurona: qué es y cuáles son sus partes*. PSYCIENCIA.

Salas Vicente, F., Segovia López, E. F., & Vicente Escuder, Á. (2019). *Problemas de Ciencia de Materiales*. Editorial Universitat Politècnica de València.

Seladi-Schulman, J. (2019). *In Vivo vs. In Vitro: What Does It All Mean?* HEALTHLINE.

Solana Quirós, P. (2011). *Fundamentos físicos de ingeniería. Electromagnetismo: electrostática, corriente continua, magnetismo, corriente alterna*. Editorial UPV.

Documento nº2.

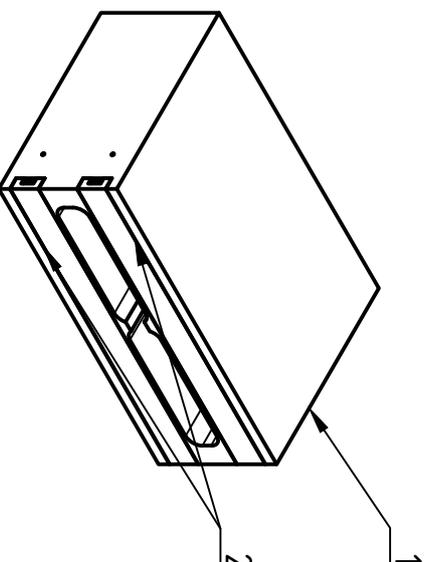
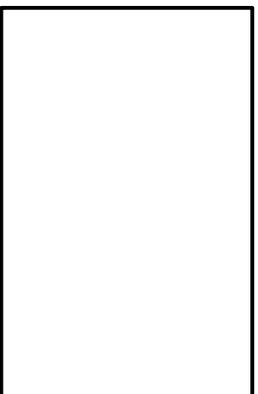
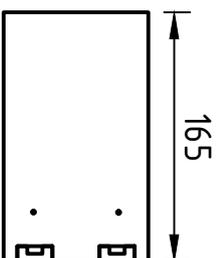
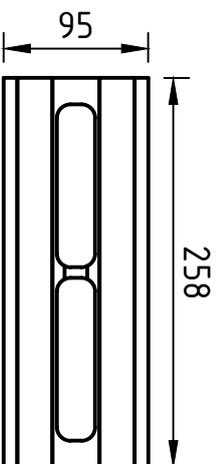
Planos.

Índice

Capítulo nº1: INTRODUCCIÓN.....	37
Plano nº1: CONJUNTO DEL BASTIDOR	38
Plano nº2: EXPLOSIONADO DEL BASTIDOR.....	40
Plano nº3: ESTRUCTURA PRINCIPAL.....	41
Plano nº4: BANDEJA.....	42
Planos de la placa multipocillo.....	43

Capítulo nº1: INTRODUCCIÓN

En este documento se exponen los planos del bastidor, en los que se encuentra las piezas que lo componen: la estructura principal y las bandejas. También se muestra los planos de su conjunto y su explosionado. Además, se presenta los planos de la placa multipocillo nº3 facilitados por el fabricante ThermoFisher Cientific.



ELEMENTO	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	MATERIAL
1	1	Estructura principal	POM
2	2	Bandeja	POM

LISTA DE PIEZAS

Promotor: **CBIT** Autor: **Paula Ferrando Huertas**

Título proyecto: **DISEÑO, MECANIZADO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIOREACTOR PARA ESTIMULACIÓN ELÉCTRICA Y MAGNÉTICA IN VITRO DE CULTIVOS NEURALES**

Título plano:

Plano nº: **1**

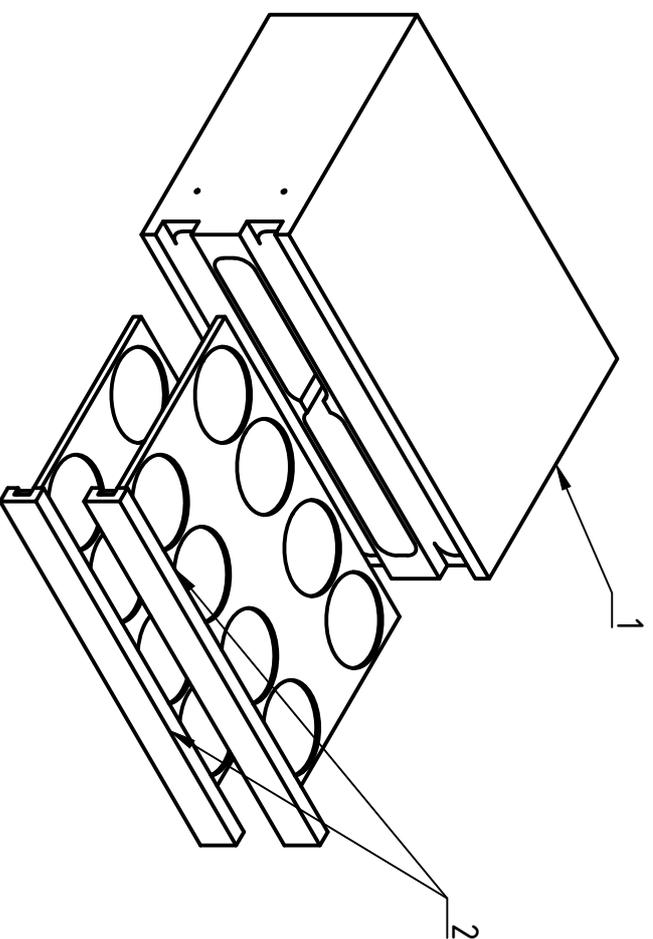
Conjunto del bastidor

Fecha: **05/07/2022**

Escala: **1:5**



Escuela Técnica Superior de Ingeniería en Diseño



1	1	Estructura principal	POM
2	2	Bandeja	POM
ELEMENTO	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	MATERIAL

LISTA DE PIEZAS

Promotor:
CBIT

Autor:
Paula Ferrando Huertas

Título proyecto:
DISEÑO, MECANIZADO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIOREACTOR PARA ESTIMULACIÓN ELÉCTRICA Y MAGNÉTICA IN VITRO DE CULTIVOS NEURALES

Título plano:

Plano nº:

2

Explosionado del bastidor

Fecha:

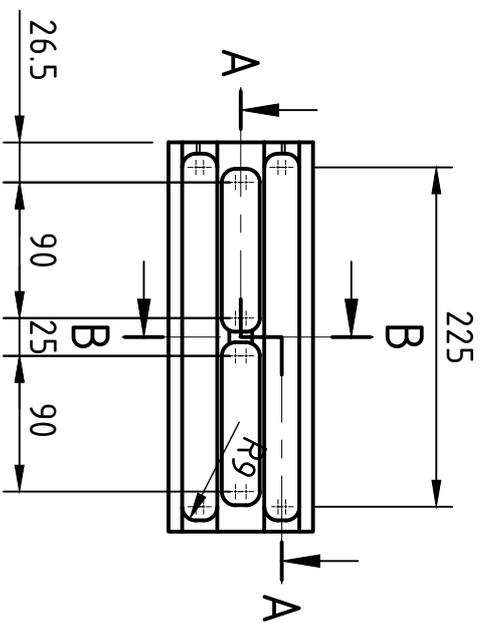
05/07/2022

Escala:

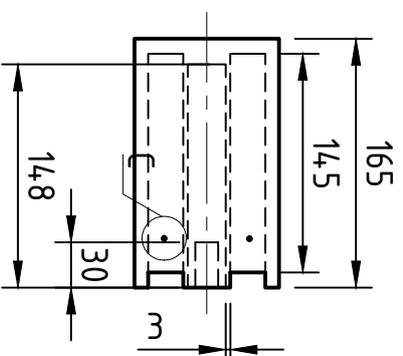
1:4



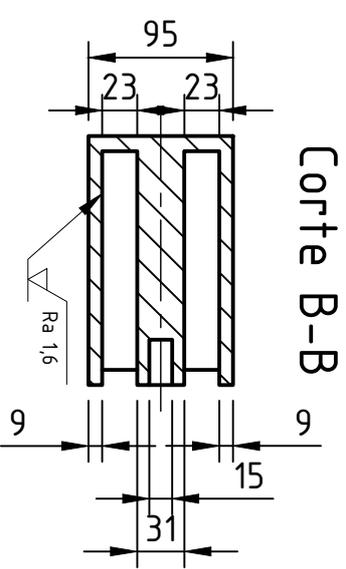
Escuela Técnica Superior de Ingeniería en Diseño



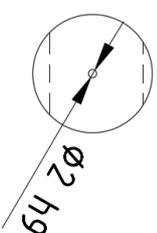
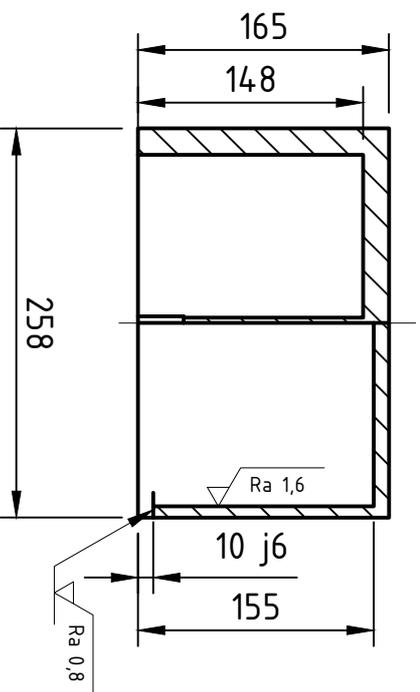
Corte A-A



Detalle C (1:2)



Corte B-B



Ra 3,2

Promotor:
CBIT

Autor:
Paula Ferrando Huertas

Título proyecto:
DISEÑO, MECANIZADO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIOREACTOR PARA ESTIMULACIÓN ELÉCTRICA Y MAGNÉTICA IN VITRO DE CULTIVOS NEURALES

Título plano:

Estructura principal

Plano nº:

3

Fecha:

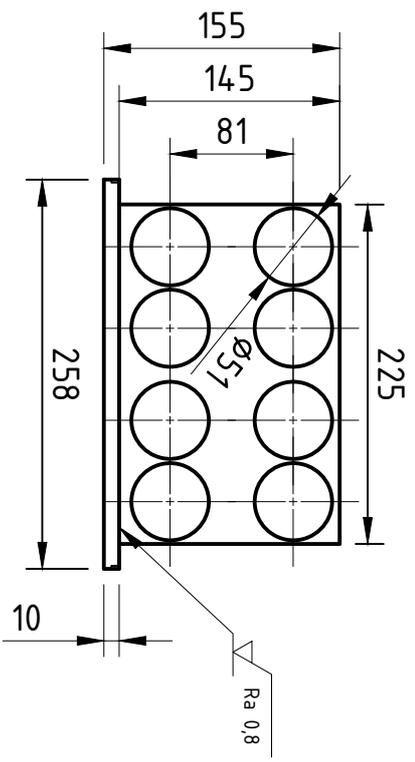
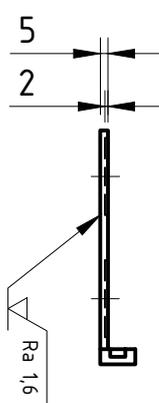
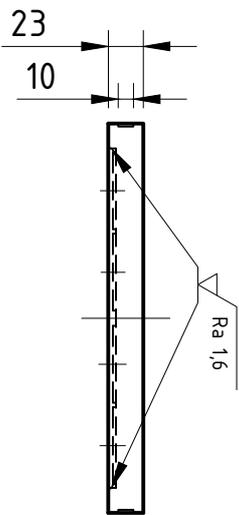
05/07/2022

Escala:

1:5



Escuela Técnica Superior de Ingeniería en Diseño



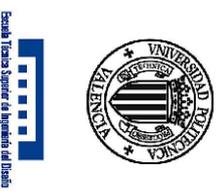
Ra 3,2

Promotor: **CBIT**

Autor: **Paula Ferrando Huertas**

Título proyecto: **DISEÑO, MECANIZADO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BIOREACTOR PARA ESTIMULACIÓN ELÉCTRICA Y MAGNÉTICA IN VITRO DE CULTIVOS NEURALES**

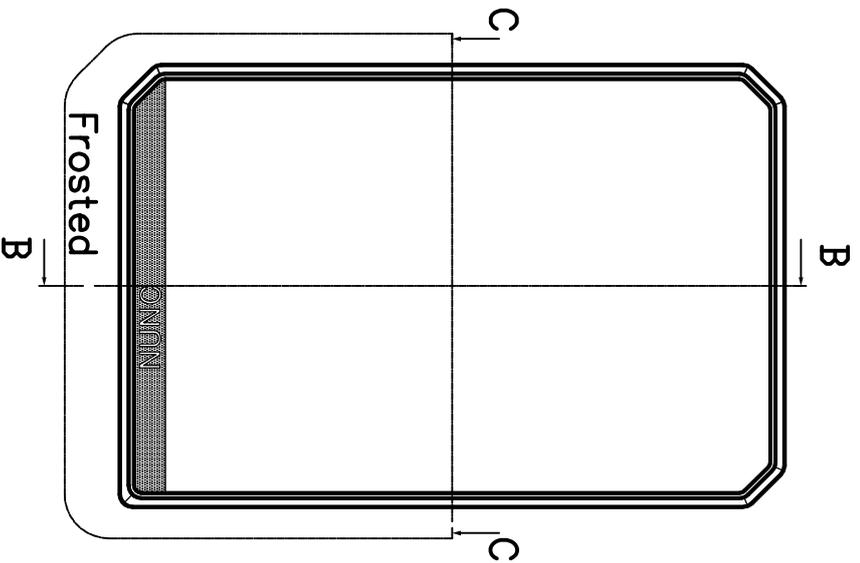
Título plano: **Plano nº: 4**



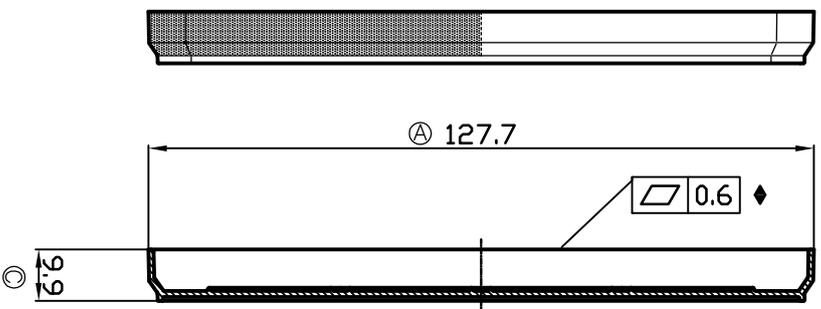
Bandeja

Fecha: **05/07/2022**

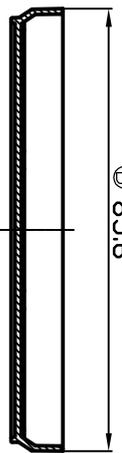
Escala: **1:5**



Section BB



Section CC



Ⓐ 85.6

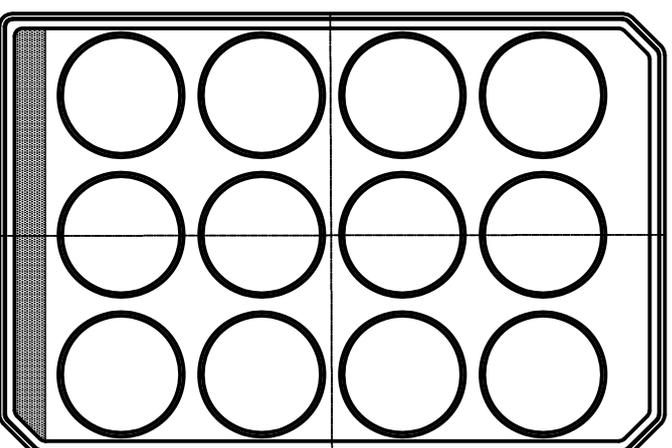
Tolerances unless otherwise specified:

Without decimal: ±0.5 mm

1 place decimal: ±0.1 mm

2 place decimal: ±0.05 mm

Undefined radius: R 0.20 mm



Ⓐ 0.4x4
Noncambor

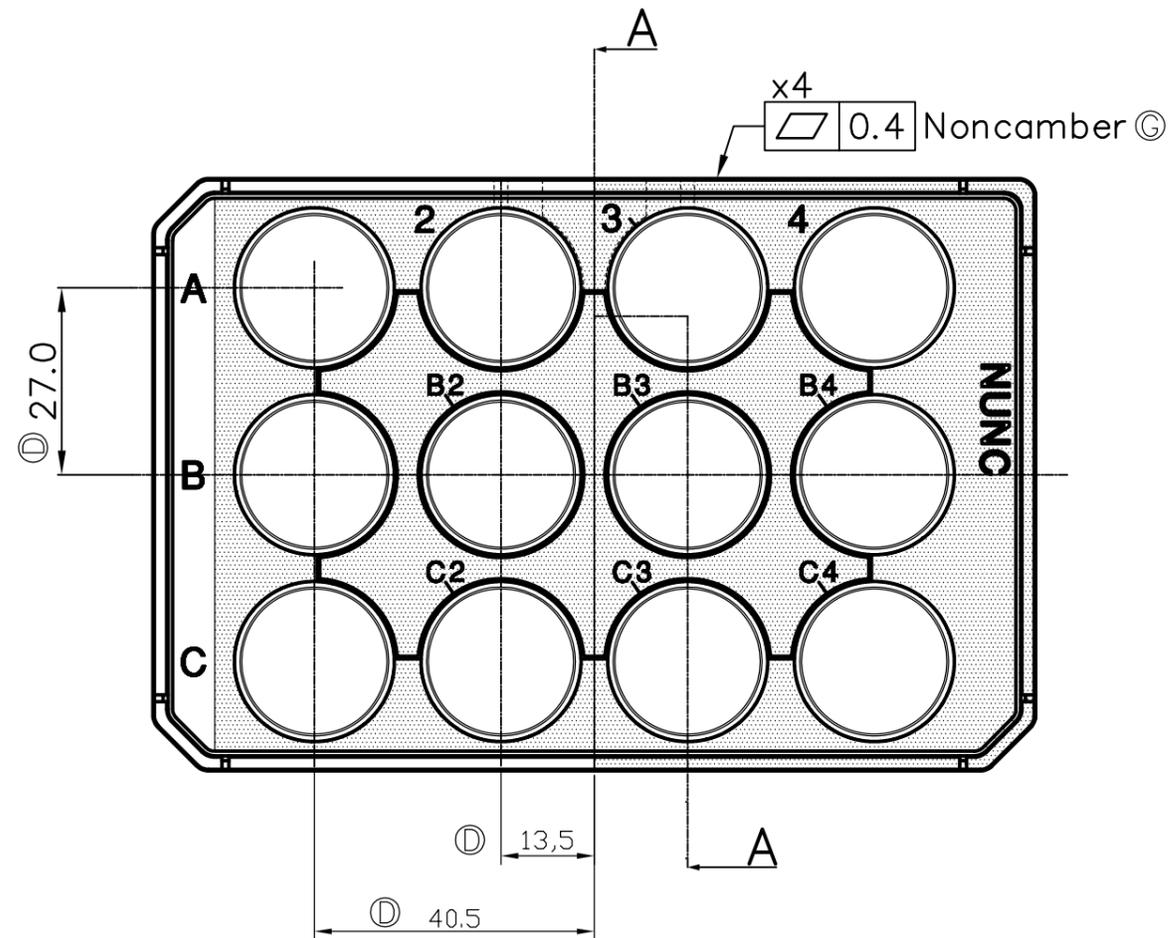
ThermoFisher
S C I E N T I F I C

Roskilde Site - Kænstrupvej 90 · P.O. Box 280
DK-4000 Roskilde · Denmark
Tel +45 4631 2000 · Fax +45 4631 2042
E-mail: info.rnunc@thermofisher.com

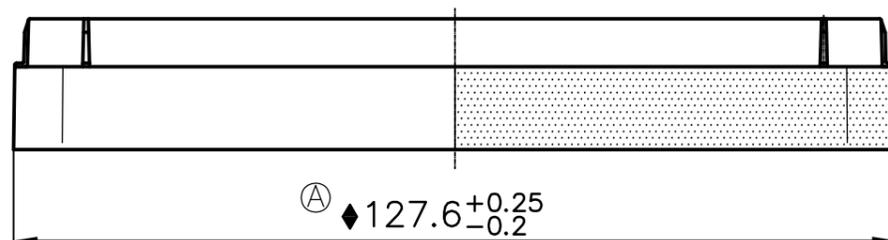
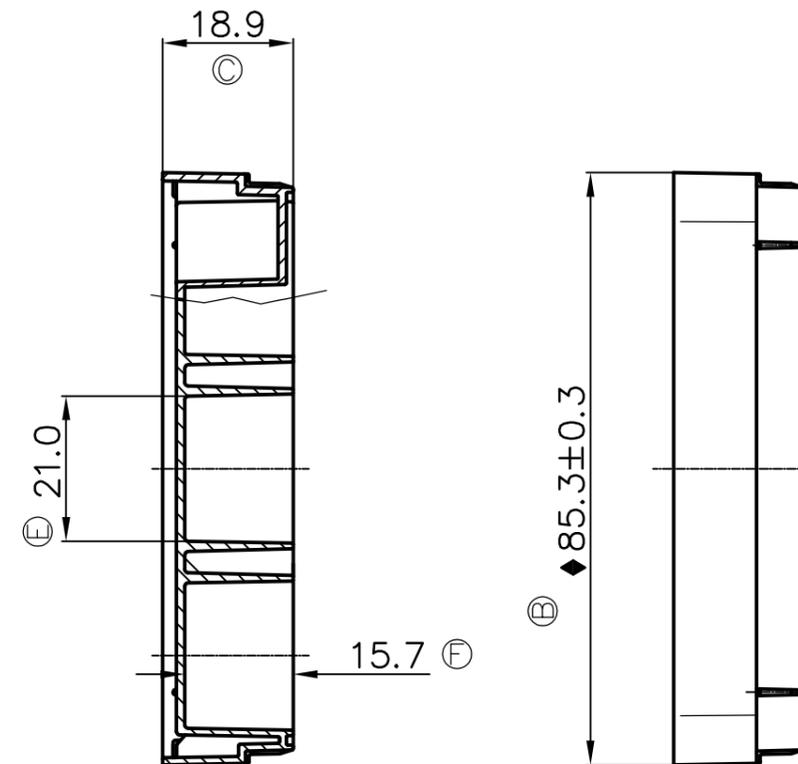
www.rnuncbrand.com

SUBJECT:
Lid for Multidish 12
Main dimensions

DRAWN BY/DATE:	CHANGE ORDER NO.:	VALID FROM:	APPROVED BY/DATE:	FORMAT:
MS/30.06.99	CC-1854	2008.03.06	JR 2008.03.04	A3
ITERA NUMBER:	MATERIAL:	DRAWING NO.:	PAGE TYPE:	METRIC
PS		2740	-C	1:1



Section AA



Tolerances unless otherwise specified:
 Without decimal: ± 0.5 mm
 1 place decimal: ± 0.1 mm
 2 place decimal: ± 0.05 mm

Undefined radius: R 0.20 mm
 General draft angle 1.5°

ThermoFisher
 SCIENTIFIC

Roskilde Site · Kamstrupvej 90 · P.O.Box 280
 DK-4000 Roskilde · Denmark
 Tel +45 4631 2000 · Fax +45 4631 2042
 E-mail: info.nunc@thermofisher.com

www.nuncbrand.com

SUBJECT: Bottom part for Multidish 12 Main dimensions		DRAWN BY/DATE: LNE/01.09.00	CHANGE ORDER NO.: CO-1181	VALID FROM: 2008.01.29	APPROVED BY/DATE: HES 2008.01.22	FORMAT: A3
ITEM NUMBER:	MATERIAL: PS	DRAWING NO.: 2741	VERSION: 10	PAGE TYPE: -C	SCALE: 1:1	METRIC First Angle Projection

Documento nº3.

Pliego de condiciones.

Índice

Capítulo nº1. INTRODUCCIÓN.....	51
Capítulo nº2. CONDICIONES DE CARÁCTER GENERAL	52
2.1 CONDICIONES FACULTATIVAS.	52
2.1.1 Promotor del trabajo.....	52
2.1.2 Obligaciones y facultades de la dirección facultativa.....	52
2.1.3 Obligaciones del proyectista.	52
2.1.4 Plazos de ejecución del trabajo.	52
2.1.5 Causa de rescisión del trabajo.....	52
Capítulo nº3. CONDICIONES TÉCNICAS PARTICULARES.	53
3.1 MATERIAL ESPIRA.	53
3.2 DIÁMETRO CABLE BOBINADO.	53
3.3 DIMENSIONADO BOBINA.	53
3.3.1 Condiciones generales.....	54
3.3.2 Condiciones específicas.	54
3.4 DISEÑO BASTIDOR.	55
NORMATIVA.....	56
REFERENCIAS.....	57

Capítulo nº1. INTRODUCCIÓN

Este documento tiene por objeto establecer las distintas condiciones y garantías que debe cumplir el proyecto para asegurar el correcto funcionamiento del bioreactor.

El trabajo consiste en el diseño y posterior construcción de un bioreactor que sea capaz de aplicar, de manera simultánea, estímulos eléctricos y magnéticos sobre un conjunto de cultivos. El sistema trata de la generación de campos magnéticos que, además de estimular las muestras cultivadas, inducen una corriente eléctrica en una espira conductora inmersa en el medio de cultivo.

Por tanto, se ha calculado y fabricado un sistema de bobinas que generen dichos campos magnéticos, y que estos induzcan las corrientes necesarias. Los cálculos se desarrollarán en torno a una serie de condiciones y se deberán adaptar a las necesidades eléctricas de los cultivos. Además, para soportar el sistema, se ha diseñado un bastidor en función de las necesidades y condiciones tanto mecánicas como funcionales.

Capítulo nº2. CONDICIONES DE CARÁCTER GENERAL

2.1 CONDICIONES FACULTATIVAS.

2.1.1 Promotor del trabajo.

El promotor es el Centro de Biomateriales e Ingeniería Tisular (CBIT) de la Universitat Politècnica de València. Es el encargado de asignar la dirección facultativa.

2.1.2 Obligaciones y facultades de la dirección facultativa.

La dirección facultativa del trabajo está formada por los tutores Dr. Dña. Ana Jesús Vidaurre Garayo y Dr. D. Jorge Más Estellés, miembros del Departamento de Física Aplicada de la Universitat Politècnica de València. Se encuentran bajo cargo del promotor (CBIT).

Los tutores deben supervisar y estar presentes durante la realización del trabajo. Tienen la facultad de realizar las modificaciones convenientes, siguiendo el reglamento aprobado por la Universitat Politècnica de València y la Escuela Técnica Superior de Ingenieros del Diseño. Además de estar autorizado a entregar el trabajo al equipo de evaluación.

2.1.3 Obligaciones del proyectista.

El proyectista o el autor del trabajo debe cumplir las siguientes obligaciones:

- Quedar bajo supervisión de la dirección facultativa o tutores y mantenerlos informados del estado del trabajo.
- Seguir el reglamento aprobado por la Universitat Politècnica de València y la Escuela Técnica Superior de Ingenieros del Diseño
- Respetar el derecho a la integridad de la obra.

2.1.4 Plazos de ejecución del trabajo.

La realización del trabajo se llevará a cabo en los plazos fijados entre los tutores y el proyectista. El trabajo quedará asignado al proyectista una vez aprobado por la CAT de la titulación de Grado en Ingeniería Mecánica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros del Diseño. Finalizará cuando concluyan las labores académicas del trabajo y así lo den por terminado los tutores y el proyectista.

2.1.5 Causa de rescisión del trabajo.

Los tutores o la dirección facultativa pueden rescindir del acuerdo de trabajo con el proyectista cuando se reúnan las condiciones siguientes:

- Abandono o retraso irrazonable del trabajo.
- Consenso de ambas partes, tutores y proyectista.

Capítulo nº3. CONDICIONES TÉCNICAS PARTICULARES.

Las condiciones técnicas describen los requisitos y necesidades que se deben tener presentes a la hora de realizar el trabajo. Con este documento se pretende mejorar y completar la información presente en el resto de los documentos: memoria, anejos y planos.

3.1 MATERIAL ESPIRA.

La espira debe fabricarse a partir de un material que cumpla las siguientes características. No se han definido unos valores específicos para ellas, por ende, se realizará un estudio donde se analizarán varios materiales para elegir el más compatible con las condiciones impuestas. El tamaño de la espira será definido en el proceso de dimensionado del sistema de bobinas.

Conductor eléctrico.

El material debe ser capaz de transportar la corriente eléctrica inducida. Así mismo, la resistencia que oponga a dicha corriente debe ser baja para no generar un calentamiento. Es importante ya que si la muestra de cultivo donde se encuentra la espira se ve sometida a un aumento excesivo de temperatura puede ser inservible.

Material inerte.

EL cultivo de células neurales se encuentra en una muestra con líquido acuoso, por lo que el material debe presentar una alta resistencia a la corrosión y oxidación. Si el material se deteriora, sus propiedades eléctricas se verán afectadas y se contaminará la muestra.

Dúctil.

El hilo con el que se fabrique la espira debe ser lo suficientemente dúctil para adoptar la forma deseada sin fracturarse.

3.2 DIÁMETRO CABLE BOBINADO.

Los cálculos del proceso de dimensionado de las bobinas se realizarán considerando un diámetro de cable de 0,5 mm. Este es un valor simbólico, pudiéndose modificar, ya sea para aumentar el número N de espiras, la intensidad inducida en la espira, etc. No obstante, se debe tener presente que disminuir el diámetro el cable supone un aumento de la potencia generada por cada bobina y disipada en calor, como se muestra en el Capítulo nº2: *Fundamentos teóricos* del Documento nº1: *Memoria*.

3.3 DIMENSIONADO BOBINA.

El proceso de dimensionado del sistema de bobinas se basará en los cálculos realizados a partir de las expresiones matemáticas detalladas en el Capítulo nº2: *Fundamentos teóricos* del Documento nº1: *Memoria*. Estos cálculos rigen tanto la corriente eléctrica aplicada a las bobinas como el campo generado por dicha corriente, además de la corriente eléctrica inducida en la espira por el campo generado. A continuación, se muestran las condiciones y

necesidades generales que se han de cumplir y tener en cuenta en el proceso de dimensionado.

3.3.1 Condiciones generales.

Aumentar la capacidad de muestras de cultivo estimuladas simultáneamente.

Para ello se realizará un proceso de dimensionado de un par de bobinas Helmholtz que estimulen una única muestra y se multiplicará para obtener más. Para obtener unos resultados y conclusiones fiables sobre la regeneración neural se necesita un número alto de pruebas en el experimento. Por ello, si el bioreactor es capaz de estimular varias muestras simultáneamente, se podrá alcanzar dicho número de pruebas más rápido.

Reducir el tamaño del conjunto.

Es decir, el sistema de todos los pares de bobinas Helmholtz. Como se quiere aumentar la capacidad de muestras de cultivo, inevitablemente el tamaño del sistema también aumentará. Es necesario tenerlo en cuenta en el proceso de dimensionado de las bobinas y elegir la geometría más pequeña posible.

3.3.2 Condiciones específicas.

Corriente eléctrica aplicada a las bobinas.

En los cálculos se considerará una tensión de corriente es de 40mA. En el Anejo I: *Estudio sobre la intensidad de corriente aplicada a las bobinas*, se muestra el estudio y justificación de este valor. Será también la intensidad de operación. Sin embargo, se podrá aumentar en el laboratorio si en algún momento se desea intensificar el campo magnético generado más allá del diseñado en este trabajo. Tómese en cuenta que un aumento de la tensión traerá consigo un aumento del calor generado por las bobinas. Por otro lado, si no se aplica una tensión inferior, el campo magnético generado será menor.

En cuanto a la frecuencia de la corriente aplicada, debe ser cercana a la frecuencia de la red eléctrica española (50 Hz). Los cálculos se llevarán a cabo con una frecuencia de 75 y 100 Hz. De este modo se logrará el campo magnético deseado y se dejará un margen por si en el laboratorio se desea aumentar la intensidad de corriente inducida en la espira más allá de la diseñada en este trabajo. Se debe tener en cuenta que una disminución de la frecuencia tendrá como resultado una intensidad de corriente más baja.

Tabla 12. Condiciones específicas. Corriente eléctrica aplicada a las bobinas.

Tensión V	40 mA
Frecuencia f	50-100 Hz

Campo magnético generado.

El campo creado por el sistema de bobinas debe ser lo más uniforme posible. Para conseguirlo, se introducirá la siguiente restricción en los cálculos:

$$R_m \approx a \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde R_m es el radio medio de la bobina y a es la separación entre el par de bobinas que forma el sistema. Esta condición se ve justificada en el apartado *Fundamento teóricos* del Documento nº1: *Memoria*.

Corriente eléctrica inducida en la espira.

Se ha demostrado que aplicar a la muestra de cultivo neural una corriente eléctrica de intensidad de 500 μA favorece su regeneración. Un aumento excesivo de esta intensidad puede ser perjudicial, ya que puede llegar a la muerte de las celular del cultivo. (Cuenca-Ortolá et al., n.d.) Es por ello, que el bioreactor debe ser capaz de inducir esta intensidad en la espira sumergida en la muestra.

Tabla 13. Condiciones específicas. Corriente eléctrica inducida en la espira.

Intensidad I	500 μA
----------------	-------------------

3.4 DISEÑO BASTIDOR.

Con el fin de sujetar el sistemas de bobinas se diseñará una estructura, llamada bastidor. El diseño debe cumplir las siguientes condiciones.

Material.

El material del bastidor será POM (polioximetileno), también conocido como poliacetal, poliformaldehído, o por su nombre comercial, Delrín. Este material destaca por su resistencia mecánica, térmica y química, tanto a sustancias ácidas y álcalis como a disolventes orgánicos (ej. el etanol y cloroformo). Además, prácticamente no absorbe humedad, y es resistente a la abrasión. Estas propiedades, entra tantas otras, favorece su uso dentro del laboratorio, garantizando la seguridad de los equipos tecnológicos, el material biológico y el personal técnico. (Dupont, n.d.). Cabe destacar que es un material autoclavable, es decir, no sufre alteraciones al esterilizarlo por dicho método.

Tamaño reducido.

El mecanismo de esterilización de material técnico más usado en el laboratorio es el autoclave. Este consiste en una caldera donde se introduce el material y que se cierra herméticamente. Emplea calor húmedo (vapor de agua) como agente esterilizante para lograr eliminar todos los microorganismos de la superficie del material a esterilizar. (Pérez-Uz. et al., 2010). Es por ello por lo que, el bioreactor no debe ser excesivamente grande para poder introducirlo en el autoclave.

Evitar elementos externos de unión entre piezas del bastidor.

Se prescindirá del uso de elementos auxiliares de unión, tanto rígida como móvil, entre piezas (ej. tornillos, pasadores, remaches, etc.). Esto se debe a que son fuentes de contaminación al contar con geometrías más complejas y cambios del tipo de material.

Geometrías sencillas y deformación.

El uso de geometrías sencillas tendrá prioridad, así se facilitará el mecanizado del bastidor y también su posterior manejo por el personal del laboratorio. Además, se usarán herramientas de diseño para evitar la aparición de deformaciones con el paso del tiempo.

NORMATIVA

UNE 157001, de junio de 2014: *Criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico.*

Normativa marco de trabajo fin de grado y fin de máster de la Universitat Politècnica de València, aprobada por el Consejo de Gobierno en el 7 de marzo de 2013, y modificada por última vez el 13 de marzo de 2018.

Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el *Reglamento electrotécnico para baja tensión.*

UNE-EN ISO 29988-1:2020, del 22 de agosto de 2022: *Plásticos. Materiales de poli (óxido de metileno) (POM) para moldeo y extrusión. Parte 1: Sistema de designación y bases para las especificaciones. (ISO 29988-1:2019).*

UNE-EN ISO 29988-2:2018, del 3 de octubre de 2018: *Plásticos. Materiales de poli (óxido de metileno) (POM) para moldeo y extrusión. Parte 2: Preparación de probetas y determinación de propiedades. (ISO 29988-2:2018).*

REFERENCIAS

- Cuenca-Ortolá, I., Martínez-Rojas, B., Moreno-Manzano, V., García Castelló, M., Monleón Pradas, M., Martínez-Ramos, C., & Más Estellés, J. (n.d.). Strategy for Magnetic and Electric Stimulation to Enhance Proliferation and Differentiation of NPC Seeded over PLA Electrospun Membranes. *Biomedicines*.
- Dupont. (n.d.). *The High-Performance Acetal Resin*. Retrieved June 27, 2022, from <https://www.dupont.com/brands/delrin.html>
- Pérez-Uz., B., de Silóniz, M. I., Torralba, B., & Vázquez, C. (2010). Metodología de esterilización en el laboratorio microbiológico. *Reduca (Biología)*. *Serie Microbiología*, 3(5), 1–14.

Documento nº4.

Presupuesto.

Índice

Capítulo nº1: INTRODUCCIÓN.....	63
Capítulo nº2: CUADRO DE COSTES.....	64
2.1 CUADRO DE MANO DE OBRA.....	64
2.2 CUADRO DE MATERIALES.....	64
2.3 CUADRO DE MECANIZADO DEL BASTIDOR.....	64
2.5 COSTES DESCOMPUESTOS.....	65
2.6 IMPORTE TOTAL.....	68

Capítulo nº1: INTRODUCCIÓN

Este documento tiene como objeto la valoración de los costes de la realización del trabajo, tanto su desarrollo como su redacción. Se ha considerado tres tipos de costes: la mano de obra, los materiales y el mecanizado del bastidor. En el capítulo nº2, junto a la información proporcionada en el resto de los documentos de este trabajo, se justifica y explica los precios y el coste de cada tipo, además de un resumen total.

Capítulo nº2: CUADRO DE COSTES

2.1 CUADRO DE MANO DE OBRA.

El trabajo ha sido realizado por una ingeniera mecánica junto a los tutores, profesores de la UPV, y los técnicos especializados que han fabricado el bioreactor. En la tabla 14 se muestra el cuadro de costes del tiempo empleado en el trabajo. El precio de la mano de obra es una aproximación obtenida a partir del salario medio de una graduada en ingeniería mecánica sin experiencia, un profesor de universidad y un técnico especializado.

Tabla 14. Cuadro de costes de la mano de obra.

Personal	Precio (€/h)	Coste (€)
Ingeniera Mecánica	9	2700
Profesor de universidad	20	600
Técnico especializado	13	234
Total		3534

2.2 CUADRO DE MATERIALES.

Los materiales empleados en la realización del trabajo incluyen todos los programas informáticos usados, las bobinas (tanto el cable como el carrete que lo sujeta), el material del bastidor (POM), la espira y los equipos de laboratorio utilizados para la verificación del bioreactor. En el apartado 2.5 se justifica los costes de la tabla 15.

Tabla 15. Cuadro de costes de los materiales.

Material	Coste (€)
Licencias de Software	403,50
Carrete bobinas	0,51
Cable bobinas	5,72
Material bruto bastidor	1217,89
Espira	0,73
Equipos de laboratorio	397,88
Total	2026,22

2.3 CUADRO DE MECANIZADO DEL BASTIDOR.

A partir del Anejo III: *Planificación del mecanizado* se calculado el coste del proceso. Se ha dividido en las tres piezas que conforman el bastidor. En la tabla 16, se observa un pico de coste en la pieza 2.1, esto se debe al uso de bridas para el mecanizado de la bandeja. Sin embargo, este no es el mismo para la pieza 2.2, pese a ser idénticas. La razón es que cuando un utillaje se vuelve a usar y ya está colocado en la máquina, su coste se reduce un 50%.

Tabla 16. Cuadro de costes del mecanizado del bastidor.

Pieza	Coste (€)
Pieza 1. Estructura principal	363,04
Pieza 2.1 Bandeja	918,22
Pieza 2.2 Bandeja	648,22
Total	1929,49

2.5 COSTES DESCOMPUESTOS.

Nº	Código	Ud	Descripción	Total
1 MANO DE OBRA				
1.1	BI	ud	Búsqueda de información	
	IM	h 60	Ingeniera Mecánica	9,00 540,00
1.2	DD	ud	Diseño del dispositivo	
	IM	h 120	Ingeniera Mecánica	9,00 1080,00
1.2	DD	ud	Planificación del mecanizado	
	IM	h 20	Ingeniera Mecánica	9,00 180,00
1.3	MB	ud	Mecanizado del bastidor	
	TE	h 10	Técnico especializado	13,00 130,00
1.4	FB	ud	Fabricación de las bobinas	
	TE	h 8	Técnico especializado	13,00 104,00
1.5	MVD	ud	Montaje y verificación del dispositivo	
	IM	h 10	Ingeniera Mecánica	9,00 90,00
1.6	RM	ud	Redacción del trabajo/proyecto	
	IM	h 60	Ingeniera Mecánica	9,00 540,00
1.7	TT_P	ud	Tutorías de planificación	
	PU	h 10	Profesor de universidad	20,00 200,00
	IM	h 10	Ingeniera Mecánica	9,00 90,00
1.8	TT_PyR	ud	Tutorías de resolución de problemas y resultados	
	PU	h 14	Profesor de universidad	20,00 280,00
	IM	h 14	Ingeniera Mecánica	9,00 126,00
1.9	TT_R	ud	Tutorías de redacción del trabajo/proyecto	
	PU	h 6	Profesor de universidad	20,00 120,00
	IM	h 6	Ingeniera Mecánica	9,00 54,00
PRECIO TOTAL				3534,00

Nº	Código	Ud	Descripción	Total
2 MATERIALES				
2.1	LS	ud	Licencias de Software	
	M365	mes	5 Microsoft 365 Empresa Básico	5,10 25,50
	F360		5 Fusion 360	61,00 305,00
	CAD		1 AutoCAD LT	73,00 73,00
2.2	CrB	ud	Carrete bobinas	
	VT	m	0,019 Varilla Teflón Ø30 mm	26,80 0,51
2.3	CbB	ud	Cable bobinas	
	A_C	m	57,17 Alambre Cobre Ø 0,4 mm	0,10 5,72
2.4	BST	ud	Material bruto bastidor	
	BDir	cm ³	4211,74 Bloque Delrín 260*97*167 mm	0,20 842,35
	IDlr		938,86 Lámina Delrín 260*157*25 mm	0,20 187,77
	IDlr		938,86 Lámina Delrín 260*157*25 mm	0,20 187,77
2.5	ESP	ud	Espira	
	A_O	mm	65,97 Alambre Oro Ø 0,1mm	0,011 0,73
2.6	EL	ud	Equipos de laboratorio	
	TSL	ud	1 Teslámetro PCE-G28	287,90 287,9
	FCC		1 Fuentes de Alimentación DC 0-30V/0-5A	68,99 68,99
	MLT		1 Multímetro avanzado c-logic	40,99 40,99
PRECIO TOTAL				2026,22

Nº	Código	Ud	Descripción		Total
3 FABRICACIÓN					
3.1	P1	ud	Pieza 1. Estructura principal		
	PHF	ud 1	Preparación herramienta fresadora	200	200,00
	M	ud 1	Mordaza	75	75,00
	FFD	mm ³ 7590	Fresado frontal [D]	0,00002	0,15
	FFPD	mm ³ 236844	Fresado frontal-periférico [D]	0,00002	4,74
	FFA	mm ³ 178920	Fresado frontal [A]	0,0002	35,78
	FFPA	mm ³ 236844	Fresado frontal-periférico [A]	0,0002	47,37
3.2	P2.1	ud	Pieza 2.1. Bandeja		
	PHF	ud 1	Preparación herramienta fresadora	200	200,00
	BRD	ud 1	Bridas	540	540,00
	FFPD	mm ³ 764888,13	Fresado frontal-periférico [D]	0,00002	15,30
	FFA	mm ³ 49746	Fresado frontal [A]	0,0002	9,95
	FFPA	mm ³ 764888,13	Fresado frontal-periférico [A]	0,0002	152,98
3.3	P2.2	ud	Pieza 2.2. Bandeja		
	PHF	ud 1	Preparación herramienta fresadora	200	200
	BRD	ud 1	Bridas	270	270
	FFPD	mm ³ 764888,13	Fresado frontal-periférico [D]	0,00002	15,30
	FFA	mm ³ 49746	Fresado frontal [A]	0,0002	9,95
	FPA	mm ³ 764888,13	Fresado frontal-periférico [A]	0,0002	152,98
PRECIO TOTAL					1929,49

2.6 IMPORTE TOTAL.

Nº	Descripción		Total
1	Mano de obra	3534,00	TRES MIL QUINIENTOS TREINTA Y CUATRO EUROS
2	Materiales	2026,22	DOS MIL VEINTISEIS EUROS CON DOS CÉNTIMOS
3	Fabricación	1929,49	MIL NOVECIENTOS VEINTINUEVE Y NUEVE CÉNTIMOS
	PRECIO TOTAL	7759,71	SIETE MIL SETECIENTOS CINCUENTA Y NUEVE CON SETENTAY UN CÉNTIMOS

El presupuesto total del trabajo asciende a SIETE MIL SETECIENTOS CINCUENTA Y NUEVE CON SETENTAY UN CÉNTIMOS.

Anejo I.

Estudio sobre la intensidad de corriente aplicada a las bobinas.

Índice

Capítulo nº1: INTRODUCCIÓN.....	73
Capítulo nº2: CÁLCULOS Y RESULTADOS DEL ESTUDIO	74
2.1 CAMPO MAGNÉTICO NECESARIO.....	74
2.2 INTENSIDAD DE CORRIENTE NECESARIA.....	74

Capítulo nº1: INTRODUCCIÓN

Este anejo expone el estudio realizado sobre el valor de intensidad de corriente eléctrica aplicada a las bobinas del bioreactor. Este valor es el utilizado en los cálculos del proceso de dimensionado del sistema de bobinas y con el que se va a operar en el laboratorio. No obstante, se puede variar si se desea un aumento o disminución del campo magnético generado en el futuro.

El objetivo principal es aplicar la mínima intensidad necesaria para evitar sobrecalentar el bioreactor. Con el fin de contemplar qué rango de valores de intensidad es el más bajo, se ha calculado la intensidad necesaria para una serie de bobinas con distintos tamaños. Como se desea reducir el tamaño del anterior bioreactor, las bobinas propuestas en este estudio son más pequeñas que las anteriores.

Primero, se ha de averiguar qué campo magnético es necesario generar para inducir una intensidad de $500 \mu\text{A}$ en la espira sumergida en el cultivo. Con ese dato ya se puede obtener el rango de valores de operación de intensidad de las bobinas.

Capítulo nº2: CÁLCULOS Y RESULTADOS DEL ESTUDIO

2.1 CAMPO MAGNÉTICO NECESARIO.

El par de bobinas debe ser capaz de generar un campo magnético suficiente para inducir una corriente eléctrica en la espira con una intensidad de $500 \mu A$, mediante la Ley de Faraday. Esta intensidad depende de la resistencia eléctrica del material de la espira, en este caso el oro, y varía en función de la frecuencia de la corriente que circula por las bobinas (Ec. 7). De este modo, para una intensidad eficaz en la espira $I_{ef-espira} = 500 \mu A$, se ha calculado el campo magnético para distintas frecuencias: 50, 75 y 100Hz. Se ha supuesto una espira de diámetro 32 mm, que es la usada en el bioreactor anterior.

Combinando las expresiones (Ec. 6) y (Ec. 7) se deduce el campo magnético B en el centro de la espira.

$$B_{centro-50} = \frac{I_{ef-espira} \cdot R_{espira}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot S_{espira}} = \frac{500 \cdot 10^{-6} \cdot 0,25}{\sqrt{2} \cdot 50 \cdot \pi \cdot \left(\frac{32}{2}\right)^2} = 0,002198 T$$

$$B_{centro-75} = \frac{I_{ef-espira} \cdot R_{espira}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot S_{espira}} = \frac{500 \cdot 10^{-6} \cdot 0,25}{\sqrt{2} \cdot 75 \cdot \pi \cdot \left(\frac{32}{2}\right)^2} = 0,001465 T$$

$$B_{centro-100} = \frac{I_{ef-espira} \cdot R_{espira}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot S_{espira}} = \frac{500 \cdot 10^{-6} \cdot 0,25}{\sqrt{2} \cdot 100 \cdot \pi \cdot \left(\frac{32}{2}\right)^2} = 0,001099 T$$

Se observa que el campo magnético necesario es menor cuando aumenta la frecuencia de la corriente aplicada.

2.2 INTENSIDAD DE CORRIENTE NECESARIA.

Para el cálculo de la intensidad de corriente que circula por las bobinas, se va a suponer que el campo magnético B obtenido en el apartado anterior es el generado en un punto situado a una distancia $d = 0$ de una de las bobinas del par, y a una distancia a de la otra. El rango de valores de operación de intensidad se ha obtenido a partir de los resultados de múltiples bobinas con distintos tamaños. De esta manera, se extrae un promedio buscando una intensidad baja pero suficiente.

A continuación, como ejemplo y a modo de explicación, se exponen los cálculos que se han llevado a cabo para un caso específico, sin embargo, el resto sigue el mismo procedimiento. Se ha considerado un diámetro de cable de bobinado $\emptyset = 0,5 mm$.

Datos del caso específico:

$$L = 13mm \quad D = 30mm \quad R = 15mm$$

$$a = 15mm \quad N = 780 vueltas \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

Cálculo aproximado del número de espiras N :

$$N = \frac{R}{\emptyset} \cdot \frac{L}{\emptyset} = \frac{15}{0,5} \cdot \frac{13}{0,5} = 780 \text{ vueltas.}$$

Cálculo de la intensidad necesaria a partir de la expresión (Ec. 5):

$$I_{bobina} = \frac{B \cdot 2 \cdot L}{\mu_0 \cdot N \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{R^2 + L^2}} + \frac{L + a}{\sqrt{R^2 + (L + a)^2}} - \frac{a}{\sqrt{R^2 + a^2}} \right)}$$

$$I_{bobina-50} = \frac{0,002198 \cdot 2 \cdot 0,013}{\mu_0 \cdot N \cdot \left(\frac{0,013}{\sqrt{0,015^2 + 0,013^2}} + \frac{0,013 + 0,015}{\sqrt{0,015^2 + (0,013 + 0,015)^2}} - \frac{0,015}{\sqrt{0,015^2 + 0,015^2}} \right)}$$

$$I_{bobina-50} = 0,0703 \text{ A} = 70,3 \text{ mA}$$

$$I_{bobina-75} = \frac{0,001465 \cdot 2 \cdot 0,013}{\mu_0 \cdot N \cdot \left(\frac{0,013}{\sqrt{0,015^2 + 0,013^2}} + \frac{0,013 + 0,015}{\sqrt{0,015^2 + (0,013 + 0,015)^2}} - \frac{0,015}{\sqrt{0,015^2 + 0,015^2}} \right)}$$

$$I_{bobina-75} = 0,0468 \text{ A} = 46,8 \text{ mA}$$

$$I_{bobina-75} = \frac{0,001099 \cdot 2 \cdot 0,013}{\mu_0 \cdot N \cdot \left(\frac{0,013}{\sqrt{0,015^2 + 0,013^2}} + \frac{0,013 + 0,015}{\sqrt{0,015^2 + (0,013 + 0,015)^2}} - \frac{0,015}{\sqrt{0,015^2 + 0,015^2}} \right)}$$

$$I_{bobina-75} = 0,0351 \text{ A} = 35,1 \text{ mA}$$

Siguiendo estos pasos, se obtiene las tablas 17, 18 y 19, que se muestran a continuación.

Tabla 17. Estudio de la intensidad de corriente. Resultados para 50 Hz.

f (Hz)	B (T)	D (m)	R (m)	a (m)	L (m)	N (vueltas)	I _{bobina} (A)
50	0,002198	0,025	0,0125	0,0125	0,009	450	0,094330908
					0,01	500	0,088368946
					0,012	600	0,079852503
		0,03	0,015	0,015	0,012	720	0,073640788
					0,013	780	0,070305684
					0,014	840	0,067526986
		0,035	0,0175	0,0175	0,014	980	0,063120675
					0,0155	1085	0,059537855
					0,017	1190	0,056693324
		0,04	0,02	0,02	0,016	1280	0,055230591
					0,017	1360	0,053311396
					0,019	1520	0,050178513
		0,045	0,0225	0,0225	0,019	1710	0,047565764
					0,02	1800	0,04621613
					0,022	1980	0,04394935
		0,05	0,025	0,025	0,02	2000	0,044184473
					0,022	2200	0,041825838
					0,024	2400	0,039926252
		0,055	0,0275	0,0275	0,022	2420	0,040167703
					0,024	2640	0,038199337
					0,026	2860	0,036584612
						Promedio	0,056701

Tabla 18. Estudio de la intensidad de corriente. Resultados para 75 Hz.

f (Hz)	B (T)	D (m)	R (m)	a (m)	L (m)	N (vueltas)	I_{bobina} (A)
75	0,001465	0,025	0,0125	0,0125	0,009	450	0,062887272
					0,01	500	0,05891263
					0,012	600	0,053235002
		0,03	0,015	0,015	0,012	720	0,049093859
					0,013	780	0,046870456
					0,014	840	0,045017991
		0,035	0,0175	0,0175	0,014	980	0,04208045
					0,0155	1085	0,039691903
					0,017	1190	0,037795549
		0,04	0,02	0,02	0,016	1280	0,036820394
					0,017	1360	0,035540931
					0,019	1520	0,033452342
		0,045	0,0225	0,0225	0,019	1710	0,031710509
					0,02	1800	0,030810753
					0,022	1980	0,029299567
		0,05	0,025	0,025	0,02	2000	0,044184473
					0,022	2200	0,041825838
					0,024	2400	0,039926252
		0,055	0,0275	0,0275	0,022	2420	0,040167703
					0,024	2640	0,038199337
					0,026	2860	0,036584612
						Promedio	0,041624

Tabla 19. Estudio de la intensidad de corriente. Resultados para 100 Hz.

f (Hz)	B (T)	D (m)	R (m)	a (m)	L (m)	N (vueltas)	I_{bobina} (A)
100	0,001099	0,025	0,0125	0,0125	0,009	450	0,047165454
					0,01	500	0,044184473
					0,012	600	0,039926252
		0,03	0,015	0,015	0,012	720	0,036820394
					0,013	780	0,035152842
					0,014	840	0,033763493
		0,035	0,0175	0,0175	0,014	980	0,031560338
					0,0155	1085	0,029768927
					0,017	1190	0,028346662
		0,04	0,02	0,02	0,016	1280	0,027615296
					0,017	1360	0,026655698
					0,019	1520	0,025089257
		0,045	0,0225	0,0225	0,019	1710	0,023782882
					0,02	1800	0,023108065
					0,022	1980	0,021974675
		0,05	0,025	0,025	0,02	2000	0,044184473
					0,022	2200	0,041825838
					0,024	2400	0,039926252
		0,055	0,0275	0,0275	0,022	2420	0,040167703
					0,024	2640	0,038199337
					0,026	2860	0,036584612
						Promedio	0,034086

Los resultados se encuentran en un rango de [0,021;0,094] amperios, con un promedio total de 0,0441 A o 44,1 mA. Si redondeamos la cifra, se obtiene 40 mA, que se ha utilizado como valor simbólico para realizar el dimensionado del sistema de bobinas para el bioreactor.

Anejo II.

Cálculos de la solución adoptada.

Índice

Capítulo nº1: INTRODUCCIÓN.....	83
Capítulo nº2: DESARROLLO DE LOS CÁLCULOS.....	84
2.1 DIMENSIONADO DE LAS BOBINAS.....	84
2.1 POTENCIA GENERADA.	85

Capítulo nº1: INTRODUCCIÓN

En este anejo se muestra el desarrollo de los cálculos realizados en el dimensionado de las bobinas de la solución adoptada, en el apartado 3.5 del Documento nº1: *Memoria*. En él se ha llevado a cabo un dimensionado de una bobina a partir de la placa multipocillo escogida. Luego, se ha calculado el campo magnético generado por dos bobinas idénticas a la dimensionada, y la respectiva intensidad de la corriente eléctrica inducida en la espira.

Capítulo nº2: DESARROLLO DE LOS CÁLCULOS

2.1 DIMENSIONADO DE LAS BOBINAS.

Inicialmente, se cuenta con los datos mostrados en la tabla 20 para realizar los cálculos. Han sido extraídos del Capítulo nº3 del Documento nº1: *Memoria*.

Tabla 20. Datos iniciales para el cálculo de la solución adoptada.

Intensidad I_{bobina} (mA)	40
Diámetro cable bobina ϕ_{espira} (mm)	0,4
Resistencia eléctrica del oro R_{oro} (Ω)	0,25
Resistividad eléctrica del cobre ρ_{cobre} (Ωm)	$1,69 \cdot 10^{-8}$

En la tabla 21 se observa los valores definidos de distintos parámetros, tal como se ha explicado en el apartado 3.5 del Documento nº1: *Memoria*.

Tabla 21. Parámetros definidos para la solución adoptada.

Diámetro espira ϕ_{espira} (mm)	21
Distancia de separación a	22
Radio medio apróx. R_m de la bobina (mm)	22

En primer lugar, se han definido los radios exterior R_e e interior R_i a partir del radio medio R_m (Ec. 4).

$$R_m = \frac{R_e + R_i}{2} = \frac{24 + 14}{2} = 19 \text{ mm}$$

El R_m obtenido (19 mm) es similar al teórico (21 mm), por lo que el campo magnético generado por el par de bobinas será uniforme, como se explica en el apartado 2.1.3 del Documento nº1: *Memoria*. Se le ha otorgado una longitud L de bobina de 15 mm. Con estos datos se ha fabricado la bobina, y con un diámetro de cable de cobre ϕ_{cable} de 0,4 mm se han conseguido 650 espiras o vueltas de cable.

$$N = 650 \text{ espiras.}$$

A continuación, se ha calculado el campo magnético B generado por dos bobinas idénticas y con los parámetros definidos en un punto específico. Este punto está situado a una distancia $d = 0$ de una de las bobinas, y a de la otra. (Ec. 5).

$$B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{2 \cdot L} \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{R^2 + L^2}} + \frac{L + a}{\sqrt{R^2 + (L + a)^2}} - \frac{a}{\sqrt{R^2 + a^2}} \right)$$

$$B = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 650 \cdot 40 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 15} \cdot \left(\frac{15}{\sqrt{19^2 + 15^2}} + \frac{15 + 22}{\sqrt{19^2 + (15 + 22)^2}} - \frac{22}{\sqrt{19^2 + 22^2}} \right)$$

$$B = 0,819 \text{ mT}$$

Tras calcular el campo magnético generado, se obtiene el flujo magnético máximo $\phi_{m\acute{a}x}$ que circula por la espira (Ec. 6).

$$\phi_{m\acute{a}x} = B \cdot S_{espira} = B \cdot \pi \cdot \left(\frac{\phi_{espira}}{2}\right)^2 = 0,819 \cdot \pi \cdot \left(\frac{21}{2}\right)^2 = 283,67 \text{ mT} \cdot \text{mm}^2$$

Finalmente, ya se puede calcular la intensidad I de la corriente eléctrica inducida en la espira. Se ha obtenido a partir de la intensidad eficaz I_{ef} (Ec. 7). Se ha calculado considerando dos una frecuencias f distintas, 75 y 100 Hz.

$$I_{ef-75} = \frac{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot B \cdot S_{espira}}{R_{oro}} = \frac{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot 75 \cdot 0,819 \cdot \pi \cdot \left(\frac{21}{2}\right)^2}{0,25} = 378,09 \mu A$$

$$I_{75} = \sqrt{2} \cdot I_{ef-75} = 534,7 \mu A$$

$$I_{ef-100} = \frac{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot B \cdot S_{espira}}{R_{oro}} = \frac{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot 100 \cdot 0,819 \cdot \pi \cdot \left(\frac{21}{2}\right)^2}{0,25} = 504,12 \mu A$$

$$I_{100} = \sqrt{2} \cdot I_{ef-100} = 712,933 \mu A$$

2.1 POTENCIA GENERADA.

Cabe destacar que la corriente eléctrica que circula por las bobinas (con intensidad I_{bobina}) generará una potencia disipada en forma de calor, que se puede calcular con la resistividad ρ del material del cable empleado para el bobinado, el cobre.

$$\text{Longitud bobinado} = 2 \cdot \pi \cdot R_m \cdot N = 2 \cdot \pi \cdot 19 \cdot 10^{-3} \cdot 650 = 77,59 \text{ m/bobina}$$

$$\text{Resistencia bobinado} = \frac{\text{longitud bobinado} \cdot \rho_{cobre} \cdot 10^6}{S_{cable}}$$

$$\text{Resistencia bobinado} = \frac{77,59 \cdot 1,69 \cdot 10^{-8} \cdot 10^6}{\pi \cdot \left(\frac{0,4}{2}\right)^2} = 10,37 \Omega$$

Por tanto:

$$P = I_{bobina}^2 \cdot \text{Resistencia bobinado} = 40^2 \cdot 10^{-3} \cdot 10,37 = 16,592 \text{ mW/bobina}$$

Anejo III.

Planificación del mecanizado.

Índice

Capítulo nº1: INTRODUCCIÓN.....	91
Capítulo nº2: ESTRUCTURA PRINCIPAL.....	92
2.1 DATOS INICIALES.....	92
2.2 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN GEOMÉTRICA.....	93
2.3 ALTERNATIVAS DE PROCESOS-(OPERACIÓN).....	94
2.4 SELECCIÓN DE MÁQUINAS.....	96
2.5 AGRUPACIÓN DE OPERACIONES.....	97
2.6 SELECCIÓN UTILLAJES DE AMARRE.....	98
Capítulo nº3: BANDEJA.....	100
3.1 DATOS INICIALES.....	100
3.2 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN GEOMÉTRICA.....	101
3.3 ALTERNATIVAS DE PROCESOS-(OPERACIÓN).....	101
3.4 SELECCIÓN DE MÁQUINAS.....	102
3.5 AGRUPACIÓN DE OPERACIONES.....	103
3.6 SELECCIÓN DE UTILLAJES DE AMARRE.....	103
REFERENCIAS.....	105

Capítulo nº1: INTRODUCCIÓN

Este anejo consiste en el análisis de la planificación del mecanizado del bastidor del bioreactor. El bastidor está formado en total por una estructura principal y dos bandejas, por tanto, se cuenta con dos piezas distintas. En los siguientes capítulos se ha analizado su proceso de mecanizado. Se ha empleado el procedimiento desarrollado en el libro *Planificación de procesos de mecanizado*, escrito por profesores de la Universitat Politècnica de València. (González & Meseguer Calas, 2015). En él se siguen los distintos pasos para definir la fabricación final de las piezas

Capítulo nº2: ESTRUCTURA PRINCIPAL

2.1 DATOS INICIALES.

En el Documento nº2: *Planos* se encuentra toda la información respecto a las características dimensionales, las rugosidades y las tolerancias de la pieza. No obstante, en este anejo se han enumerado los superficies que la conforman (figura 28) además de las superficies iniciales del material en bruto "B", con el fin de simplificar la planificación. También se muestra en la tabla 22 las características dimensionales generales.

Tabla 22. Características dimensionales generales. Estructura principal.

Rugosidad por defecto (Ra)	3,6 μm
Tolerancia por defecto	js8
Material de partida	260*167*97 mm

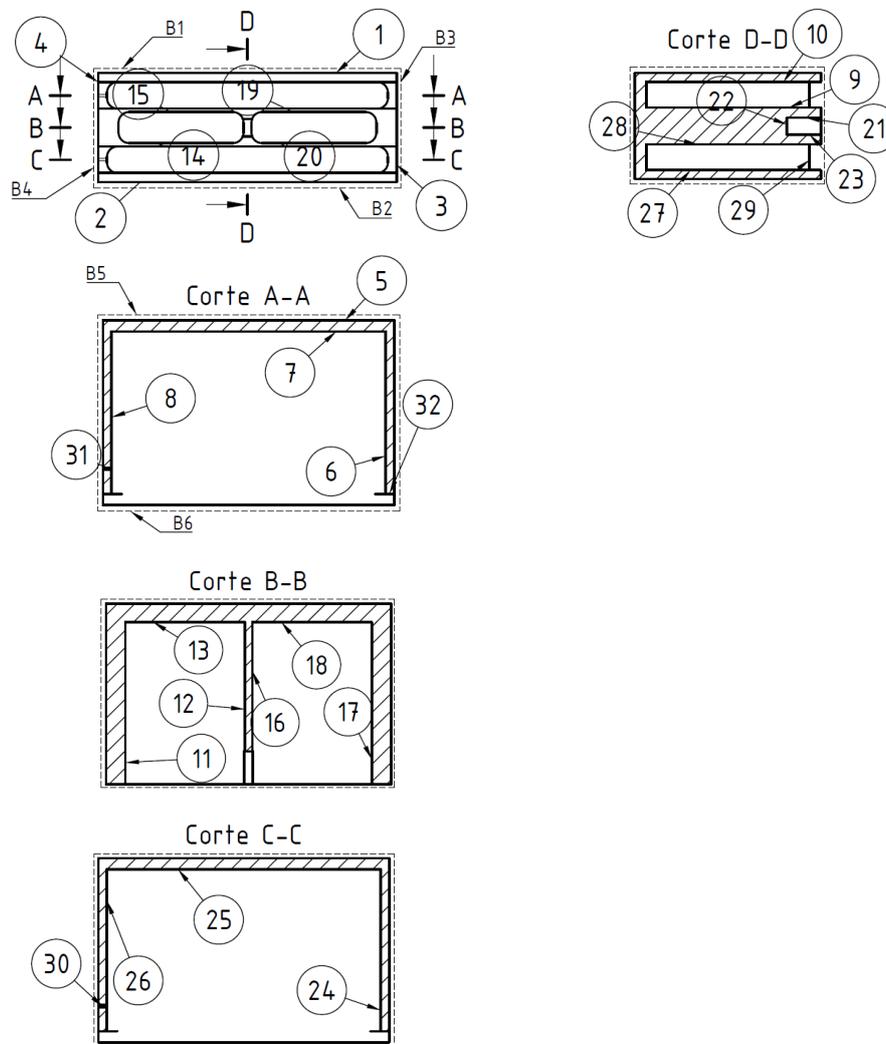


Figura 28. Numeración de superficies. Estructura principal.

2.2 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN GEOMÉTRICA.

El primer paso es analizar las siguientes características de la pieza:

- Tolerancias dimensionales o cotas: hacen referencia a la medida de las superficies. A su vez, estas tolerancias pueden ser intrínsecas o relativas. La primera pertenece a una sola superficie, mientras que la segunda abarca dos o más superficies.
- Tolerancias geométricas: indica la forma de las distintas superficies, o incluso su posición. Como las dimensionales, también pueden ser intrínsecas o relativas.
- Rugosidad: es el acabado superficial de cada superficie. Como es única para cada una, esta característica solo es intrínseca.

Tabla 23. Análisis de la información geométrica. Estructura principal.

Superficie	INTRÍNSECAS			RELATIVAS	
	Dimensional (IT)	Geométrica (-/100)	Rugosidad	Dimensional (IT)	Geométrica (-/100)
1			3,2	8	
2			3,2	8	
3			3,2	8	
4			3,2	8	
5			3,2	8	
6			1,6	8	
7			3,2	8	
8			1,6	8	
9			1,6	8	
10			3,2	8	
11			3,2	8	
12			3,2	8	
13			3,2	8	
14			3,2	8	
15			3,2	8	
16			3,2	8	
17			3,2	8	
18			3,2	8	
19			3,2	8	
20			3,2	8	
21			3,2	8	
22			3,2	8	
23			3,2	8	
24			1,6	8	
25			3,2	8	
26			1,6	8	
27			1,6	8	
28			3,2	8	
29			3,2	8	
30	9	0,1	3,2		
31	9	0,1	3,2		
32			0,8	6	

La rugosidad por defecto de la pieza es 3,2. No obstante, se ha reducido en aquellas zonas donde las distintas piezas del bastidor están en contacto, con finalidad de mejorar su acabado superficial y facilitar el acople entre ellas.

2.3 ALTERNATIVAS DE PROCESOS-(OPERACIÓN).

El mecanizado de la pieza puede hacerse mediante distintos procesos y tipos de operaciones. Es importante estudiar cuáles son mejores para cada geometría y superficie de la pieza, de esta forma la fabricación será más fácil.

Los procesos se realizarán con dos finalidades:

- Desbaste [D]: consiste en eliminar material para conseguir la geometría de la pieza.
- Acabado [A]: se realiza para obtener la rugosidad y tolerancia deseada de la capa superficial. Para ello se elimina 1 mm de materia.

Las tablas 24 y 25 contienen todos los procesos-(operación) que se pueden realizar en un mecanizado y las tolerancias que se pueden alcanzar con cada uno, junto a sus costes.

Tabla 24. Alternativas generales de procesos – (operación).

Procesos	Procesos-(operación)
Fresado frontal	Fresado frontal – (planeado) [D – A]
Fresado periférico	Fresado periférico – (planeado) [D – A] Fresado periférico – (contorneado) [D – A] Fresado periférico – (forma) [D – A+]
Fresado frontal-periférico	Fresado frontal – periférico – (general) [D – A] Fresado frontal – periférico – (ranurado) [D – A]
Torneado	Torneado – (cilindrado) [D – A] Torneado – (refrentado) [D – A] Torneado – (cilindrado cónico) [D – A] Torneado – (copiado) [D – A] Torneado – (ranurado radial o axial) [D] Torneado – (mandrinado) [D – A]
Rectificado	Rectificado – (planeado) [A] Rectificado – (cilindro interior) [A] Rectificado – (cilindro exterior) [A]
Operaciones	
Escariado (D<15mm)	Fresado – (escariado) [A] Torneado – (escariado) [A]
Taladrado (broca o fresa) (D<20mm)	Torneado – (taladrado) [D] Fresado – (taladrado) [D] Fresado – (lamado) [D] Fresado – (avellanado) [D]
Roscado	Torneado – (roscado) [A] Fresado – (roscado) [A]

Tabla 25. Capacidades y costes de cada proceso.

Procesos	Dimensión (IT)	Ra (μm)	Geométrica (-/100)	Coste desbaste ($\text{€}/\text{mm}^2$)	Coste acabado ($\text{€}/\text{mm}^2$)
Fresado frontal	6	0,4	0,01	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Fresado periférico	8	1,6	0,01	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Torneado	7	0,8	0,01	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Rectificado	4	0,1	0,002		$2 \cdot 10^{-4}$
Operaciones					
Escariado (D<15mm)	5	0,4	0,01		$3 \cdot 10^{-4}$
Taladrado (broca o fresa) (D<20mm)	9	3.2	0,001	$1 \cdot 10^{-5}$	
Roscado	7	0,4	0,01		$4 \cdot 10^{-4}$

Con esta información se ha estudiado cuáles se pueden realizar en la pieza (tabla 26). Cuando la superficie a mecanizar cuenta con unas creces de 1 mm es posible realizar solo un proceso de acabado. Cabe mencionar que se han agrupado algunas superficies que forman parte de un mismo volumen, ya que se mecanizan con la misma operación.

Tabla 26. Alternativas de procesos-(operación). Estructura principal.

Superficie	Proceso – (operación) [D]	Proceso – (operación) [A]
1		Fresado frontal–periférico (general) Fresado frontal (planeado) Fresado periférico (planeado)
2		Fresado frontal–periférico (general) Fresado frontal (planeado) Fresado periférico (planeado)
3		Fresado frontal–periférico (general) Fresado frontal (planeado) Fresado periférico (planeado)
4		Fresado frontal–periférico (general) Fresado frontal (planeado) Fresado periférico (planeado) Fresado frontal (planeado)
5		Fresado frontal–periférico (general) Fresado frontal (planeado) Fresado periférico (planeado)
6-7-8-9-10	Fresado frontal (7) – periférico (6-8-9-10) (general)	Fresado frontal (7) – periférico (6-7-8-9-10) (general)
11-12-13-14-15	Fresado frontal (13) –periférico (11-12-14-15) (general)	Fresado frontal (13) –periférico (11-12-14-15) (general)
16-17-18-19-20	Fresado frontal (18) –periférico (16-17-18-19-20) (general)	Fresado frontal (18) –periférico (16-17-18-19-20) (general)
21-22-23	Fresado frontal (22) –periférico (21-23) (general)	Fresado frontal (22) –periférico (21-23) (general)

24-25-26-27-28	Fresado frontal (25) –periférico (24-26-27-28) (general)	Fresado frontal (25) –periférico (24-26-27-28) (general)
29		Fresado frontal–periférico (general) Fresado frontal (planeado) Fresado periférico (planeado)
30-31	Fresado (taladrado)	
32	Fresado frontal-periférico (general) Fresado frontal (planeado)	Fresado frontal (planeado)

2.4 SELECCIÓN DE MÁQUINAS.

La mayoría de las superficies se pueden mecanizar mediante varias operaciones. Para elegir cuál realizar se va a atender a la máquina del proceso. Como cada proceso necesita una máquina distinta, se ha seleccionado los procesos-(operación) que compartan más máquinas (tabla 27), para así minimizar su número.

Tabla 27. Selección de máquinas. Estructura principal.

Superficie	Fresadora vertical		Fresadora horizontal		Torno		Rect. plana	Rect. cilíndrica
	[D]	[A]	[D]	[A]	[D]	[A]	[A]	[A]
1		X		X				
2		X		X				
3		X		X				
4		X		X				
5		X		X				
6-7-8-9-10	X	X						
11-12-13-14-15	X	X						
16-17-18-19-20	X	X						
21-22-23	X	X						
24-25-26-27-28	X	X						
29		X		X				
30-31	X							
32	X	X						

Como todas las alternativas de operaciones posibles son procesos de fresado, la máquina escogida para todo el mecanizado es la fresadora vertical. En la figura 29 se observa un ejemplo de un modelo de este tipo de máquina.



Figura 29. Máquina de fresadora vertical.
Fuente: <https://www.directindustry.es/>.

2.5 AGRUPACIÓN DE OPERACIONES.

Es importante ordenar las operaciones para facilitar el proceso de mecanizado. Para ello, se han agrupado en función del acceso de la herramienta de la máquina a la pieza en la tabla 28. En la figura 30 se indica todos los posibles accesos. Cabe destacar que los procesos de desbaste se realizan antes que los de acabado.

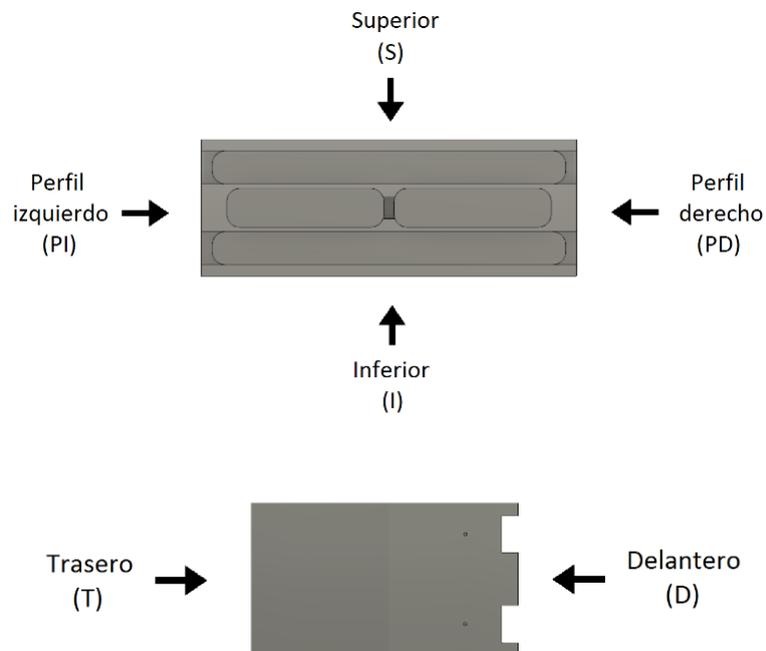


Figura 30. Accesos de la herramienta a la pieza. Estructura principal.

Tabla 28. Agrupación de procesos-(operación) según el acceso. Estructura principal.

MÁQUINA	ACCESO	SUPERFICIE	PROCESO – (OPERACIÓN)
FRESADORA VERTICAL	D	6-7-8-9-10	Fresado frontal–periférico (general) [D y A]
		11-12-13-14-15	Fresado frontal–periférico (general) [D y A]
		16-17-18-19-20	Fresado frontal–periférico (general) [D y A]
		21-22-23	Fresado frontal–periférico (general) [D y A]
		24-25-26-27-28	Fresado frontal (planeado) [A]
		29	Fresado frontal (planeado) [A]
		32	Fresado frontal (planeado) [D y A]
	PI	30-31	Fresado (taladrado) [D]
		4	Fresado frontal (planeado) [A]
	S	1	Fresado frontal (planeado) [A]
	I	2	Fresado frontal (planeado) [A]
	PD	3	Fresado frontal (planeado) [A]
	T	5	Fresado frontal (planeado) [A]

2.6 SELECCIÓN UTILLAJES DE AMARRE.

Por último, se ha seleccionado la mordaza como utillaje de amarre para todos los procesos debido a su versatilidad en piezas prismáticas y de bajo coste. En la tabla 29 se muestra el plan final de mecanizado de la pieza.

Tabla 29. Plan de proceso de mecanizado. Estructura principal.

MÁQUINA	UTILLAJE	ACCESO	SUPERFICIE	PROCESO
FRESADORA VERTICAL	Mordaza	D	6-7-8-9-10	Fresado frontal–periférico (general) [D y A]
			11-12-13-14-15	Fresado frontal–periférico (general) [D y A]
			16-17-18-19-20	Fresado frontal–periférico (general) [D y A]
			21-22-23	Fresado frontal–periférico (general) [D y A]
			24-25-26-27-28	Fresado frontal (planeado) [A]
			29	Fresado frontal (planeado) [A]
			32	Fresado frontal (planeado) [D y A]
	Mordaza	PI	30-31	Fresado (taladrado) [D]
			4	Fresado frontal (planeado) [A]
	Mordaza	S	1	Fresado frontal (planeado) [A]
	Mordaza	I	2	Fresado frontal (planeado) [A]
	Mordaza	PD	3	Fresado frontal (planeado) [A]
	Mordaza	T	5	Fresado frontal (planeado) [A]

En la tabla 30 se indica la posición de la pieza en el amarre para cada secuencia. Se ha seguido el criterio de la figura 31.

Tabla 30. Posición de la estructura principal en cada amarre. Estructura principal.

MÁQUINA	UTILLAJE	SUPERFICIE REFERENCIA	SUPERFICIE DE FUERZA
FRESADORA VERTICAL	Mordaza	Referencia 1: B5 Referencia 2: B4 Referencia 3: B2	B3
	Mordaza	Referencia 1: B3 Referencia 2: B5 Referencia 3: B2	B6
	Mordaza	Referencia 1: B2 Referencia 2: B4 Referencia 3: B6	B3
	Mordaza	Referencia 1: B1 Referencia 2: B4 Referencia 3: B5	B3
	Mordaza	Referencia 1: B4 Referencia 2: B6 Referencia 3: B2	B5
	Mordaza	Referencia 1: B6 Referencia 2: B3 Referencia 3: B5	B4

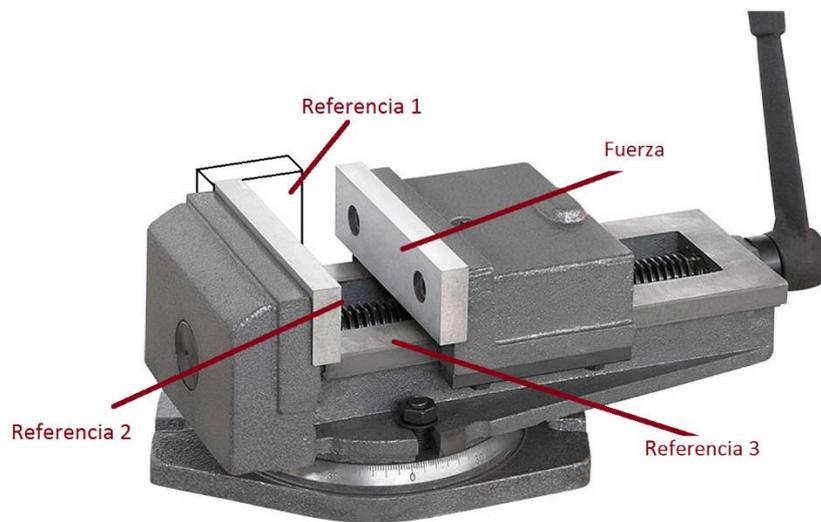


Figura 31. Mordaza y superficies de referencia.
Fuente: <https://maquinaria10.com/> con edición propia.

Capítulo nº3: BANDEJA

Esta pieza es la encargada de sujetar las bobinas. El bastidor cuenta con dos de ellas y van colocadas dentro de la estructura principal. Para el análisis de su mecanizado se ha seguido el mismo procedimiento y criterios que en la primera pieza.

3.1 DATOS INICIALES.

Todas las características de la pieza se encuentran en el Documento nº2: Planos. En la figura 32 se enumeran las distintas superficies que la conforman, para así realizar la planificación. Las características generales de la pieza se muestran en la tabla 31.

Tabla 31. Características dimensionales generales. Bandeja.

Rugosidad por defecto (Ra)	3,2 μm
Tolerancia por defecto	js8
Material de partida	260*157*25 mm

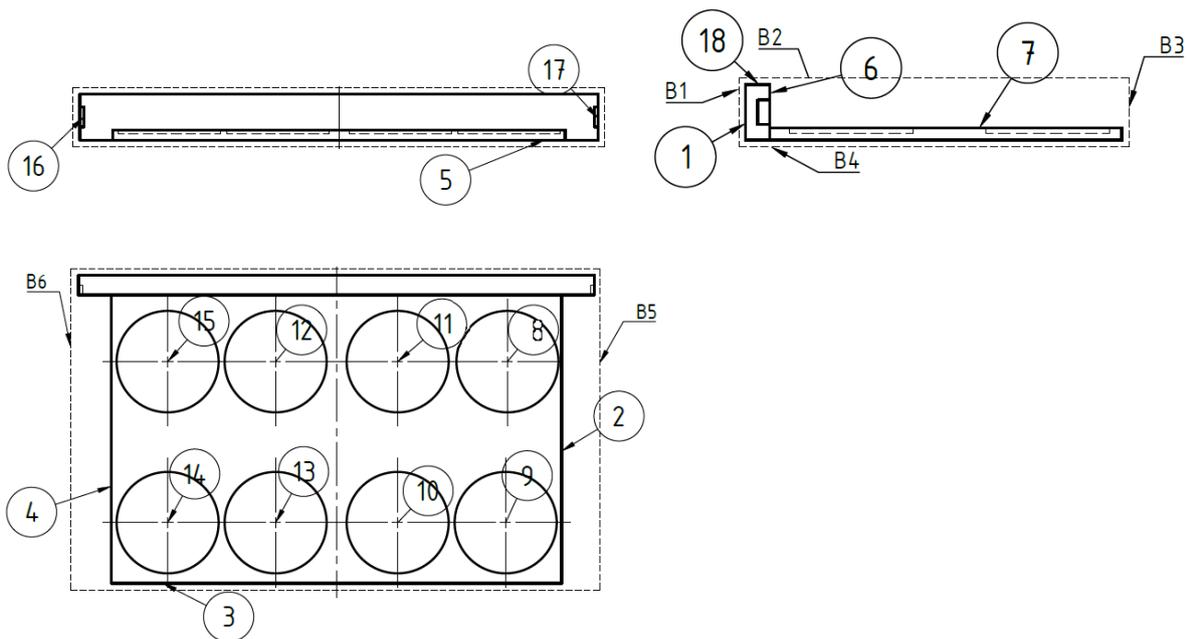


Figura 32. Numeración de superficies. Bandeja.

3.2 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN GEOMÉTRICA.

El análisis geométrico de la bandeja se indica en la tabla 32 e incluye todas las características explicadas, en el apartado 1.2, de la estructura principal.

Tabla 32. Análisis de la información geométrica. Bandeja.

Superficie	INTRÍNSECAS			RELATIVAS	
	Dimensional (IT)	Geométrica (-/100)	Rugosidad	Dimensional (IT)	Geométrica (-/100)
1			3,2	8	
2			1,6	8	
3			3,2	8	
4			1,6	8	
5			1,6	8	
6			0,8	6	
7			3,2	8	
8			3,2	8	
9			3,2	8	
10			3,2	8	
11			3,2	8	
12			3,2	8	
13			3,2	8	
14			3,2	8	
15			3,2	8	
16			3,2	8	
17			3,2	8	
18			3,2	8	

3.3 ALTERNATIVAS DE PROCESOS-(OPERACIÓN).

A partir de la información suministrada en las tablas 24 y 25, se ha analizado qué procesos-(operación) se pueden realizar en cada superficie (tabla 33). Al igual que en la pieza nº1, se han agrupado varias superficies que conforman un mismo volumen y se pueden mecanizar con el mismo proceso-(operación).

Tabla 33. Alternativas de procesos-(operación). Bandeja.

Superficie	Proceso – (operación) [D]	Proceso – (operación) [A]
1		Fresado frontal-periférico (general) Fresado frontal (planeado) Fresado periférico (planeado)
2	Fresado frontal-periférico (general) Fresado frontal (planeado)	Fresado frontal-periférico (general) Fresado frontal (planeado)
3		Fresado frontal-periférico (general) Fresado frontal (planeado) Fresado periférico (planeado)

4	Fresado frontal-periférico (general) Fresado frontal (planeado)	Fresado frontal-periférico (general) Fresado frontal (planeado)
5		Fresado frontal-periférico (general) Fresado frontal (planeado) Fresado periférico (planeado)
6-7	Fresado frontal (7) – periférico (6) (general)	Fresado frontal (7) – periférico (6) (general)
8-9-10- 11-12-13- 14-15	Torneado (taladrado) Fresado frontal-periférico (general)	Fresado frontal-periférico (general)
16	Fresado frontal-periférico (general)	Fresado frontal-periférico (general)
17	Fresado frontal-periférico (general)	Fresado frontal-periférico (general)
18		Fresado frontal-periférico (general) Fresado frontal (planeado) Fresado periférico (planeado)

3.4 SELECCIÓN DE MÁQUINAS.

Para simplificar el proceso de mecanizado, se han escogido (tabla 34) la herramienta que más procesos-(operación) de la tabla 33 puede realizar, la fresadora vertical. Como es la única herramienta que se va a emplear, el proceso se ha facilitado mucho, al igual que en la estructura principal.

Tabla 34. Selección de máquinas. Bandeja.

Superficie	Fresadora vertical		Fresadora horizontal		Torno		Rect. plana	Rectif. Cilíndrica
	[D]	[A]	[D]	[A]	[D]	[A]	[A]	[A]
1		X	X	X				
2	X	X						
3		X	X	X				
4	X	X						
5		X	X	X				
6-7	X	X						
8-9-10-11-12- 13-14-15	X	X			X			
16	X	X						
17	X	X						
18		X	X	X				

3.5 AGRUPACIÓN DE OPERACIONES.

Se ha agrupado los procesos-(operación) según el acceso de la herramienta a la pieza (tabla 35). En la figura 33 se muestran los distintos accesos para la bandeja.

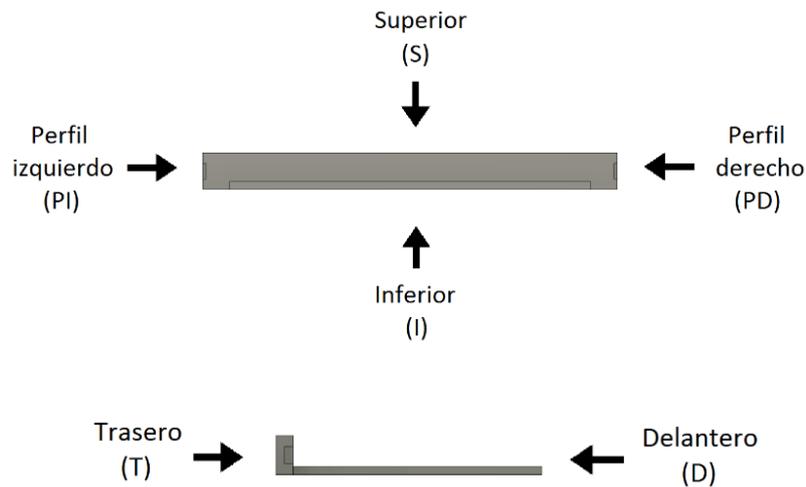


Figura 33. Accesos de la herramienta a la pieza. Bandeja.

Tabla 35. Agrupación de procesos-(operación) según el acceso. Bandeja.

MÁQUINA	ACCESO	SUPERFICIE	PROCESO
Fresadora vertical	PD	2	Fresado frontal-periférico (general) [D y A]
		17	Fresado frontal-periférico (general) [D y A]
	PI	4	Fresado frontal-periférico (general) [D y A]
		16	Fresado frontal-periférico (general) [D y A]
	S	6-7	Fresado frontal-periférico (general) [D y A]
		8-9-10-11-12-13-14-15	Fresado frontal-periférico (general) [D y A]
		18	Fresado frontal (planeado) [A]
	T	1	Fresado frontal (planeado) [A]
	D	3	Fresado frontal (planeado) [A]
		6	Fresado frontal (planeado) [A]
I	5	Fresado frontal (planeado) [A]	

3.6 SELECCIÓN DE UTILLAJES DE AMARRE.

Debido al pequeño espesor de la bandeja, el amarre seleccionado para su mecanizado son las bridas, por su capacidad de sujetar piezas que cuentan con una forma más irregular. El uso de este utillaje eleva considerablemente el coste del mecanizado, sin embargo, es la mejor opción. La mordaza, pese a ser versátil y más económica, puede dificultar el mecanizado en ciertas superficies, ya que, si la superficie de referencia 3 es notablemente mayor que la 2, la fuerza que ejerce la herramienta sobre la pieza puede derivar en una deformación de esta misma, e incluso su rotura.

Aunque para mecanizar ciertas superficies sí se podría emplear la mordaza sin generar ningún problema, el uso de dos utillajes distintos sería aún más caro. Es por eso, que todo el proceso se llevará a cabo con las bridas (tabla 36).

Tabla 36. Plan de proceso de mecanizado. Bandeja.

MÁQUINA	UTILLAJE	ACCESO	SUPERFICIE	PROCESO
FRESADORA VERTICAL	Bridas	PD	2	Fresado frontal–periférico (general) [D y A]
			17	Fresado frontal–periférico (general) [D y A]
		PI	4	Fresado frontal–periférico (general) [D y A]
			16	Fresado frontal–periférico (general) [D y A]
	Bridas	S	6-7	Fresado frontal–periférico (general) [D y A]
			8-9-10-11-12-13-14-15	Fresado frontal–periférico (general) [D y A]
			18	Fresado frontal (planeado) [A]
	Bridas	T	1	Fresado frontal (planeado) [A]
	Bridas	D	3	Fresado frontal (planeado) [A]
			6	Fresado frontal (planeado) [A]
	Bridas	I	5	Fresado frontal (planeado) [A]

REFERENCIAS

González, C. F., & Meseguer Calas, M. D. (2015). *Planificación de procesos de mecanizado*. Universitat Politècnica de València.