



Proyecto Fin de Carrera

Pedal motriz electromagnético: Maqueta y análisis mediante el
Método de Elementos Finitos.

Autor/es

Jonathan Izquierdo Carretero

Director/es y/o ponente

Antonio Usón Sardaña

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2013-II-16

ÍNDICE.

Contenido

| | |
|--|----|
| 1.-Introducción..... | 5 |
| 1.1.- Alcance del proyecto..... | 5 |
| 2.- Antecedentes..... | 6 |
| 3.- Estudio de la maqueta original. | 7 |
| 3.1.- Elementos constructivos..... | 7 |
| 3.1.1.- Mecanismo biela manivela. | 9 |
| 3.2.- Elementos electrónicos..... | 10 |
| 4.- Mejoras respecto a la maqueta original. | 12 |
| 4.1.- Mejoras constructivas..... | 13 |
| 4.2.- Mejoras eléctricas..... | 14 |
| 5.- Creación y montaje de piezas. | 14 |
| 5.1.- Piezas de madera. | 15 |
| 5.2.- Piezas de metacrilato. | 16 |
| 5.3.- Tornillería. | 21 |
| 6.- Electromagnetismo. Principio de funcionamiento del electroimán. | 22 |
| 6.1.- Ley de Biot-Savart. | 22 |
| 6.1.1.- Campo magnético creado por una espira..... | 25 |
| 6.1.2.- Campo magnético creado por un solenoide..... | 26 |
| 6.2.- Ley de Ampère. | 29 |
| 6.2.1 Campo magnético creado por un cilindro macizo. | 30 |
| 6.2.2 Campo magnético creado por un solenoide..... | 31 |
| 6.3.- Diferencia entre la Ley de Biot-Savart y la Ley de Ampère..... | 32 |
| 6.4.- Flujo magnético..... | 32 |
| 6.5.- Ley de Gauss del magnetismo..... | 33 |
| 7.- Método de elementos finitos (MEF)..... | 34 |
| 7.1.- Características de la bobina. | 34 |
| 7.2.- Simulación con FEMM..... | 36 |
| 7.2.1.- Simulación 1..... | 40 |
| 7.2.2.- Simulación 2..... | 42 |

| | |
|---|----|
| 7.2.3.- Simulación 3..... | 42 |
| 7.2.4.- Simulación 4..... | 43 |
| 7.2.5.- Simulación 5..... | 43 |
| 7.2.6.- Simulación 6..... | 43 |
| 7.2.7.- Simulación 7..... | 43 |
| 7.2.8.- Simulación 8..... | 43 |
| 7.2.9.- Simulación 9..... | 44 |
| 7.2.10.- Simulación 10..... | 44 |
| 7.2.11.- Simulación 11..... | 45 |
| 7.3.- Teorema del tensor de Maxwell..... | 45 |
| 7.5.- Desarrollo de los cálculos obtenidos..... | 47 |
| 8.- Electrónica..... | 49 |
| 8.1.-Fuente de alimentación..... | 50 |
| 8.2.-Diseño placa electrónica..... | 52 |
| 8.3.- Circuito electrónico..... | 54 |
| 8.4.- Montaje de la placa electrónica..... | 57 |
| 9.- Conclusiones..... | 58 |
| 10.- Bibliografía..... | 59 |
| 10.- Anexos..... | 60 |
| 10.1.- Planos..... | 60 |
| 10.1.1- Plano 1 hoja 1..... | 61 |
| 10.1.2- Plano 1 hoja 2..... | 62 |
| 10.1.3- Plano 1 hoja 3..... | 63 |
| 10.1.4- Plano 1 hoja 4..... | 64 |
| 10.1.5- Plano 2 hoja 1..... | 65 |
| 10.1.6- Plano 2 hoja 2..... | 66 |
| 10.1.7- Plano 3 hoja 1..... | 67 |
| 10.1.8- Plano 3 hoja 2..... | 68 |
| 10.1.9- Plano 3 hoja 3..... | 69 |
| 10.1.10- Plano 3 hoja 4..... | 70 |
| 10.1.11- Plano 4 hoja 1..... | 71 |



| | |
|---|----|
| 10.2- Hojas de características..... | 72 |
| 10.2.1- Amplificador Operacional UA741CN..... | 72 |
| 10.2.2- Transistor NPN 548B..... | 78 |
| 10.2.3- Transistor PNP BD138..... | 83 |

1.-Introducción.

El proyecto que nos ocupa es de los catalogados tipos B según la normativa de proyectos fin de carrera de la Universidad de Zaragoza. El tutor del proyecto es el Profesor de Electromagnetismo del Dpto. de Ingeniería Eléctrica, Antonio Usón Sardaña.

El objetivo del presente proyecto es poner en funcionamiento una maqueta compuesta en esencia por un mecanismo biela-manivela gobernado por una bobina que hará las veces de electroimán en función de la posición, donde jugará un papel importante el sistema electrónico para el correcto funcionamiento en el momento deseado.

Con esta idea, iremos profundizando en todos los aspectos referidos en el proyecto, atendiendo todas las fases y etapas del proceso de construcción tanto eléctricas como mecánicas y dando soporte más específico en los temas que requieran una mayor complejidad.

Este proyecto tiene carácter didáctico, nos servirá para estudiar y comprender cómo se comporta una bobina de corriente continua al paso de una corriente por la misma y cómo podemos hacer que esta fuerza sea efectiva en un diseño mecánico de biela manivela transformando el movimiento lineal en rotacional. Otro aspecto que se cuidará será el control electrónico del movimiento a través de un circuito creado exclusivamente para tal fin.

Para el estudio electromagnético se hará uso del método de elementos finitos (MEF). En los modelos desarrollados en MEF se utilizará un programa gratuito el FEMM 4.2 desarrollado por David Meeker.

1.1.- Alcance del proyecto.

Como se ha comentado antes, el alcance del proyecto es principalmente didáctico, una representación muy visual donde se conjugan los tres bloques mencionados, parte mecánica (biela manivela), parte magnética (bobina) y parte electrónica (control). El proyecto quedará a disposición del Dpto. de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Zaragoza donde será utilizado en aplicaciones docentes. De forma individual los tres ámbitos de trabajo tienen una gran relevancia a nivel industrial.

2.- Antecedentes.

Para ver los primeros pasos en la utilización de electroimanes a la hora de crear un movimiento continuo tenemos que remontarnos al siglo XIX a Paul Gustave Froment (París 3 de marzo 1815-1865). Fue ingeniero eléctrico y en 1844 ideó lo que conocemos como “motor de Froment”. Basándose en un artilugio oscilante movido por electroimanes creado por Joseph Henry (1797-1878), y también influenciado por el diseño de la máquina de vapor. El motor de Froment obedece a un sistema de electroimanes que impulsan alternativamente a sus núcleos móviles, produciendo un movimiento lineal, que un cigüeñal y un volante de inercia transforman en rotativo.

Esto tiene cierta similitud con nuestro prototipo, que, aunque no es un motor propiamente dicho, si hacemos uso del campo magnético creado por un electroimán para conseguir el movimiento deseado. El motor Froment fue desplazado poco después por los motores rotativos, quedando convertido en mera curiosidad.

Precisamente una de las mayores ventajas de los motores eléctricos sobre los de vapor fue su manifestación en forma de energía rotativa, sin mecanismos intermedios, por ello la idea de Froment no pudo prosperar.

El diseño original es como el que nos muestra la figura 2. Queremos hacer referencia a una dirección de internet donde se hacen maquetas funcionales de gran calidad y donde podemos ver un motor como este en funcionamiento.

La dirección web es:



Fig. 1. Paul Gustave Froment
1815-1865. Wikipedia

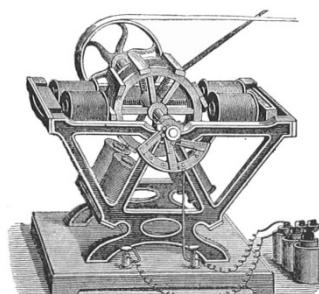


Fig. 2. Diseño original del motor de Froment. Wikipedia.

Y podemos ver el vídeo de cómo funciona pinchando es siguiente link:

<http://www.youtube.com/watch?v=dNca7DZ9NLY>

3.- Estudio de la maqueta original.

En este apartado vamos a abordar todo lo necesario para crear una línea de trabajo efectiva evitando dejar cabos sueltos o procesos a la improvisación. Con esto se consigue optimizar el rendimiento del esfuerzo y mejorar de antemano y en base a unas conclusiones todo el proceso de fabricación, marcando como objetivo final el correcto funcionamiento de la maqueta con las mejores prestaciones posibles. Es importante destacar que algunos errores o problemas que puedan ir surgiendo durante la construcción de la maqueta se deben solucionar durante el proceso. Es fácil encontrarnos en situaciones que no se preveían, pero ello no nos desmarcará de la línea de trabajo fijada.

Con esto el paso inicial es hacer un pequeño estudio de la maqueta que presentamos en la imagen de la derecha (figura 3). Este fue un proyecto ideado hace años por dos alumnos de la Universidad de Zaragoza que son Francisco Conchán y Javier Araguas.

En su inicio el proyecto funcionaba perfectamente pero el desuso y el paso del tiempo han hecho que actualmente no funcione y es nuestro cometido darle una nueva cara y mejorar el trabajo que ya hicieron.

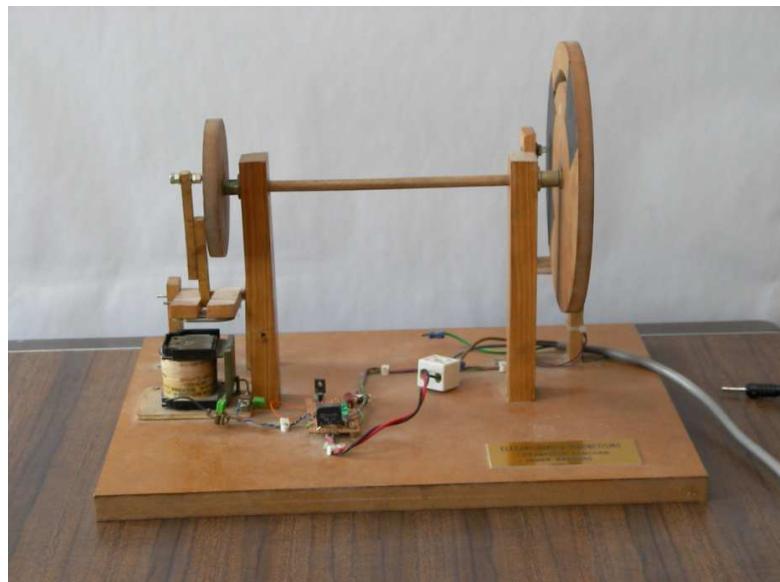


Fig. 3. Maqueta original.

3.1.- Elementos constructivos.

Primeramente nos fijamos en el material en que se hizo la maqueta, es toda ella de madera, tanto los elementos móviles como eje, ruedas, biela etc. como las partes fijas donde se incluyen los soportes y la base.

La madera en sí, no es un mal material pero sufre mucho con el paso del tiempo y lo que hemos podido comprobar es que la madera se ha deformado en algunos puntos, esto hace que exista un rozamiento excesivo. Otro detalle es que las partes móviles debido al uso han cogido holgura, es un problema porque impide el correcto funcionamiento de la máquina que ha de ser lo más suave posible evitando golpes.

La figura 3 nos sirve para comentar las piezas de las que se compone. Tenemos dos soportes básicos utilizados para el eje principal al que están acopladas sendas ruedas en sus extremos cada una de ellas de un diámetro claramente diferenciado. Junto a la rueda de mayor diámetro vemos dos soportes, uno de ellos utilizado para albergar la fuente de luz y en otro el detector lumínico. Lo veremos más claramente en las figuras 4a y 4b.

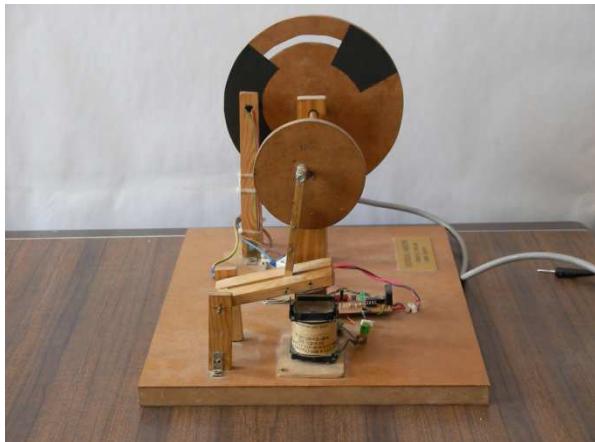


Fig. 4a. Perfil izquierdo



Fig. 4b. Perfil derecho

En la figura 4a vemos junto a la rueda grande un eje donde está el emisor de luz y en la figura 4b se ve la parte posterior con el soporte del detector lumínico.

Vamos a prestar especial atención en los puntos donde confluyen las partes móviles con las fijas y nos damos cuenta que no hay ningún elemento colocado, por consiguiente estas zonas están propensas a sufrir desgastes y perder funcionalidad presentando fuerzas de rozamiento totalmente evitables, amén de evitar chirridos producidos por la fricción de la madera.

Como parte constructiva ya solo nos queda hablar de la zona más importante a nivel mecánico, pues es la encargada de transformar el movimiento lineal en circular, estamos hablando del mecanismo biela manivela.

Éste es un punto que explicaremos con más detalle porque es fundamental para comprender cómo funciona el proyecto y además es necesario para hacer las piezas de manera adecuada.

3.1.1.- Mecanismo biela manivela.

En la imagen de la figura 4a vemos el perfil izquierdo de la maqueta donde se muestra el mecanismo biela manivela. Éste es un mecanismo clásico y su función es transformar un movimiento de traslación en un movimiento circular o viceversa. Este tipo de mecanismo se viene utilizando desde hace siglos, un ejemplo muy esquemático es el de las locomotoras de vapor, con mayor antelación podemos decir que los romanos ya lo utilizaban en, por ejemplo, la serrería de Hierápolis (<http://es.wikipedia.org/wiki/Biela-manivela>) y como uso más extendido citamos el motor de combustión de los automóviles en el cual el movimiento lineal del pistón producido por la explosión de la gasolina se transmite a la biela y se convierte en un movimiento circular en el cigüeñal.

Las partes a definir son, por un lado la *biela* que es el elemento mecánico que sometido a esfuerzos de tracción o compresión, transmite el movimiento articulado a otras partes de la máquina, y por otro lado la *manivela* compuesta de dos ramas, una de las cuales se fija por un extremo en el eje de una rueda, en nuestro caso el eje no es concéntrico y la otra rama forma el mango para mover el brazo.

El esfuerzo que transmite una manivela cumple la ecuación de equilibrio de las palancas, ecuación 1.

$$M = F \times D \quad (1)$$

El resultado de multiplicar una fuerza por su distancia al punto de giro se denomina "momento".

Con lo dicho anteriormente podemos identificar perfectamente la biela, es la barra que une la rueda con la pieza móvil soportada en su extremo para hacer palanca, pero la manivela nos resulta imposible de distinguir y esto es porque en nuestro caso tenemos un sistema excéntrico, por tanto lo que debería hacer las veces de manivela se consigue conectando la biela de forma excéntrica respecto del eje. Se ve muy claramente en la siguiente figura 5.

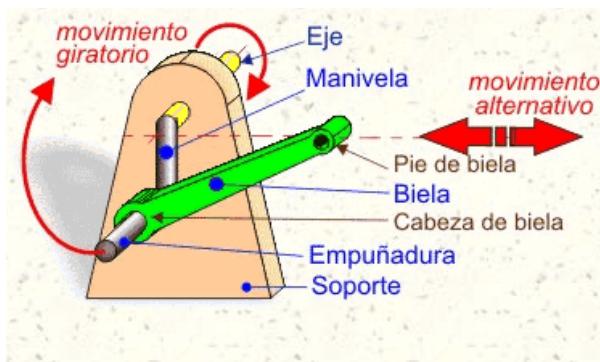


Fig. 5. Mecanismo biela-manivela

(http://concurso.cnice.mec.es/cniece2006/material107/mecanismos/mec_bielamanivela.htm)

Ahora sí podemos ver que nuestro sistema obedece a la figura de la derecha, la de la izquierda está representada para ver cómo es el sistema biela-manivela.

Existen unas pautas a tener en cuenta cuando diseñamos un sistema como este y que nos ayudarán a comprender si el mecanismo que ya tenemos tiene un buen rendimiento. Estas premisas son:

- La longitud entre el centro de la rueda y el eje excéntrico determina el movimiento de la biela. Este recorrido se denomina “carrera” y hay que considerar una distancia mucho más corta que la longitud de la biela, puesto que la carrera es 2 veces la distancia entre ejes.
- Para que el sistema funcione adecuadamente se deben emplear bielas cuya longitud sea al menos 4 veces la distancia entre los dos ejes.
- Tomando la base de la biela como elemento motriz y la cabeza de la biela asociada al eje excéntrico como elemento resistente (potencia útil), cuanto mayor es la distancia entre ejes menor será la fuerza que aparece en la cabeza de la biela.

La distancia entre ejes es muy inferior a la distancia de la biela y pese a que la reducción de esta distancia hace que aumente la fuerza a realizar en la cabeza de la biela esperamos que el elemento que nos aplica esa fuerza que es la bobina pueda realizar con éxito dicha misión. Por tanto el mecanismo biela excéntrica a priori posee unas buenas características en cuanto a funcionalidad.

3.2.- Elementos electrónicos.

No son muchos los elementos que conforman el apartado de control por parte de elementos electrónicos. Primero y más visible, nos encontramos con la placa electrónica propiamente dicha.

En la figura 6 se ve una imagen de la placa con todos los elementos externos a ella desconectados, de ahí que se vean cables cortados.

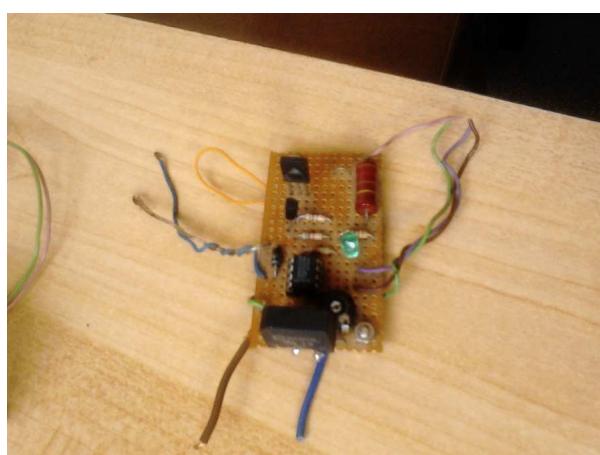


Fig. 6. Placa electrónica original.

Esta placa de baquelita es lo que se conoce como matriz de puntos. Es una placa con taladros normalizados donde los componentes que usemos no quedan interconectados sino que debemos realizar nosotros las conexiones con estaño y soldador. Podemos realizar circuitos más fiables y desde luego de forma permanente, al estar los componentes soldados. A la hora de realizar este tipo de placas es importante saber que se puede complicar bastante con el número de conexiones y fácilmente podemos equivocarnos al soldar los componentes.

Podemos tomar esta placa como punto de partida para hacer nuestro diseño circuital. Para ello es necesario conocer los elementos que la componen y sus características.

Vamos a comenzar con el primer elemento que se ve en la figura, el rectángulo negro que hay empezando de abajo hacia arriba. Obedece al nombre de RS202L, podemos ver su hoja de características (datasheet) en los anexos. Sin entrar en detalles diremos que su función es la de rectificar la señal de entrada. De esta forma toda la placa funciona en corriente continua (DC).

Continuamos con un pequeño elemento de carácter circular, es simplemente un potenciómetro de tres patas con una impedancia máxima de $10\text{ k}\Omega$.

Seguimos con el amplificador operacional (AO), en este caso es un UA741 de Philips, su hoja de características la podemos encontrar en los anexos.

Más elementos que podemos ver son varias resistencias de diferentes valores óhmicos, un diodo led que en principio será de señalización, otro diodo simple y como componente final dos transistores, el más pequeño es un NPN C547C que como principal característica diremos que su ganancia hfe es de 270, y ya para terminar el transistor que nos queda es un BD137, también NPN, este transistor es utilizado para temas de potencia puesto que soporta mayores corrientes de funcionamiento.

Ya tenemos los elementos que componen la placa, ahora los elementos externos, como dispositivo luminoso tenemos una bombilla incandescente de reducidas dimensiones, en la figura 7a se ve iluminada y ya desconectada en la figura 7b.



Fig. 7a. Bombilla iluminada

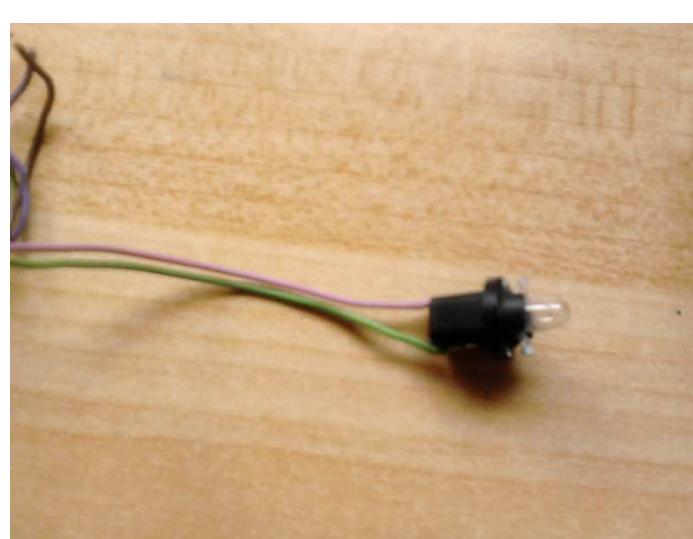


Fig. 7b. Bombilla apagada.

En la posición enfrente de la bombilla tenemos una resistencia sensible a la luz, lo que conocemos por LDR. Este lo que hace es simplemente variar su resistencia en función de la cantidad de luz aplicada al mismo, por tanto a más luz menos valor resistivo y viceversa. Se hizo una medición de cuál era su resistencia máxima y se concluyó en que podría llegar a las 100 kΩ.

Y ya solo nos queda por identificar la bobina. No es parte electrónica propiamente dicha pero está asociada a ella, es el elemento a controlar, quien aplicará por medio de un campo magnético la fuerza necesaria para hacer funcionar todo el mecanismo. Posee dos valores destacados, su alimentación que es de 24 V DC y la resistencia óhmica que presenta, que son 107 Ω. Está constituida por numerosos arrollamientos de hilo de cobre de diámetro $\emptyset = 0,28mm$, con este datos haremos una estimación del número de vueltas para poder conocer su comportamiento magnético.

Conociendo estos datos despejamos rápidamente, a través de la ley de Ohm, su corriente de funcionamiento y por tanto su potencia.

$$V = R \times I \quad (2)$$

$$I = \frac{24}{107} = 224mA \quad (3)$$

Con la intensidad ya conocida calculamos su potencia.

$$P = V \times I = 24 \times 0,224 = 5,38W \quad (4)$$

Ahora ya sabemos todos los elementos de que disponemos para poder establecer una línea de trabajo que nos permita mejorar la maqueta y hacerla funcionar con todas las garantías posibles. Llegamos al siguiente apartado.

4.- Mejoras respecto a la maqueta original.

Ya hemos citado los elementos que tenemos, con las características más importantes y ahora en este apartado vamos a hacer un diseño preliminar de nuestra maqueta y a formar una línea de trabajo efectiva evitando dejar cabos sueltos o procesos a la improvisación. De esta forma aumentaremos el rendimiento a la hora de fabricar las piezas. Cabe destacar que algunos errores o problemas que puedan ir surgiendo durante la construcción de la maqueta se deben solucionar durante el proceso.

4.1.- Mejoras constructivas.

El primer paso es saber de qué material vamos a hacer las diferentes piezas. Ya hemos visto anteriormente que era toda de madera pero ésta demostraba algunos defectos que acortaron la vida del prototipo antiguo dejándolo sin uso en la actualidad. Estos problemas consistían principalmente en deformaciones propias de las piezas de madera y en algunos casos holgura de las partes móviles.

Dicho esto se ha optado por modificar el material base de la maqueta y sustituir la madera por metacrilato. Este compuesto posee mayor dureza que la madera y no se degrada con el paso del tiempo, soporta mejor todo tipo de esfuerzos y es aislante eléctrico de igual manera. El metacrilato que usaremos es transparente con lo que conseguiremos mejorar la calidad visual del conjunto y con su espesor de 10 mm nos permite hacer cualquier tipo de pieza sin miedo a deformaciones.

Respecto a la disposición de los elementos, creo que no habrá variaciones, se mantendrá todo de igual manera, el único punto a que se podría variar sería el que se refiere a la iluminación y su consiguiente LDR. Se podría colocar la fuente de luz en el mismo soporte que la rueda grande y enfrente un soporte más reducido para el detector luminoso.

Las piezas a ser posible se harán del mismo tamaño y si la situación lo requiere se pueden modificar durante el transcurso de montaje.

También es aconsejable colocar rodamientos en las partes móviles para evitar rozamientos en exceso y mejorar la fluidez de movimientos.

Así pues resumimos las mejoras constructivas en cuatro apartados:

- Sustituimos la madera por metacrilato, solo aprovechando la base que está en buenas condiciones.
- Eliminar los soportes del punto luminoso y del LDR, colocando el foco de luz en el mismo soporte del eje principal y enfrente el LDR.
- Mantener las dimensiones de las piezas.
- Colocar en todos los elementos móviles rodamientos para evitar rozamientos y alargar la vida del prototipo.

4.2.- Mejoras eléctricas.

Respecto a este apartado no vamos a entrar todavía en el estudio y diseño del circuito final, pero sí nos va a servir para tener una idea de cómo queremos mejorar el apartado eléctrico de una forma visual.

Con esto, lo primero en que nos fijamos es en los cables de conexión que tenemos, todos a la vista y poco sujetos, la idea es que se vean lo menos posible y lo que sea imprescindible esté sujeto y protegido.

La placa electrónica que hagamos también deberá estar protegida frente a contactos directos y también para evitar su deterioro, de esta forma mejoraremos la vida del proyecto.

También podemos citar una parte que se echa en falta y es el hecho de una zona de control, es decir, en la maqueta original en cuanto conectabas la alimentación funcionaba la placa sin tener la posibilidad de interrumpir la corriente si no era desconectándolo de nuevo. Con la colocación, por ejemplo, de un interruptor bipolar podríamos controlarlo fácilmente.

El cable de alimentación no deberá estar soldado a la placa, sino que sería mucho mejor disponer de conectores (bananas) en la maqueta y así poder quitar y poner el cable de alimentación siempre que queramos.

Apuntamos las ideas en cuatro sencillas directrices:

- Eliminar en la medida de lo posible los cables que están a la vista, sujetar y proteger las zonas que lo requieran.
- Proteger la placa electrónica frente a contactos directos y su deterioro a la intemperie, destacar que ha de estar visible en la maqueta.
- Establecer una zona de mando y control de la alimentación.
- El cable de alimentación deberá ser independiente de la maqueta, es decir, no estará soldado a la misma sino con conectores seguros (bananas).

5.- Creación y montaje de piezas.

Una vez hemos marcado el camino a seguir es hora de realizar todas las piezas que nos hagan falta. Dividiremos este bloque en dos partes, por un lado lo necesario en cuanto a piezas de metacrilato y por otro lado las piezas que madera que usemos.

Todo ello será explicado y detallado dando soporte con imágenes y como no, con planos más precisos donde se pueden conocer de forma exacta sus dimensiones.

5.1.- Piezas de madera.

Es este el apartado más escueto, como hemos comentado anteriormente todas las piezas de madera van a ser sustituidas por piezas de metacrilato pero aún así hay partes que sí estarán fabricadas en madera.

La primera de ellas es la base o superficie de apoyo del proyecto. El anterior poseía una base de madera de un grosor de 20 mm. Está en perfectas condiciones y con unas medidas muy buenas para albergar todos los elementos, es por ello que la reutilizamos en la nueva maqueta.

Bien ya tenemos la base a nuestro proyecto, como hace tiempo que no ha sido tocada lo que haremos será quitar todas las piezas antiguas y lijar la base, por ambos lados, de esta forma eliminamos impurezas y desperfectos para después aplicar varias capas de barniz para exteriores que mantendrá nuestra base protegida de prácticamente cualquier inclemencia. De esta forma alargamos la vida útil de la madera.

Las medidas de la base con todas sus particularidades se pueden ver en los anexos, plano 2 hoja 1.

Otro elemento de madera que sí hemos tenido que hacer son unas patas para elevar nuestra maqueta y de esta forma poder disponer de la parte inferior de la base para realizar otras tareas.

La figura 8a muestra el proceso de fabricación de las patas, en su totalidad son cuatro, aquí vemos una de ellas acompañada de una caladora, necesaria para cortar la madera y vemos también la lija usada para pulir la pieza, esta lija es de grano fino para metal. Despues de esto la pieza es barnizada en varias capas.



Fig. 8a. Fabricación patas.



Fig. 8b. Biela de madera.

Hacemos referencia al plano 2 hoja 2 de los anexos donde además de ver los tacos de madera vemos dos elementos más realizados en madera.

Uno de ellos es una biela, ésta ha sido creada para disponer de un repuesto en caso de romperse la biela original que está hecha en metacrilato, como hemos ido comentando, también ha sido lijada y barnizada al igual que la otra pieza que vemos

en el plano, que no es más que un protector para la zona de alimentación que más adelante explicaremos.

Dos imágenes que nos aclararan esto son la figura 8b y 9. En la figura 8b vemos la biela una vez terminada con dos rodamientos ya colocados y a su lado una lija redonda de madera necesaria para pulir los orificios que le hemos practicado previamente con un taladro sencillo con la ayuda de un juego completo de brocas.

En la imagen inferior (figura 9) vamos a ver la parte inferior de la base donde destacamos los tacos de madera y la pieza que protege las conexiones, además podemos ver una canal UNEX 78023-2 que recorre la base de un lado a otro. Esta canal está detallada en el plano 3 hoja 1 y la utilizaremos para proteger los cables y mantener fuera del alcance los mismos con el fin de evitar imprevistos.

El otro elemento que vemos de un tono metálico no es sino una fuente de alimentación que explicaremos más adelante.



Fig. 9. Parte inferior de la maqueta.

5.2.- Piezas de metacrilato.

El metacrilato usado en este proyecto procede del departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Zaragoza. Trabajar con este material no es del todo sencillo y al principio puede acarrear algún problema. Se ha utilizado una caladora con una hoja de dientes intermedios para el corte de las piezas, los orificios pertinentes han sido realizados con un taladro y un juego de brocas para metal y las partes que han requerido de lijado se ha hecho de forma manual con una lija fina para metal.

Uno de los primeros problemas que hemos podido constatar es el hecho de que el metacrilato, al ser un compuesto químico, a la hora de cortar las piezas si no se prestaba especial cuidado, a una temperatura no muy alta el metacrilato comenzaba a fundirse lo que provocaba que el corte fuese irregular, la pieza quedase claramente imperfecta y tenías que dejar que se enfriara pues no podías seguir cortando.

Esto se fue solucionando a base de practicar, lo mismo nos sucedía cuando se practicaban perforaciones en las piezas. Es recomendable hacer varias empezando con una broca de poco calibre y siempre al terminar cada agujero dejar un tiempo de enfriamiento de la pieza. La fricción hacía subir la temperatura rápidamente volviéndose plástico derretido.

Las primeras piezas a realizar son los dos soportes principales, aquellos que albergarán el eje principal y sobre el que descansarán las ruedas, de medidas parecidas a los originales de madera, las características y su esquema se pueden ver en los anexos, plano 1 hoja 1. Uno de los dos soportes posee un orificio intermedio, este será el lugar donde colocaremos nuestro dispositivo luminoso. Mirando el mismo plano mencionado anteriormente podemos vislumbrar otro soporte, con otro orificio a la misma altura que el luminoso y esto es porque, situado uno enfrente del otro, si el primero tendrá el dispositivo luminoso, este segundo tendrá el detector luminoso, LDR, necesarios para la parte electrónica.

En la siguiente imagen, figura 10, podemos ver los soportes ya colocados en su posición final.



Fig. 10. Montaje maqueta.

Los orificios superiores que en la imagen están vacíos es donde colocaremos los rodamientos. Podemos ver también como los tres soportes de los que hablábamos antes están perfectamente alineados. Ésta disposición dista de la original y es que para simplificar se ha optado por eliminar uno de los soportes y aprovechar a colocar el dispositivo luminoso en el mismo eje principal y así a la par colocar el detector luminoso enfrente a una altura muy inferior del que teníamos antes haciendo más estético y con menos material la misma labor.

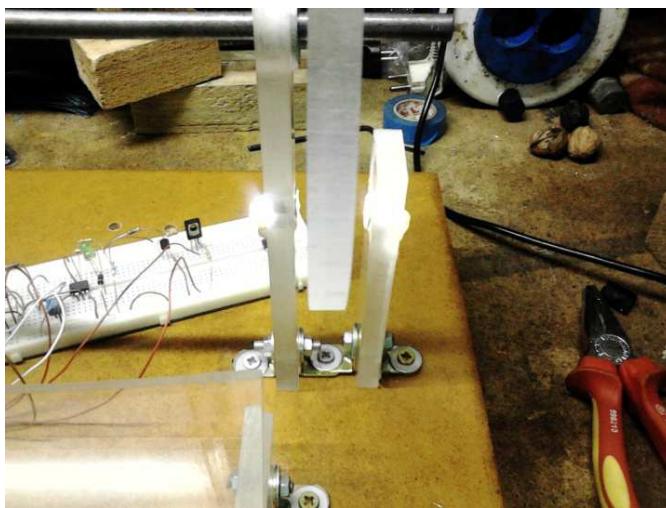


Fig.11a. Soportes rueda grande



Fig. 11b. Soporte LDR.

En esta primera imagen (figura 11a) podemos ver una vez colado todo el mecanismo como queda, de izquierda a derecha, la fuente de luz, la rueda y por último el soporte con el detector.

Otro detalle que se ha querido pulir ha sido la eliminación en todo lo posible de cables y conexiones cara vista. Para ello se pensó hacer dichas conexiones en la parte inferior.

Para ver con más detalle el cómo se han ocultado los cables tenemos la figura 11b que mostramos en la parte superior. Se ha practicado en las piezas una especie de camino de gusano donde están los cables y a través de un agujero en la base los llevamos a la parte inferior.

De esta forma se puede ver como en la figura 11a no se atisban los cables en las paredes de los soportes, no sobresalen. La sujeción de los mismos es a base de silicona transparente.

Una vez vistos los tres soportes pasamos a detallar una de las zonas más conflictivas y de mayor precisión a la hora de hacer piezas. Estamos hablando del mecanismo biela manivela con sus respectivos soportes.

Este conjunto consta de dos soportes, una pieza intermedia donde estará el punto de unión con la base de la biela y una parte final que será la encargada de interaccionar con la bobina a través de una pieza de metal, que no es más que una arandela de tamaño considerable (ver plano 3 hoja 3).

Como se comentó anteriormente, el diseño inicial del conjunto biela manivela es bueno y por lo tanto las piezas son de un tamaño muy parecido.

Haciendo referencia otra vez en los anexos, en el plano 1 hoja 2 vemos las medidas exactas de los tres elementos. Como detalle de los soportes decir que el eje de apoyo no posee agujeros pasantes sino que están hechos hasta una profundidad intermedia y es ahí donde se han colocado los rodamientos de 4 mm de diámetro (anexos plano 3 hoja 3).

Colocado en la misma horizontal tenemos la pieza intermedia con su punto de conexión con la base de la biela y la zona de interacción magnética con la bobina.

Por último tenemos la biela, parte esencial y a la vez más frágil, de medidas perfectamente adecuadas para conseguir un movimiento regular y suave donde no caben golpes ni holguras. Su tamaño hace que jamás llegue a contactar con la bobina por escasos milímetros que serán claves más adelante en el estudio electromagnético llevado a cabo.

Dos imágenes que representan perfectamente el movimiento completo del mecanismo.



Fig.12a. Distancia mínima.



Fig.12b. Distancia máxima.

Como norma, y haciendo valer la idea de máxima eficiencia, se ha tenido en consideración ubicar en todas las partes móviles del prototipo un rodamiento para evitar rozamientos. Esto quiere decir que tanto en los soportes que se ven en las figuras 12a y 12b como en la biela que mostramos en la figura 13, llevan asociados los rodamientos correspondientes. La biela por sus dimensiones y teniendo en cuenta que los orificios donde van los rodamientos han de ser a medida, ha requerido de algunos intentos. Puesto que es la parte más débil, sometida a más esfuerzos y clave para el correcto funcionamiento se ha optado por realizar otra pieza de características idénticas pero de otro material, en este caso de madera. Esta biela que será usada de repuesto pretende aumentar la robustez del conjunto dándole más vida útil a largo plazo, aspecto anteriormente mencionado, ver figura 8b.

En el margen derecho se muestra la biela una vez terminada, figura 13. En esta biela de metacrilato, con sus dimensiones fijadas en el plano 1 hoja 2, es importante ver la parte inferior donde se ve el rodamiento con muy poco margen de error respecto a sus paredes y pulido con un cierto radio para evitar rozamientos.



Fig.13. Biela de metacrilato.

Describas las piezas que forman el mecanismo biela manivela y tomando como referencia las figuras 12a y 12b para ver el movimiento, las dimensiones exactas están detalladas en el plano 4 hoja 1. En este plano podemos ver la relación que se mostraba anteriormente, la “carrera”. Recordamos que la carrera es la distancia lineal que se produce en la base de la biela y es directamente proporcional a la distancia entre el eje central y el eje excéntrico. Con esto se pretender aclarar que pese a estar los dos ejes muy juntos, a escasos 8 mm, el movimiento lineal en la base de la biela es de $2 \cdot R = 16$ mm que es poca distancia. Haciendo memoria vimos que este punto está muy alejado del final de la pieza y por consiguiente el movimiento en la punta de la pieza donde interacciona con la bobina presenta un movimiento mucho más extenso.

Una pieza que pasa desapercibida es la que se ha colocado en la base de la bobina, está representada en el plano 1 hoja 3. Posee un orificio pasante que será por donde guiemos los cables hasta la parte inferior. Todo lo demás corresponde a uniones de fijación.

Para terminar el recorrido por las piezas de metacrilato realizadas nos centramos en las dos ruedas (plano 1 hoja 4). Por un lado está la rueda más grande que será quien reciba el par de giro. Es lisa, puesto que es transparente, la captación o interrupción de luz se puede hacer sin problemas, caso que no sucedía en la pieza original de madera que poseía una zona tallada lo que suponía algún problema, principalmente una descompensación de la masa que acarrea un movimiento menos uniforme. La rueda de menos tamaño es muy similar a la original con su centro de 8 mm para la varilla de metal y el punto excéntrico de 4 mm para la varilla de fibra de vidrio donde irá colocada la cabeza de la biela. La figura 14 nos muestra muy bien todo esto, rueda grande al fondo con una zona oscurecida para hacer pruebas, y delante la rueda pequeña con la varilla de fibra de vidrio como unión entre la misma y la biela.

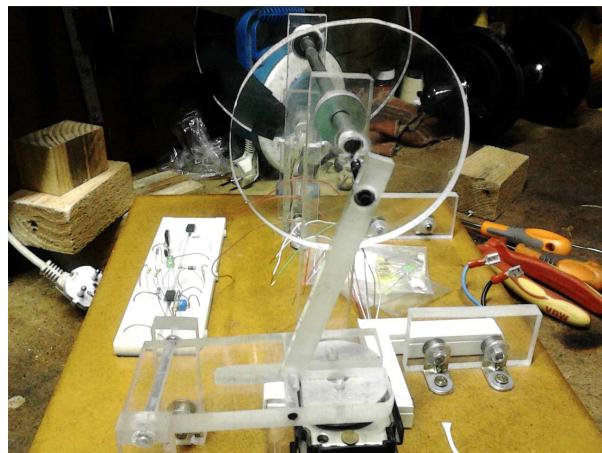


Fig.14. Maqueta nueva.

Ya por último y aprovechando la imagen superior, se ven dos piezas colocadas en vertical en el margen derecho, éstas son el apoyo de lo que será la caja de mando del proyecto donde podremos conectar las bornas y gobernar la alimentación con un simple interruptor bipolar. De forma más completa podemos verlo en la figura 10 donde aún falta la tapa delantera. La medidas de todos ellos están en el plano 1 hoja 2 y también en el plano 1 hoja 3.

5.3.- Tornillería.

Como bien indica el nombre de este apartado, incluimos todos los elementos necesarios para el montaje de la maqueta, cosas tan básicas como tornillos, tuercas, etc. y otras más especiales como rodamientos.

Todos estos elementos se han detallado en el plano 3 hojas de 1 a 4. Muchos de ellos están sujetos a un protocolo de fabricación, lo que se conoce como normas DIN

DIN es el acrónimo de *Deutsches Institut für Normung* (Instituto Alemán de Normalización). El DIN representa los intereses alemanes en las organizaciones internacionales de normalización (ISO, CEI, entre otros.). Una norma DIN de uso habitual es la DIN 476, que define los formatos (o tamaños) de papel y que ha sido adoptada por la mayoría de los organismos nacionales de normalización de Europa. La sede del DIN está ubicada en Berlín.

En los anexos podemos ver las tablas correspondientes a las normas DIN según qué elemento sea.

Otro elemento que hemos añadido ya se ha visto anteriormente en una imagen, en concreto la figura 9 y también en la figura 14, nos referimos a la canal utilizada. Tenemos dos tipos, en la parte inferior hemos usado la UNEX-78023-2, y para la parte superior se ha utilizado la UNEX-78031-2, más estrecha que la anterior pero con mayor altura, están especificadas en el plano 3 hoja 1 y también podemos ver la hoja de características en los anexos. Su uso es claro, proteger los cables y evitar que estén a la vista, con esto cumplimos el objetivo que se comentó anteriormente siguiendo la línea de trabajo marcada.

En la zona que hemos marcado antes como mando, utilizando las piezas de metacrilato, se van a ubicar dos conectores hembras (bananas) de seguridad para poder conectar y desconectar el cable de alimentación cuando se desee, pues dicho cable tendrá esos mismos conectores pero machos. A lado de las bananas hembras colocamos un interruptor bipolar que será el encargado de encender o apagar en cualquier instante.

Terminamos este apartado comentando que usaremos la misma bobina que ya teníamos antes, con todas su partes que hemos querido plasmar en el plano 3 hoja 4, acotando las medidas que hemos considerado más importantes porque tenía multitud de diminutos recovecos, la figura 15 nos aclara si queda alguna duda, cuáles son estas partes.



Fig.15. Bobina y sus elementos.

6.- Electromagnetismo. Principio de funcionamiento del electroimán.

El apartado anterior termina con la figura 15 donde vemos las partes de las consta el conjunto bobina con el soporte de sujeción, la salida de los cables para alimentación etc.

Vamos a explicar el principio de funcionamiento de este bloque para poder conocer una parte fundamental del proyecto y para ello nos adentraremos en la parte del electromagnetismo.

6.1.- Ley de Biot-Savart.

En 1819 el físico danés Hans Christian Oersted descubrió que la aguja imantada de una brújula se desvía por la presencia de una corriente eléctrica. Poco tiempo después Biot y Savart llegaron a una expresión que permitía calcular el campo magnético que produce una corriente.

El campo magnético creado por un elemento viene dado por lo que conocemos como **Ley de Biot-Savart**

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times \vec{u}_r}{r^2} \quad (5)$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} Tm/A$ Es la permeabilidad del vacío.

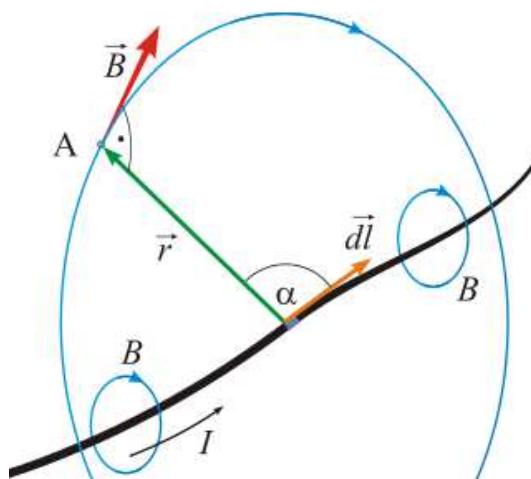


Fig.16. Ilustración de la ecuación de Biot-Savart. Wikipedia

El campo magnético decrece con el cuadrado de la distancia al elemento de corriente. El vector campo magnético apunta en dirección perpendicular a \vec{r} y al elemento de corriente $Id\vec{l}$.

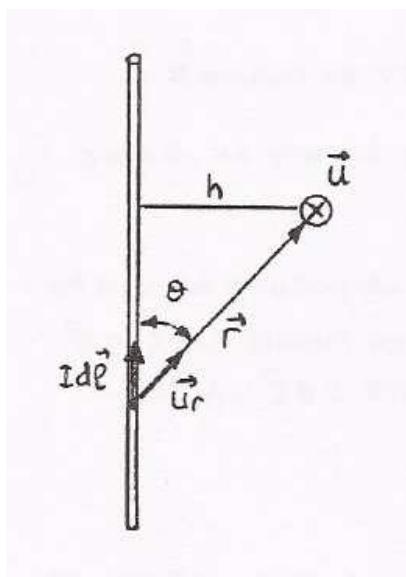
A veces puede resultar complicado dibujar en el plano vectores de tres dimensiones, como en el caso del campo magnético \vec{B} o elementos de corriente Idl . Para ello el convenio utilizado es representar los vectores mediante flechas, de tal modo que si salen del plano del papel veremos su punta, representada con un círculo con un punto en medio, o si entran al plano del papel veremos su aspa, representada con un círculo y una cruz dentro.

La expresión diferencial de la Ley de Biot-Savart proporciona el campo magnético en un punto dado para un pequeño elemento de conductor. Para encontrar el campo total \vec{B} en algún punto debido a un conductor de tamaño finito, se deben sumar las contribuciones de todos los elementos de corriente que constituyen el conductor, es decir, se debe integrar a lo largo de todo el conductor.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_l \frac{d\vec{l} \times \vec{u}_r}{r^2} \quad (6)$$

A partir de esta última fórmula podemos calcular el campo magnético creado por una corriente rectilínea indefinida de espesor despreciable.

$$\begin{aligned} \vec{B} &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{d\vec{l} \times \vec{u}_r}{r^2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{dl \cdot 1 \sin \varphi \vec{u}}{r^2} \\ \vec{B} &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{dl \cdot r \cdot \sin \varphi \vec{u}}{r^3} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{dl \cdot h \vec{u}}{r^3} \\ \vec{B} &= \frac{\mu_0 \cdot I \cdot h}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dl}{(l^2 + h^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot h}{4\pi} \frac{1}{h^2} \left[\frac{l}{\sqrt{l^2 + h^2}} \right]_{-\infty}^{\infty} \vec{u} \\ \vec{B} &= \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot h} [1 - (-1)] \vec{u} = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot h} \vec{u} \quad (7) \end{aligned}$$



Si en lugar de llamar h a la distancia del conductor al punto le llamamos r y al vector unitario \vec{u}_δ , la expresión del campo creado por un conductor indefinido será:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot h} \vec{u}_\delta \quad (8)$$

El vector \vec{u}_δ representa el vector unitario tangente a la circunferencia en cualquier punto.

Fig.17. Apuntes Antonio Pardina.

Por lo tanto, el campo magnético que crea una corriente que circula a lo largo de un conductor rectilíneo e indefinido, está formado por líneas de fuerza en forma de circunferencias concéntricas al conductor y situadas en un plano perpendicular al mismo. Este fenómeno puede observarse espolvoreando limaduras de hierro en una cartulina que corta perpendicularmente al conductor. Las limaduras se alinearían en círculos en torno al conductor.

Si se coloca una brújula encima de la cartulina, las líneas de fuerza tienen el sentido de rotación alrededor del hilo según corresponde con el determinado por la *Ley de Biot-Savart*.

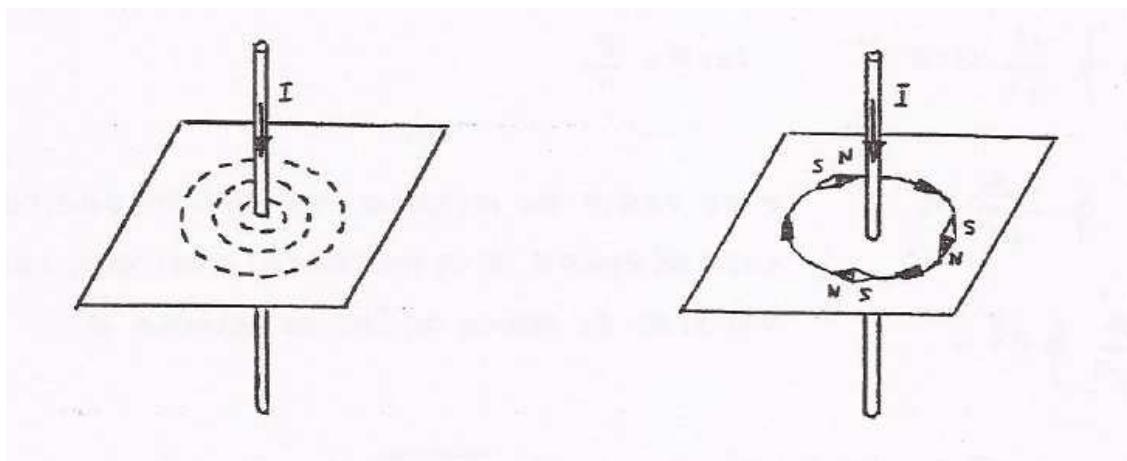


Fig.18. Apuntes de Antonio Pardina. Sentido de giro del campo magnético.

El sentido de giro de las líneas de campo es tal que entran por el polo sur de la brújula y salen por el polo norte. Dicho sentido se puede determinar de forma sencilla mediante la regla del sacacorchos, de tal modo que el sentido de giro de las mismas es igual al sentido de giro del sacacorchos para que avance en el sentido de la corriente (figura 19).

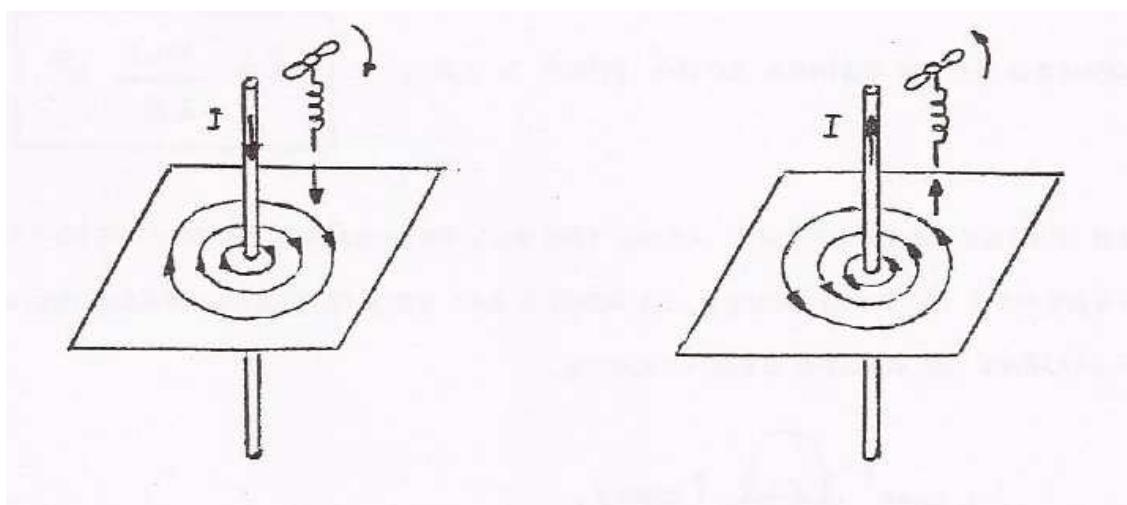


Fig.19. Apuntes Antonio Pardina. Regla del sacacorchos.

6.1.1.- Campo magnético creado por una espira.

Ya hemos definido la Ley de Biot-Savart así como su aplicación para calcular el campo magnético creado por una corriente rectilínea indefinida. En este apartado nos acercamos un poco más al funcionamiento magnético de la bobina, pues ésta está constituida por N espiras, así que es necesario conocer el campo creado por una espira.

Comenzamos con una imagen para saber en qué punto estamos y desarrollamos la Ley de Biot-Savart hasta obtener la expresión

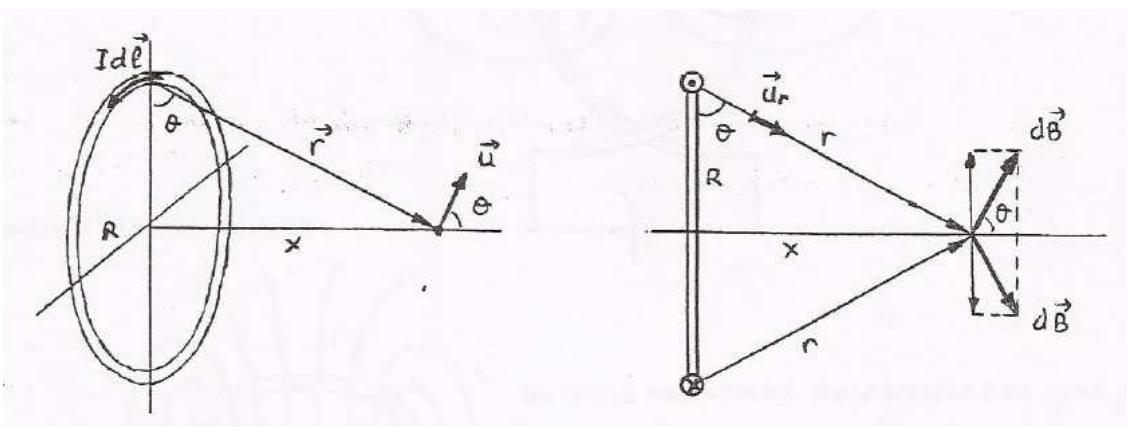


Fig.20. Apuntes Antonio Pardina. Campo magnético creado por una espira en un punto.

Vamos a calcular el campo magnético creado por la espira circular en puntos de su eje. Aplicamos la ley de Biot-Savart en su forma diferencial.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{u}_r}{r^2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl \cdot 1}{r^2} \vec{u} \quad (d\vec{l} \perp \vec{u}_r) \quad (9)$$

Los componentes verticales del campo se anulan y solo se suman las componentes horizontales.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{dl}{r^2} \cos \theta \vec{k} \quad \cos \theta = \frac{R}{r}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{R \cdot dl}{r^3} \vec{k}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I R}{4\pi r^3} \oint dl \vec{k}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I R}{4\pi r^3} 2\pi R \vec{k} = \frac{\mu_0 I R^2}{2 r^3} \vec{k} \quad r = \sqrt{R^2 + x^2}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}} \vec{k} \quad (10)$$

El valor de r no varía en módulo, ya que su longitud corresponde a la generatriz del cono con vértice en el punto donde se calcula \vec{B} .

El campo en el centro de la espira será para $x = 0$:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2R} \vec{k} \quad (11)$$

Donde: μ_0 es la permeabilidad del vacío.

I es la corriente que atraviesa la espira.

R es el radio de la espira.

Una espira se puede considerar como trozos pequeños de conductores rectilíneos y podemos ir aplicando la regla del sacacorchos para obtener el sentido de las líneas de campo resultante.

Al ser las líneas de campo magnético cerradas sobre sí mismas, por una cara de la espira entran líneas, originando un sur y por la otra cara salen originando un norte.

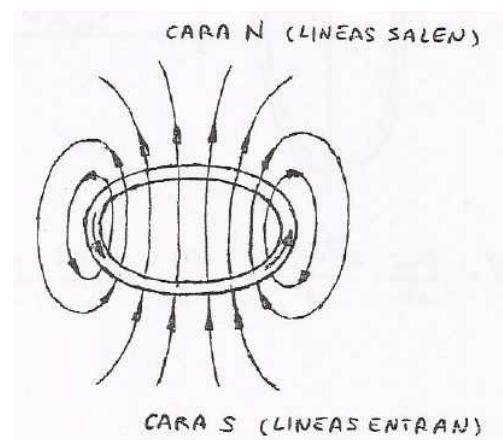


Fig.21. Apuntes Antonio Pardina.
Caras norte y sur de una espira.

Podemos determinar la polaridad de las caras mediante la regla del sacacorchos, de forma que colocándolo perpendicularmente a la espira y haciéndolo girar en el sentido de la corriente, entonces el sentido de avance del sacacorchos indicará el sentido de las líneas de fuerza, de tal modo que si el sacacorchos entra, será una cara sur y si sale, una cara norte.

6.1.2.- Campo magnético creado por un solenoide.

Un solenoide o bobina está constituido por un hilo conductor arrollado estrechamente en forma de hélice. Por lo tanto puede considerarse como una serie de N espiras idénticas situadas unas junto a otras.

El solenoide se utiliza para producir un campo magnético intenso y uniforme en la región rodeada por sus espiras.

Dentro del solenoide, las líneas son aproximadamente paralelas al eje y están espaciadas estrecha y uniformemente, indicando la existencia de un campo uniforme e intenso.

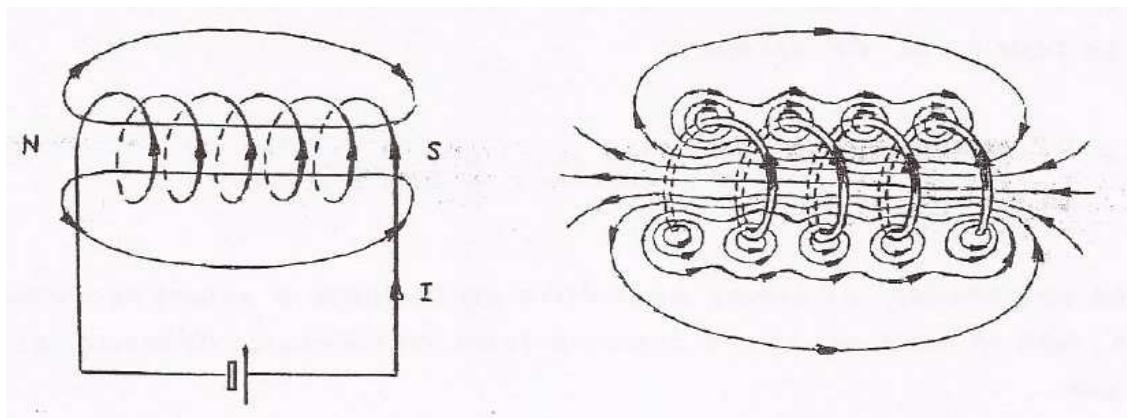


Fig.22. Apuntes Antonio Pardina. Líneas de campo en un solenoide.

Las líneas de campo entre vueltas tienden a cancelarse unas con otras y el campo en el exterior del solenoide es débil y no uniforme. Las líneas de campo de un solenoide son similares a las de una barra magnetizada.

Vamos a calcular el campo magnético en puntos del eje de un solenoide. Para ello consideraremos un solenoide de longitud L , radio R y constituido por N espiras. Ver figura 23.

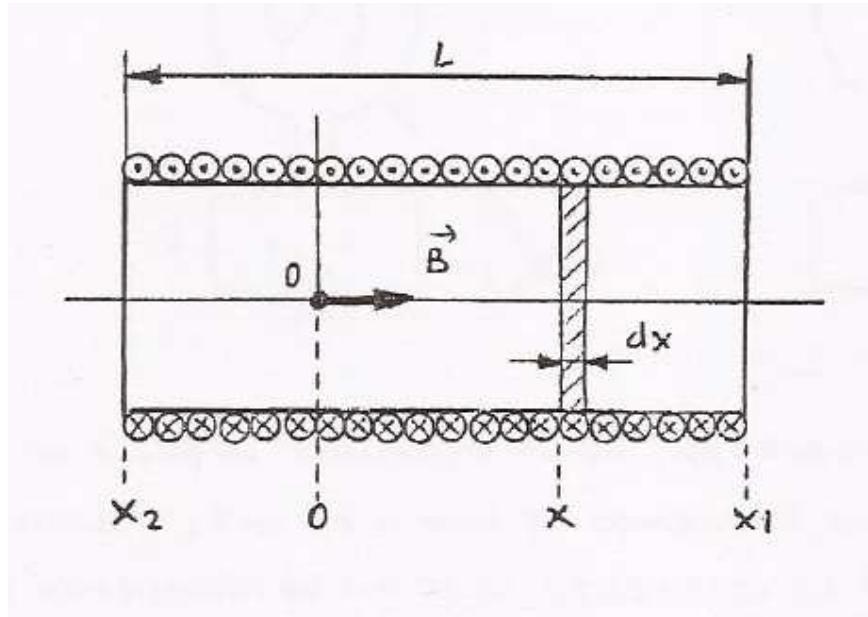


Fig.23. Apuntes Antonio Pardina. Esquema cálculo de campo magnético.

En primer lugar calculamos el nº de vueltas por unidad de longitud, que nos servirá más adelante.

$$n = \frac{N}{L} \quad (12) \quad n = \text{nº vueltas por unidad de longitud.}$$

El punto 0 donde vamos a calcular el campo magnético \vec{B} lo tomaremos como origen de coordenadas. Considerando un elemento del solenoide de longitud dx a una distancia x del origen de coordenadas creará un campo $d\vec{B}$.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 dI}{2} \frac{R^2}{(R^2 + r^2)^{3/2}} \quad (13) \quad \text{Campo creado por una espira}$$

El solenoide de longitud L con N espiras en total, recorridas cada una de ellas por una corriente I , equivale a una corriente total sobre su superficie $It = NI$. La corriente de una espira elemental de longitud dx será dI , cuyo valor en función de dx valdrá:

$$dI = \frac{NI dx}{L} = \frac{N}{L} I dx = nI dx \quad (14)$$

Para determinar el campo magnético en el punto 0 debido al solenoide completo, será la suma del campo debido a todos los elementos de espira, es decir, la integral.

$$dB = \frac{\mu_0 In dx}{2} \frac{R^2}{(R^2 + r^2)^{3/2}} \rightarrow B = \frac{\mu_0 nIR^2}{2} \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{(R^2 + r^2)^{3/2}}$$

$$B = \frac{\mu_0 nIR^2}{2} \frac{1}{R^2} \left[\frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}} \right]_{x_2}^{x_1} = \frac{\mu_0 nI}{2} \left[\frac{x_1}{\sqrt{R^2 + x_1^2}} - \frac{x_2}{\sqrt{R^2 + x_2^2}} \right] \quad (15)$$

Por lo tanto, el campo magnético creado por un solenoide de longitud L y radio R en un punto de su eje que está situado a una distancia x_1 del extremo de la derecha del solenoide y a x_2 del extremo izquierdo, viene dado por la expresión:

$$B = \frac{\mu_0 nI}{2} \left[\frac{x_1}{\sqrt{R^2 + x_1^2}} - \frac{x_2}{\sqrt{R^2 + x_2^2}} \right] \quad (16)$$

Cuando x_1 y x_2 están situados a la derecha del punto se considerarán positivos, sin embargo, si están situados a su izquierda se considerarán negativos.

Para un solenoide indefinido ($x_1 = \infty$ y $x_2 = -\infty$) el campo en puntos de su eje vendrá dado por la siguiente expresión, mucho más reducida que la anterior.

$$B = \frac{\mu_0 nI}{2} [1 - (-1)] = \frac{\mu_0 nI}{2} \cdot 2 \rightarrow B = \mu_0 nI \quad (17)$$

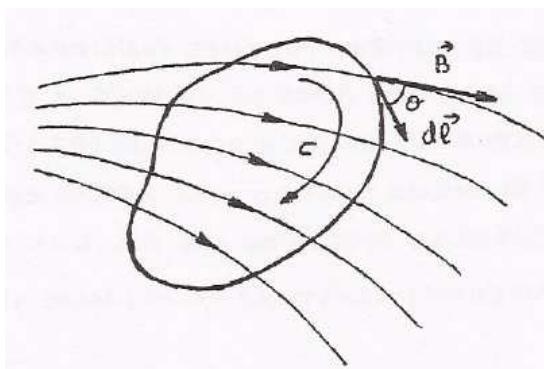
La inducción se mide en Teslas [T]. El Tesla (en honor a Nikola Tesla) es el valor de la inducción magnética en un punto cuando la carga positiva de un culombio, que se mueve perpendicularmente al campo a un m/s , experimenta la fuerza de un newton.

$$1T = \frac{1N}{1C \cdot 1m/s} = \frac{1N}{1A \cdot 1m} \quad (18)$$

6.2.- Ley de Ampère.

El concepto de circulación de un vector \vec{B} a lo largo de una trayectoria $\oint_c \vec{B} d\vec{l}$, se asocia al concepto de integral curvilinear.

La integral curvilinear se obtiene formando en cada punto de la curva el producto de un elemento de longitud de la misma dl , por la componente de campo magnético en la dirección de este elemento $B \cos \theta$, e integrando estos productos a lo largo de toda la curva.



Si la curva es cerrada se escribe:

$$\oint_c B \cos \theta dl = \oint_c \vec{B} d\vec{l} \quad (19)$$

La circulación del campo magnético a lo largo de una trayectoria cerrada es proporcional a la corriente total que abraza esa trayectoria. La constante de proporcionalidad es la permitividad del vacío.

Fig.24. Apuntes Antonio Pardina.
Ilustración ley de Ampère.

La corriente se considera positiva cuando al hacer girar un sacacorchos en el sentido de la circulación el sentido de avance del sacacorchos y el sentido de la corriente coinciden. En caso de que el sentido de la corriente y del sacacorchos sean opuestos, la corriente se considerará negativa.

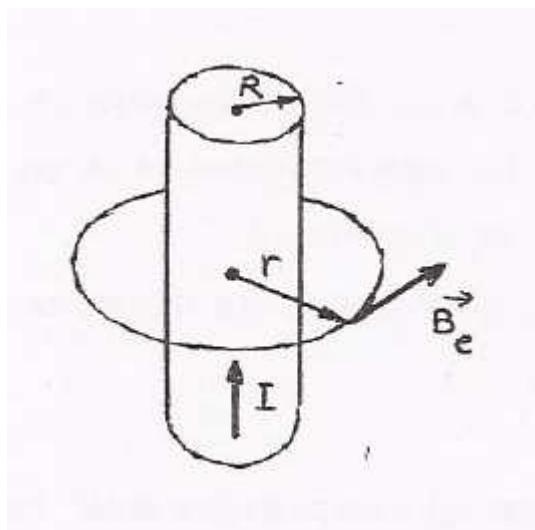
La ley de Ampère es válida para cualquier curva cerrada C que abrace corrientes continuas.

Al igual que la ley de Gauss, la ley de Ampère puede utilizarse para calcular el campo magnético creado por corrientes en caso de simetría. De tal modo que si la simetría es suficiente, la integral de línea $\oint_c \vec{B} d\vec{l}$ podrá escribirse como el producto de B por cierta longitud.

Sabiendo esto nos facilita mucho a la hora de hacer cálculos, pues muchos sistemas poseen una gran simetría.

6.2.1 Campo magnético creado por un cilindro macizo.

a) Campo en el exterior: $R \geq r$



Tomando una trayectoria circular concéntrica de radio r , por simetría el campo llevará dirección angular y será de valor constante. La trayectoria abraza toda la corriente.

$$\oint_c \vec{B}_e d\vec{l} = \mu_0 I$$

$$B_e 2\pi r = \mu_0 I$$

$$\mathbf{B}_e = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (20)$$

Fig.25. Apuntes Antonio Pardina. Campo exterior.

b) Campo en el interior: $R \leq r$

Tomando una trayectoria circular concéntrica de radio r , por simetría el campo también llevará dirección angular y será de valor constante. En este caso sólo abrazará una fracción de I_i de la corriente total I .

$$\oint_c \vec{B}_e d\vec{l} = \mu_0 I$$

$$I_i = I_s \rightarrow S = \pi r^2; I = \frac{I}{\pi R^2}$$

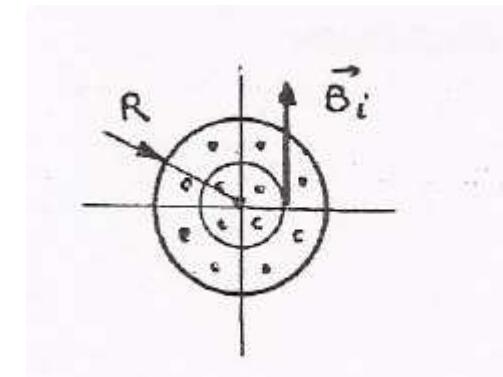


Fig.26. Apuntes Antonio Pardina. Campo interior.

$$I_i = \frac{I}{\pi R^2} \pi r^2 = I \frac{r^2}{R^2}$$

$$B_i 2\pi r = \mu_0 I \frac{r^2}{R^2}$$

$$\mathbf{B}_i = \frac{\mu_0 I}{2\pi R^2} r \quad (21)$$

Vistas estas dos aplicaciones de la ley de Ampère podemos aclarar la intensidad de campo magnético en una gráfica en función de la distancia r . El punto de mayor campo magnético lo encontramos justo en la periferia del conductor cuando $R = r$ conforme nos alejamos vemos que decrece rápidamente. Figura 27.

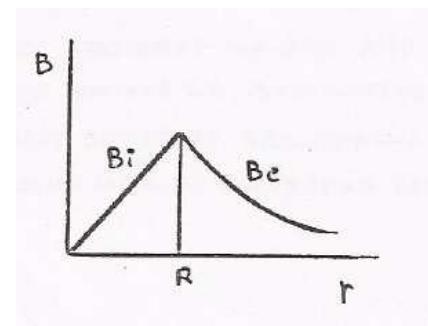


Fig.27. Apuntes Antonio Pardina.
Gráfica campo magnético, distancia.

6.2.2 Campo magnético creado por un solenoide.

Tomamos en consideración un solenoide ideal, esto es, un solenoide con espiras muy próximas y de longitud grande comparada con el radio. En este caso, el campo en el exterior del solenoide es débil comparado con el campo en el interior y el campo en el interior es uniforme a través de su sección recta.

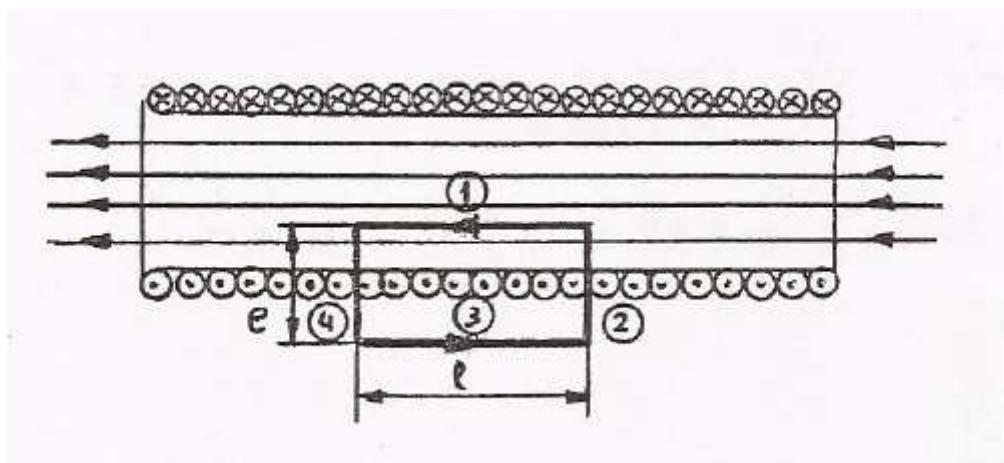


Fig.28. Apuntes Antonio Pardina. Esquema campo en un solenoide.

Aplicaremos la ley de Ampère a una trayectoria rectangular de longitud l y anchura e .

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I_t$$

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \int_1 \vec{B} d\vec{l} + \int_2 \vec{B} d\vec{l} + \int_3 \vec{B} d\vec{l} + \int_4 \vec{B} d\vec{l} = Bl + 0 + 0 + 0 = Bl \quad (22)$$

- La contribución a lo largo del lado 3 es cero, ya que $B = 0$ en el exterior.
- La contribución de los lados 2 y 4 es cero ya que \vec{B} es perpendicular a lo largo de esas trayectorias por el interior y cero por el exterior.
- El lado 1 cuya longitud es l da una contribución Bl , ya que B es uniforme a lo largo de toda la trayectoria.

La corriente total abrazada I_t será el producto de la corriente que pasa por cada espira multiplicada por el número de espiras contenido en el tramo l :

$$I_t = N_l I = n l I \quad n = \text{Nº de espiras por unidad de longitud.}$$

$$Bl = \mu_0 n l I \rightarrow \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{n} I \quad (23)$$

6.3.- Diferencia entre la Ley de Biot-Savart y la Ley de Ampère.

Pueden ser muy parecidas en cuanto a formulación, pero sugieren alguna diferencia. La ley de Biot-Savart indica el campo magnético creado por corrientes estacionarias. En el caso de corrientes que circulan por circuitos filiformes, la contribución de un elemento infinitesimal de longitud del circuito recorrido por una corriente crea una contribución elemental de campo magnético.

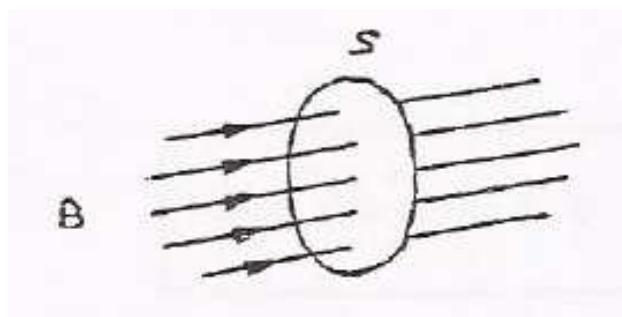
La ley de Ampère, también conocida como efecto Oersted, relaciona un campo magnético estático con la causa que lo produce, es decir, una corriente eléctrica estacionaria. Es análoga a la ley de Gauss.

6.4.- Flujo magnético.

El flujo magnético es similar al flujo eléctrico, está relacionado con el número de líneas de campo magnético que pasan a través de una superficie determinada.

El módulo del vector inducción magnética \vec{B} es proporcional al número de líneas de fuerza que atraviesan la unidad de área perpendicular a las mismas en un punto.

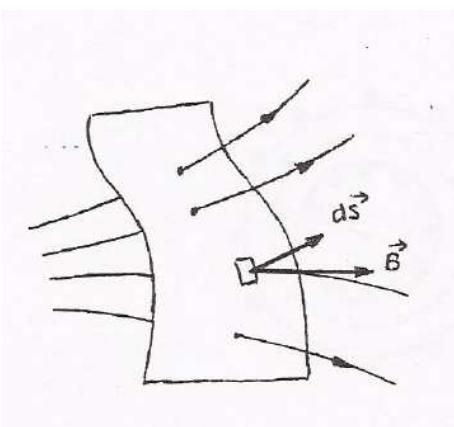
Si el campo magnético es uniforme y perpendicular a una superficie dada, el número de líneas que atraviesan dicha superficie vendrá dado por el producto del módulo del campo por el área de la superficie.



$$\emptyset = \mathbf{B} \mathbf{S} \quad (24)$$

Fig.29. Apuntes Antonio Pardina. Diagrama de flujo magnético.

Si el campo no es uniforme y la superficie no es perpendicular al campo, el flujo se calculará a partir del producto escalar del vector campo \vec{B} por el vector de superficie $d\vec{s}$.



La fórmula quedaría de la siguiente forma:

$$\emptyset = \int_s \vec{B} d\vec{s} \quad (25)$$

Para terminar decir que la unidad de medida del flujo magnético es el Weber [Wb].

$$[\emptyset] = T \cdot m^2 = Wb \quad (26)$$

En el sistema cegesimal la unidad de flujo es el Maxwell: $1Wb = 10^8 Mx$

Fig.30. Apuntes Antonio Pardina.
Flujo en superficie no perpendicular.

6.5.- Ley de Gauss del magnetismo.

Las líneas de campo magnético siempre son cerradas sobre sí mismas, tanto si el campo magnético es creado por corrientes eléctricas como si es debido a la presencia de un imán.

Si consideramos una superficie cerrada inmersa en un campo magnético, el número de líneas que entran a la superficie será igual al número de líneas que salen de ella, por lo tanto el flujo neto será cero.

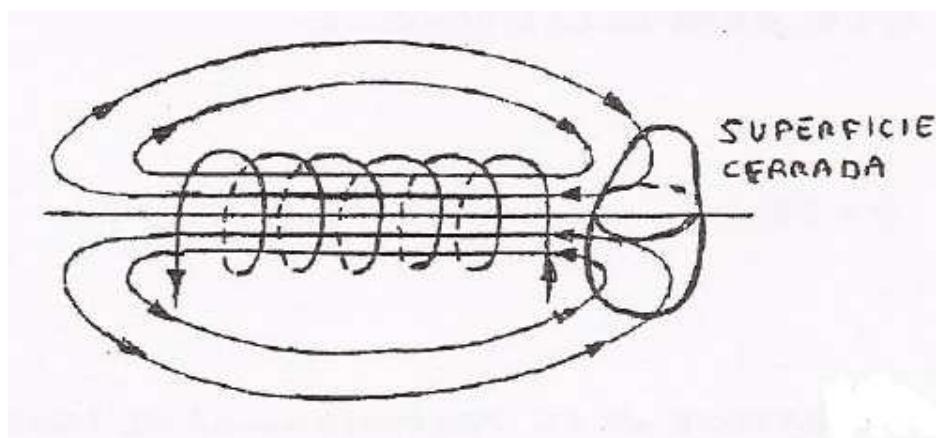


Fig.31. Apuntes Antonio Pardina. Ley de Gauss del magnetismo.

El flujo de líneas salientes es positivo y el flujo de líneas entrantes es negativo. Para el campo magnético el flujo neto a través de cualquier superficie cerrada siempre es cero, porque el número de líneas entrantes es igual al número de líneas salientes.

$$\emptyset = \oint \vec{B} d\vec{s} = \mathbf{0} \quad (27)$$

$d\vec{s} = d\vec{s} \vec{n}$; \vec{n} = vector unitario normal a la superficie que apunta hacia el exterior.

7.- Método de elementos finitos (MEF).

Hemos visto la parte teórica de cómo se comporta la bobina al paso de una corriente, pero para poder calcular de forma más precisa y rápida se requiere de un software donde tengamos implementados éstas y otras muchas formulaciones más. Existe un programa de distribución libre ideado para tal fin, se denomina FEMM (Finite Element Method Magnetics), y es con este programa de David Meeker, con el que se hará el estudio magnético de nuestro proyecto, del solenoide para ser más precisos. Este desarrollo es el que llamamos método de elementos finitos (MEF).

Concretamente se ha utilizado la versión Femm 4.2, este software está pensado para realizar cálculos y resolver problemas electroestáticos, magnéticos, de flujo de temperatura y flujo de corriente en dos dimensiones. Nos da la posibilidad de hacerlo en forma planar o axisimétricos.

Antes de poder utilizar este programa de forma correcta debemos especificar las condiciones de nuestro problema, lo que nos lleva al siguiente apartado.

7.1.- Características de la bobina.

Es la misma bobina que se utilizó en la maqueta original y por tanto no disponemos de su hoja de características. Por suerte, la etiqueta que tiene en su lateral aún conserva ciertos datos que nos serán vitales para calcular el resto.

Comenzaremos planteando lo que conocemos e iremos desarrollando para obtener los valores que necesitamos.

En primer lugar dos muy importantes, por un lado conocemos la tensión de alimentación que son 24 V DC, también su resistencia óhmica $R = 107 \Omega$, y para terminar conocemos el diámetro del hilo arrollado $\emptyset = 0,28 \text{ mm}$, de cobre.

Aplicamos la fórmula de la resistencia para un conductor:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (28)$$

Donde:

- R es la resistencia del conductor en ohmios (Ω).
- ρ es la resistividad del conductor, es este caso, cobre $\rho = 0,0172 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$.
- L es la longitud del conductor en metros (m).
- S es la sección o área del conductor en mm^2 .

Calculamos la sección del hilo que tenemos arrollado en la bobina.

$$S = \pi r^2 = \pi \cdot 0,14^2 = 0,0616 \text{ mm}^2 \quad (29)$$

Conocida la sección y sabiendo la resistencia despejamos de la ecuación 28 la longitud total de hilo.

$$L = R \frac{S}{\rho} = 107 \Omega \frac{0,0616 \text{ mm}^2}{0,0172 \text{ } \Omega \text{ mm}^2/\text{m}} = 383,21 \text{ m} \quad (30)$$

Ya sabemos la longitud total que tenemos de hilo ahora vamos a estimar el número de vueltas que tenemos arrolladas. Disponemos de un diámetro interior y exterior de la bobina conocidos que son $\varnothing = 16 \text{ mm}$ interior y $\varnothing = 42 \text{ mm}$ exterior. Puesto que el perímetro de circunferencia varía respecto al radio tomaremos un radio de distancia la mitad de la diferencia entre ambos, es decir, calcularemos cuántas vueltas necesitamos para cubrir la longitud total considerando un perímetro intermedio entre el menor y el mayor.

$$r_{int} = 8 \text{ mm} \quad r_{ext} = 21 \text{ mm} \quad r_{medio} = 14,5 \text{ mm} \quad (31)$$

El perímetro de la bobina con este radio será:

$$P = 2\pi r = 2\pi \cdot 14,5 = 91,1 \text{ mm} \quad (32)$$

Ésta es la longitud de cable utilizado para un único arrollamiento, el número de vueltas será el cociente entre la longitud total y la de una vuelta:

$$N = \frac{383,21 \text{ m}}{91,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 4206 \text{ vueltas} \quad (33)$$

Necesitamos conocer la corriente que circula por la bobina.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{24 \text{ V}}{107 \Omega} = 0,224 \text{ A} \quad (34)$$

Y ahora la corriente total que circula por el solenoide.

$$I_{total} = N \cdot I = 4206 \cdot 0,224 = 942,14 \text{ A} \cdot \text{vuelta} \quad (35)$$

Con estos datos ya podemos hacer el diseño completo en Femm introduciendo la bobina como circuito con una corriente $I_{total} = 942,14 \text{ A} \cdot \text{vuelta}$ y número de vueltas $N = 4206$. Pero para darle más apoyo a los cálculos terminamos conociendo la densidad de corriente J en la bobina.

Calculamos la sección de la mitad de la bobina, considerando un rectángulo será la altura h por la diferencia de radio exterior e interior.

$$S = h(r_{int} - r_{ext}) = 35(21 - 8) = 455 \text{ mm}^2 \quad (36)$$

De esta forma despejamos la densidad de corriente a través de la bobina como:

$$J = \frac{I_{total}}{S} = \frac{942,14 \text{ A} \cdot \text{vuelta}}{455 \text{ mm}^2} = 2,07 \text{ A} \cdot \text{vuelta}/\text{mm}^2 \quad (37)$$

Con esto ya tenemos los datos necesarios para poder realizar el estudio mediante el método de elementos finitos.

7.2.- Simulación con FEMM.

Para realizar la simulación mediante el programa Femm 4.2 debemos conocer algunos aspectos, llevar unas pautas de trabajo. Seguidamente describimos cómo hemos ido formando la estructura.

- Abrimos el programa, elegimos la opción “new”, nuevo proyecto, y nos sale una ventana con varias opciones, en nuestro caso elegimos “magnetics problem”. Ver figura 32.

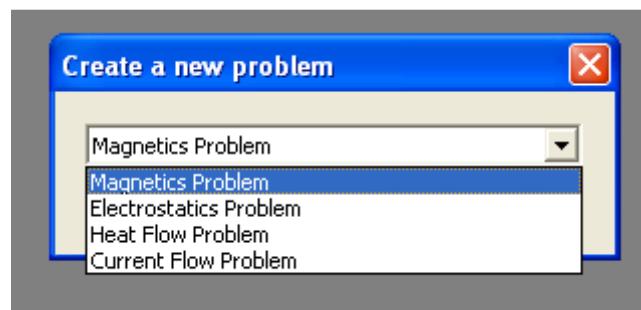


Fig. 32. Programa Femm 4.2. Elección de problema.

- Buscar en pantalla el punto de coordenadas (0,0). Siempre empezaremos nuestro dibujo a partir de este punto.
- Definición del problema. Abrimos la pestaña que tenemos arriba “problem” y en la ventana que nos muestra elegimos la frecuencia de trabajo, simetría plana o axisimétrica, unidades de longitud. En nuestro caso elegimos simetría axisimétrica y unidades milímetros.
- Selección del tamaño de la red. En nuestro caso se ha dejado por defecto.
- Diseño del modelo con el editor del programa. Primero marcamos los nudos y después unimos los mismos a través de segmentos o arcos. También podemos importar un modelo DXF realizado con un CAD.
- Definición de la librería de materiales que intervienen en el modelo. Haciendo clic en la pestaña “properties” y seleccionando “materials library” Se abre una ventana donde escogemos los materiales que necesitemos,

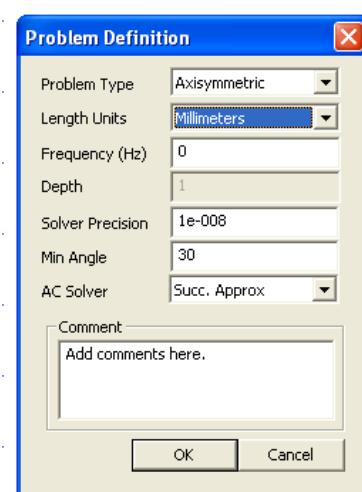


Fig. 33. Programa Femm 4.2. Definir problema.

pinchamos y arrastramos al margen derecho. En nuestro caso se ha utilizado aire, M-15 steel y otro denominado cobre, éste no lo encontramos en la librería sino que se ha creado aparte. Simplemente damos en la opción “materials” y “Add property” una vez ahí ponemos el nombre que deseemos y rellenamos los datos técnicos del material.

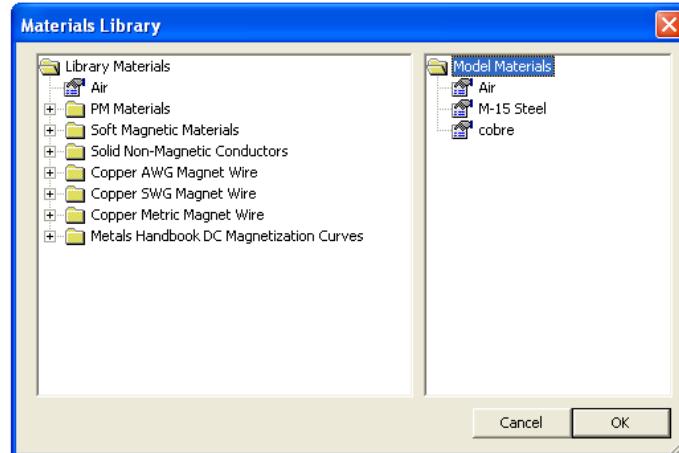


Fig. 34. Programa Femm 4.2. Definir materiales.

- Definición de los diferentes circuitos eléctricos que tengamos. En nuestro caso tenemos una bobina, en la misma pestaña de “properties” opción “circuits” añadimos uno nuevo. La ventana que nos muestra es sencilla, escogemos un nombre, serie o paralelo y la corriente en amperios. La figura 35 muestra nuestro caso donde hemos puesto el valor en corriente calculado anteriormente.

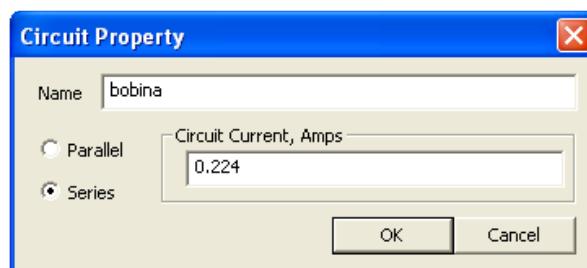


Fig. 35. Programa Femm 4.2. Definir circuito.

- Asignación de los diferentes materiales o circuitos a las partes del modelo así como el tamaño de la triangulación. Cuanto más pequeños sean los triángulos, más tiempo le costará al programa calcularlo y más precisión tendrá. Para asignar Este apartado es clave y vamos a verlo por partes. En primer lugar asignamos los materiales colocando un punto,  y una vez puesto lo seleccionamos y apretamos la barra espaciadora donde se nos abrirá un desplegable. Aquí es donde le decimos al programa qué material es y sus condiciones de medida, el apartado “mesh size” es la triangulación. El caso especial de la bobina vemos como hemos dicho que es cobre (con sus características antes definidas), que pertenece al circuito bobina y nos

deja implementar el número de vueltas que tiene, en nuestro caso, como hemos calculado antes son 4206 vueltas aproximadamente.

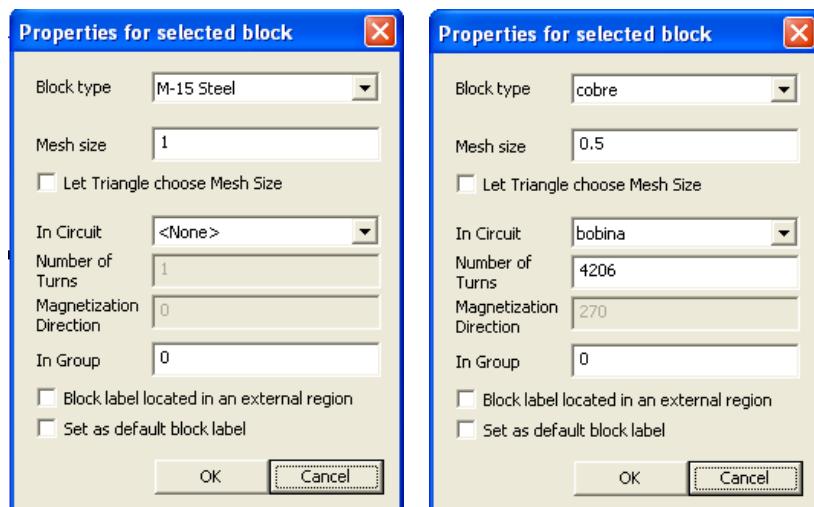


Fig. 36. Programa Femm 4.2.
Asignar materiales y circuitos.

- Delimitar nuestra área de trabajo mediante condiciones de contorno. En “properties”, opción “boundary”, seleccionamos añadir una nueva y en la ventana decidimos el nombre y las condiciones. Con esta condición de contorno en la circunferencia más exterior de nuestro modelo, nos aseguramos de que las líneas de campo magnético son tangenciales en la frontera. Después de esto tenemos que seleccionar las líneas de contorno y haciendo click en la barra espaciadora aplicarles esta condición que acabamos de crear. Ver figura 37.

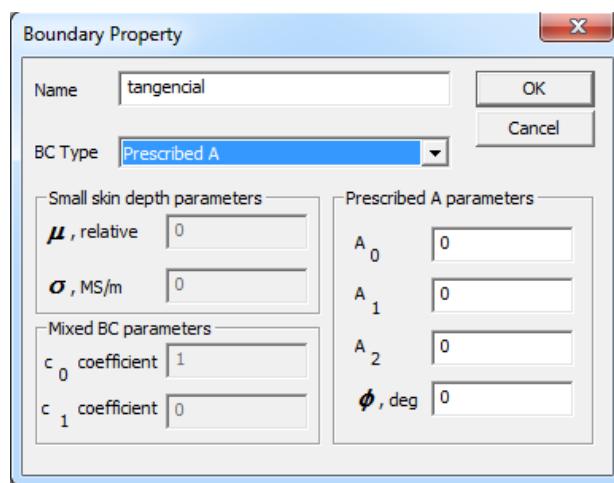


Fig. 37. Programa Femm 4.2. Condiciones de contorno.

- Crear mallado y procesar resultados. Hacemos el mallado pulsando  y nos fijamos cómo varía el mallado en función de la triangulación que hemos ido aplicando a cada material. Seguidamente procesamos los resultados pulsando .

- Por último observamos los resultados dando en las gafas. El programa nos abrirá una nueva pantalla donde podremos ver los resultados tales como: campo magnético B , intensidad de campo H , pérdidas por corrientes de Foucault, corrientes inducidas, flujos dispersos, etc.

La simulación en Femm de nuestro prototipo va a constar, en primer lugar, de un dibujo axisimétrico, con todas las características que hemos ido viendo anteriormente aplicadas. Se realizarán un total de 11 simulaciones, cada una de ellas idénticas salvo la posición del elemento móvil o pedal, el que iremos trasladando cada vez más cerca de la bobina y así poder ver cómo varía la energía magnética en función de la distancia, dando lugar a una variación de la fuerza que ejerce la bobina sobre la parte móvil de nuestro prototipo.

Este estudio se conoce como Tensor de Maxwell.

La figura 38 muestra el esquema qué se ha realizado con el programa, está ampliado para ver en detalle los elementos. El esquema al ser axisimétrico sólo ha sido necesario realizar una mitad. Vemos la bobina de cobre con el número de vueltas que posee, en el lado izquierdo tenemos hierro, igual que la parte superior, el margen derecho una pequeña zona de aire y seguidamente la otra parte de hierro que consta la estructura. La figura 15 puede ayudar a aclarar el esquema. En la parte superior tenemos una lámina de hierro que hace referencia a la parte móvil, distanciada 7 mm del bloque de la bobina puesto que iremos desplazándolo hasta llegar a la distancia mínima de nuestro prototipo que son 2 mm.

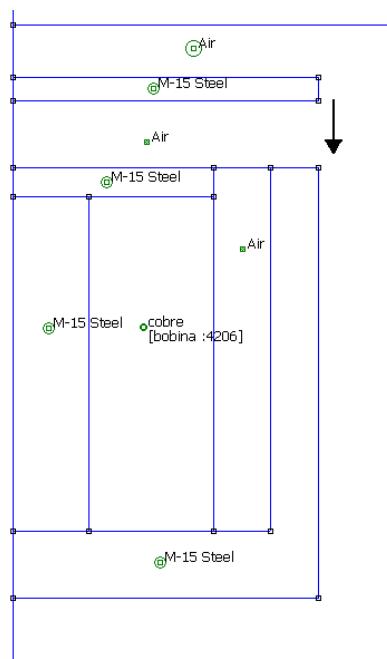


Fig. 38. Programa Femm 4.2.
Esquema de trabao.

Se van a realizar 11 simulaciones por lo que el desplazamiento será $\delta = 0.5 \text{ mm}$.

Ha de considerarse que las condiciones de contorno han de establecerse en fronteras suficientemente lejanas para que no distorsionen el modelo de estudio. Al final las condiciones de contorno solo se aplican a la última capa.

7.2.1.- Simulación 1.

Las simulaciones hechas contemplan el problema para una distancia inicial de 7 mm entre la bobina y la parte móvil hasta terminar con una distancia de 2 mm. Las triangulaciones realizadas van en orden ascendente, es decir, puntos más juntos donde requerimos de mayor precisión y conforme nos alejamos triangulación más grande, la figura 39 muestra de forma ampliada este hecho.

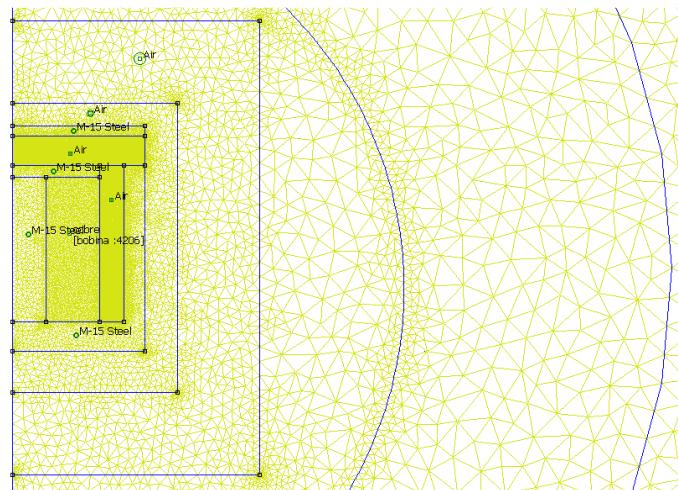


Fig. 39. Programa Femm 4.2. Vista de la diferencia en la triangulación.

Una vez vista la triangulación de una parte del esquema en Femm queremos mostrar el esquema completo que se ha realizado, puesto que las condiciones de contorno han de fijarse en la circunferencia que limita el espacio a estudiar. Utilizaremos este mismo esquema en las demás simulaciones, centrándonos exclusivamente en la parte de la bobina. Figura 40.

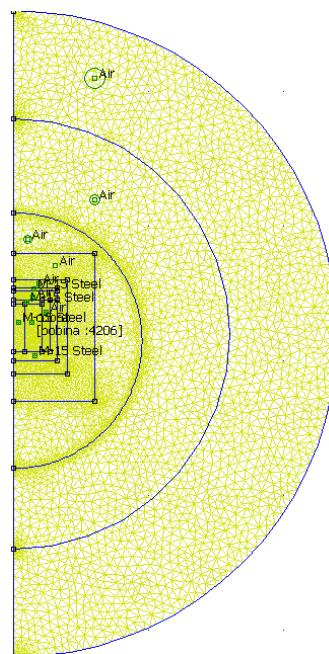


Fig. 40. Programa Femm 4.2.
Esquema completo.

Descriptas las particularidades de nuestro esquema solo nos queda procesar los resultados.

El criterio de colores nos muestra el módulo del campo magnético B y cómo está distribuido, así mismo, las flechas nos dicen la dirección de B . El programa nos da muchas posibilidades, entre ellas el número de líneas de campo que queremos que nos muestre, hemos marcado 20 de estas líneas y podemos ver cómo se cierran desde la parte fija central hasta la más externa, algunas por medio de nuestro elemento móvil y otras a través del aire. Conforme vayamos acercando la parte móvil en las siguientes simulaciones veremos que estas líneas cambian.

Se van a realizar 11 simulaciones, a continuación en la figura 41 mostramos la primera de ellas.

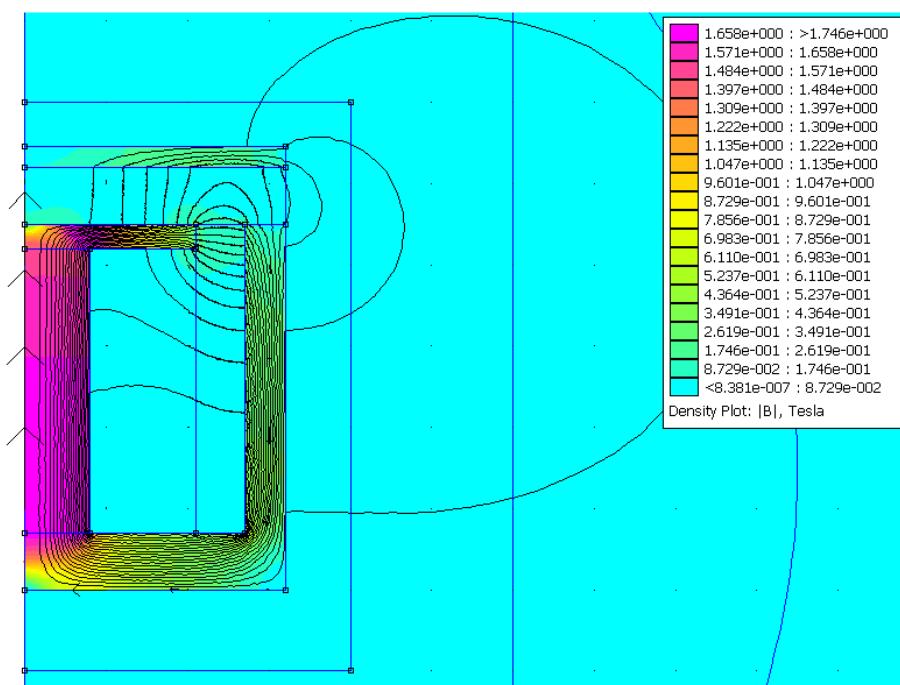


Fig. 41. Programa Femm 4.2. Resultados de la simulación 1.

Refrescamos en qué consiste el Tensor de Maxwell. Llamado así en honor a James Clerk Maxwell, es un tensor de segundo rango utilizado en electromagnetismo para representar la interacción entre las fuerzas eléctrica/magnética y el impulso mecánico. En situaciones simples como puede ser una carga puntual en un campo magnético homogéneo es fácil calcular las fuerzas a partir de la ley de Lorentz. Fácilmente se pueden complicar las ecuaciones y por ello nos valdremos del programa para calcularlo.

En el esquema que vemos en la figura 41 marcamos como zona de cálculo, sólo y únicamente la parte móvil o pedal. Una vez señalado se pondrá de un color verde. Hecho esto nos dirigimos a la pestaña “Integrate” . Al pinchar aquí se nos abrirá una ventana, en esta ventana seleccionaremos “Force via weighted Stress Tensor” como hemos reseñado en la figura 42.

Con esto obtenemos resultados en Newton [N], que obedecen a dos parámetros, componente r y componente z , no son más que lo que conocemos comúnmente como ejes de coordenadas en este caso r es nuestro componente x y el que denomina z es la componente y .

Para esta primera simulación los valores de fuerza que hemos obtenido son:

$$r - \text{component: } 0 \text{ N}$$

$$z - \text{component: } -3,23455 \text{ N}$$

Seguidamente procedemos a realizar la en orden cronológico las demás simulaciones.

7.2.2.- Simulación 2

Con el mismo esquema de distribución y desplazando una distancia $\delta x = 0,5 \text{ mm}$ nuestro elemento móvil procesamos los cálculos.

Los valores que obtenemos de fuerza en este caso son de:

$$r - \text{component: } 0 \text{ N}$$

$$z - \text{component: } -3,73192 \text{ N}$$

7.2.3.- Simulación 3.

Seguimos con la línea de las simulaciones anteriores, desplazamos una distancia $\delta x = 0,5 \text{ mm}$ y calculamos.

Para esta simulación 3 tenemos que:

$$r - \text{component: } 0 \text{ N}$$

$$z - \text{component: } -4,32806 \text{ N}$$

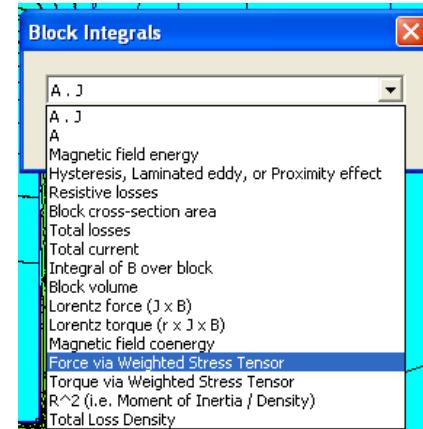


Fig. 42. Programa Femm 4.2.
Selección del cálculo.

7.2.4.- Simulación 4.

Seguimos en la misma dinámica y tras acercar nuestro pedal a la bobina una distancia $\delta_x = 0,5 \text{ mm}$ obtenemos resultados que son:

$r - \text{component: } 0 \text{ N}$

$z - \text{component: } -5,06065 \text{ N}$

7.2.5.- Simulación 5.

En esta quinta simulación la distancia total entre parte fija y móvil es de 5 mm. Poco a poco nuestra parte móvil cobra mayor importancia.

Obtenemos los valores de fuerzas: **$r - \text{component: } 0 \text{ N}$**

$z - \text{component: } -5,96816 \text{ N}$

7.2.6.- Simulación 6.

Seguimos haciendo simulaciones, desplazando tan solo la parte móvil y de esta forma obtenemos nuevos resultados.

Para esta simulación 6 obtenemos: **$r - \text{component: } 0 \text{ N}$**

$z - \text{component: } -7,1044 \text{ N}$

7.2.7.- Simulación 7.

La distancia que tenemos entre la parte fija y la móvil en esta simulación es de 4 mm. Poco a poco vamos viendo un incremento de la componente z que recordamos es nuestra componente y . No así la componente r que siempre obtenemos el mismo valor de 0 N

La fuerza ejercida sobre el pedal en esta simulación 4 es de:

$r - \text{component: } 0 \text{ N}$

$z - \text{component: } -8,54109 \text{ N}$

7.2.8.- Simulación 8.

Encaramos las últimas cuatro simulaciones, manteniendo constante la distancia que movemos la parte móvil $\delta_x = 0,5 \text{ mm}$.

Valores en esta nueva simulación: **$r - \text{component: } 0 \text{ N}$**

$z - \text{component: } -10,4092 \text{ N}$

7.2.9.- Simulación 9.

Seguimos con la simulación 9, la distancia entre las dos partes es de 3 mm y se hace más que evidente que nuestra parte móvil cobra mucha importancia. Veamos si los resultados de fuerza dicen lo mismo.

r – component: 0 N

z – component: – 12,9045 N

7.2.10.- Simulación 10.

En esta décima simulación vemos como las líneas de campo magnético que nos marca el programa se concentran en nuestra parte móvil.

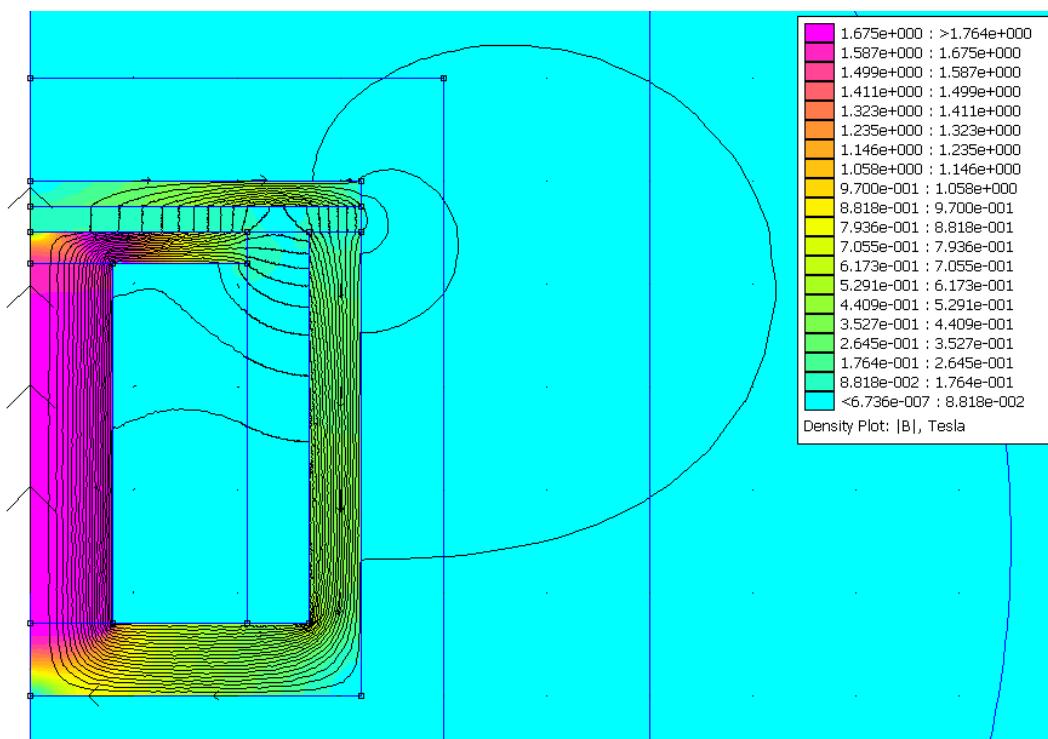


Fig. 42. Programa Femm 4.2. Resultados de la simulación 10.

Hemos representado la misma cantidad de líneas (20) que en la figura 41, simulación 1. De esta forma se puede comparar cómo han variado a lo largo de todas estas simulaciones.

Los valores de fuerza son:

r – component: 0 N

z – component: – 16,2994 N

7.2.11.- Simulación 11.

Última simulación, donde la distancia total entre la parte móvil y fija es de 2 mm. Esta es la distancia real de nuestro prototipo.

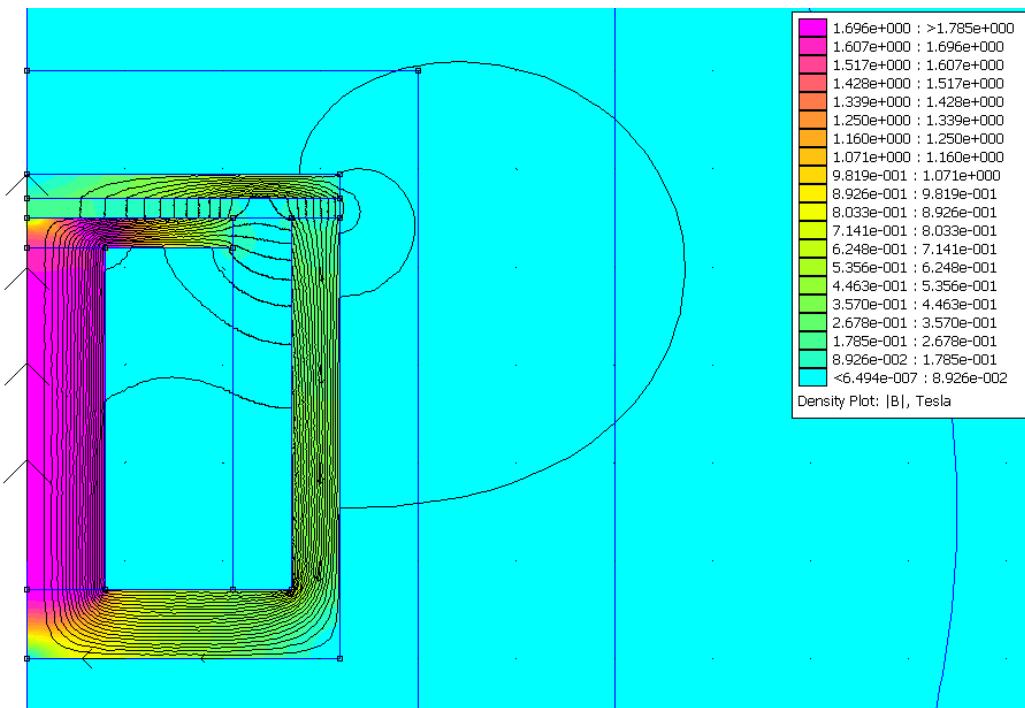


Fig. 43. Programa Femm 4.2. Resultados de la simulación 11.

Con la ayuda del programa calculamos los últimos valores de fuerza por medio del tensor de Maxwell:

$$r - \text{component: } 0 \text{ N}$$

$$z - \text{component: } -21,1011 \text{ N}$$

Una vez vistas todas las simulaciones es hora de agrupar los resultados para ver cómo evoluciona nuestro sistema sacar conclusiones.

7.3.- Teorema del tensor de Maxwell.

Las simulaciones son muy útiles y necesarias, en las imágenes hemos podido comprobar cómo evolucionaban las líneas de campo magnético que nos marcaba el programa (decidimos poner 20 de estas líneas) y ver que en esta última simulación muchas de ellas atraviesan la parte móvil.

Además de esto se ha calculado para cada simulación el valor de fuerza ejercido sobre el pedal, datos esenciales para realizar lo que conocemos como teorema del tensor de Maxwell.

Apoyándonos en estos resultados, conociendo la variable en cada caso y con la ayuda de un programa matemático como puede ser el Excel daremos respuesta a la fuerza que ejerce nuestro electroimán sobre la placa de metal móvil. Acompañado de una gráfica que represente este hecho en función de la distancia.

| | Fuerza en el eje X [N] | Fuerza en el eje Y [N] | Fuerza en el eje Y [N] | Distancia X [mm] | Distancia X [m] |
|---------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------|--------------------|
| Simulación 1 | 0 | -3,23455 | 3,23455 | 7 | 0,007 |
| Simulación 2 | 0 | -3,73192 | 3,73192 | 6,5 | 0,0065 |
| Simulación 3 | 0 | -4,32806 | 4,32806 | 6 | 0,006 |
| Simulación 4 | 0 | -5,06065 | 5,06065 | 5,5 | 0,0055 |
| Simulación 5 | 0 | -5,96816 | 5,96816 | 5 | 0,005 |
| Simulación 6 | 0 | -7,1044 | 7,1044 | 4,5 | 0,0045 |
| Simulación 7 | 0 | -8,54109 | 8,54109 | 4 | 0,004 |
| Simulación 8 | 0 | -10,4092 | 10,4092 | 3,5 | 0,0035 |
| Simulación 9 | 0 | -12,9045 | 12,9045 | 3 | 0,003 |
| Simulación 10 | 0 | -16,2994 | 16,2994 | 2,5 | 0,0025 |
| Simulación 11 | 0 | -21,1011 | 21,1011 | 2 | 0,002 |

Fig. 44. Hoja de cálculo Excel. Cálculo de fuerzas.

La figura 44 nos muestra la tabla que se ha realizado en Excel. Puesto que en principio no sufrirá modificaciones se ha pegado en formato de imagen. La primera columna de resultados son las fuerzas ejercidas en el eje X, evidentemente todas ellas poseen un valor de 0 N pues el movimiento de nuestra pieza móvil es únicamente en el eje Y. Llegamos a la siguiente columna donde vemos las fuerzas ejercidas en Newton y destacando ese valor negativo. Que sean valores negativos indica que la fuerza es en dirección descendente, esto es bastante coherente puesto que la parte móvil se encuentra encima de la bobina. De tal forma que la siguiente columna es idéntica en resultados pero en valor absoluto, omitiendo el signo y así poder realizar la gráfica de forma que veamos cómo aumenta la fuerza que soporta la parte móvil conforme disminuye la distancia en cada simulación.

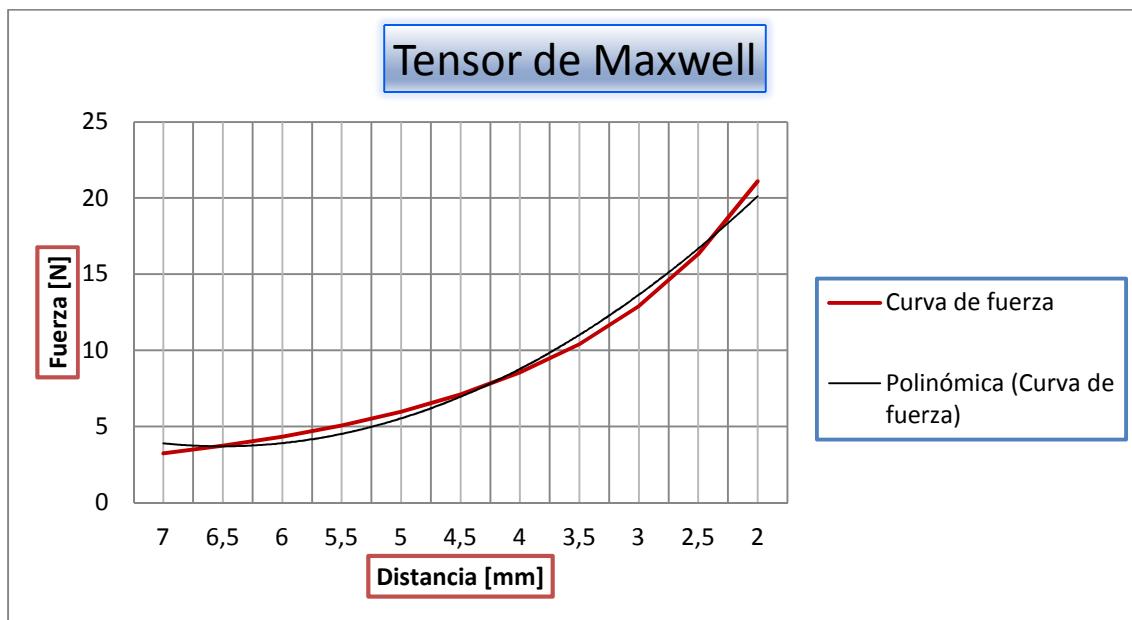


Fig. 45. Programa Excel. Gráfica del tensor de Maxwell.

En la gráfica también hemos incluido una línea de tendencia, en tono oscuro y claramente más fina. Esta línea es polinómica de orden 2 y nos ayuda a saber cómo evoluciona el sistema que hemos simulado, es decir, la fuerza. Definimos esta tendencia con la siguiente ecuación:

$$y = 0,2023x^2 - 0,8035x + 4,4882 \quad (38)$$

Estamos hablando en todo momento de Newton [N] como unidad de medida, sirva como comparación que, hablando en términos de kilogramo de fuerza (kgf) la equivalencia que tenemos es $1\text{ N} = 0,102\text{ kgf}$. Cada Newton de fuerza equivale más o menos a la fuerza necesaria para mover una carga de 100g. En nuestra gráfica vemos un pico de hasta 21 N. Esta fuerza es suficiente para salvar el rozamiento producido, que hemos tratado de minimizar en lo posible con la colocación de rodamientos.

Con esto damos por terminado el estudio electromagnético de nuestro prototipo mediante Femm 4.2.

7.5.- Desarrollo de los cálculos obtenidos.

El motivo de este apartado es saber en qué se trabaja y para ello debemos ser cautos con los resultados. Vamos a tratar de evaluar estos valores por medio de las ecuaciones teóricas y de esta forma corroborar que los resultados obtenidos en Femm son adecuados.

En primer lugar exponemos la ecuación de la fuerza.

$$F \cong \frac{1}{2}S \cdot B^2 \frac{1}{\mu_0} \quad (39)$$

- F : fuerza en Newton [N].
- S : sección. En nuestro caso sección de radio $r = 32\text{ mm}$. $S = \pi r^2$
- B : campo magnético en Teslas [T].
- μ_0 : permeabilidad del vacío, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\text{ TmA}^{-1}$

A partir de esta ecuación calcularemos la fuerza en una de las simulaciones realizadas anteriormente. Fijamos el valor de nuestra sección de estudio en metros [m]:

$$S = \pi r^2 = \pi(32^{-3})^2 = 32,2 \cdot 10^{-4}\text{ m}^2$$

Ahora nos ayudamos del programa para obtener un valor de B . Realizamos esto con la simulación 11, y como vemos en la figura 46, pinchando en un punto (marcado de color rojo) situado en el entrehierro obtenemos un valor absoluto de campo magnético, en Teslas [T]. Evidentemente para una misma simulación tenemos infinitos valores de B , por ello hemos usado un software, en base teórica solo utilizamos un valor de B .

El valor en este caso es:

$$|B| = 0,147254 \text{ T}$$

Por tanto la fuerza en ese punto es:

$$F = \frac{1}{2} S \cdot B^2 \frac{1}{\mu_0} = \frac{1}{2} 32,2 \cdot 10^{-4} \cdot 0,147254^2 \frac{1}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 27,7 \text{ N} \quad (40)$$

Comparamos este valor de 27 N con el valor de la gráfica que es de 21 N. Son sensiblemente diferentes pero como hemos dicho antes, el valor que hemos usado de B varía en función de en qué zona del entrehierro lo calculemos. Sí podemos sacar como conclusión que estamos en los valores adecuados de fuerza por tanto la simulación hecha en Femm 4.2 es válida, comprobado de forma teórica.

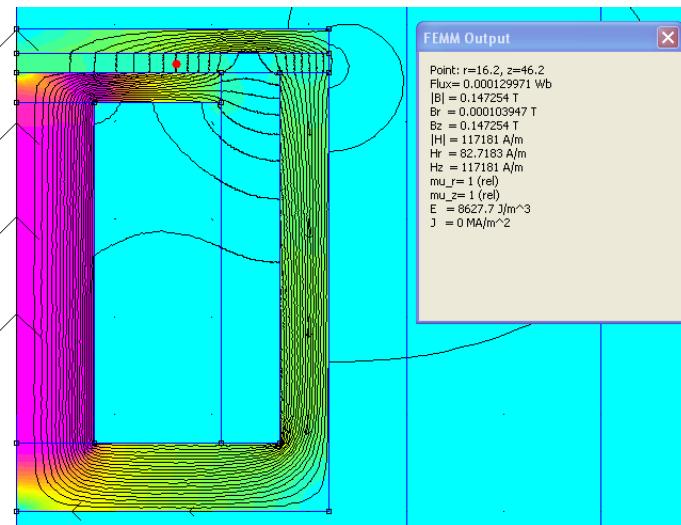


Fig. 46. Programa Femm 4.2. Valor de campo magnético en un punto del entrehierro.

8.- Electrónica.

Ya vimos la placa antigua en un apartado anterior y describimos prácticamente todos los elementos que la componían, también se hizo referencia al foco de luz por medio de una bombilla incandescente con su correspondiente LDR. Es ahora cuando tenemos que desglosar todo eso.

En primer lugar vamos a recordar qué es lo que teníamos entre manos y qué mejor forma que lo que nos muestran las figuras 47a y 47b, en la primera vemos los elementos con los que está confeccionada y en la otra el dorso de la misma donde se pueden ver las conexiones soldadas con estaño.

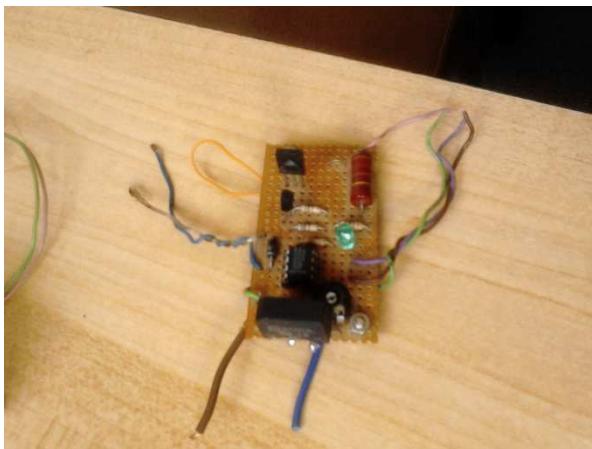


Fig. 47a. Placa original parte superior.

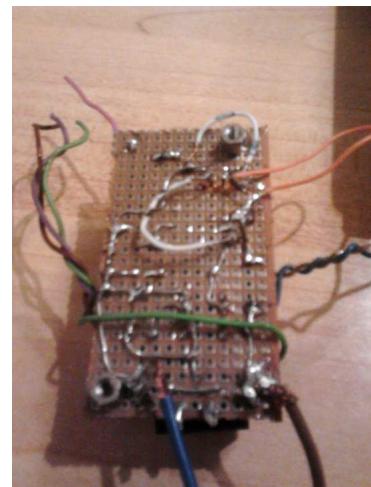


Fig. 47b. Parte inferior.

Un dato clave es que en su día esta placa funcionaba con una tensión de 24 V AC. Este dato es un punto negativo a la hora de la simplificación operativa del proyecto, puesto que aplicar esa tensión tan específica y a la vez poco común era harto difícil, sólo con fuentes de alimentación especiales que podemos encontrar en el laboratorio.

Esto es algo que desde el primer momento teníamos que solucionar, lo ideal es que el proyecto funcione a una tensión que podamos encontrar en cualquier sitio y no es otra que 230 V AC. De esta forma el proyecto ganaría enteros haciéndola útil y funcional en prácticamente cualquier lugar.

Otro punto que se decidió en modificar es la fuente de luz; en vez de utilizar una lámpara incandescente sustituirla por un diodo led. El diodo posee notables mejoras de rendimiento respecto a la bombilla, su consumo es muy inferior, su vida útil insultantemente superior y le daría a la maqueta un aire más nuevo con mejor presencia.

Por lo demás se mantendrá igual, la resistencia LRD y la bobina.

Ya sabemos qué es lo que queremos cambiar, ahora es necesario saber cómo funcionaba esta placa.

Según hemos podido averiguar su funcionamiento era el siguiente.

La lámpara incandescente permanecía iluminada en todo momento, entonces se hacía girar manualmente la rueda grande para que el sistema empezase a funcionar. Cuando la resistencia LDR no estaba iluminada por la bombilla la tensión aplicada en la bobina era de 0V, es decir, no tenía ninguna incidencia, por el contrario cuando la rueda seguía su camino y llegaba al punto que vemos en la imagen (figura 48) donde no se obstruye la luz y por tanto el LDR quedaba iluminado, bajaba su resistencia, el sistema electrónico se hacía eco y aplicaba una tensión de 24 V DC a la bobina, haciendo que ésta pasara a funcionar como electroimán. Solo durante ese pequeño momento en el que la resistencia LDR estaba condicionada por la luz de la bombilla y esto se repetía en cada vuelta que realizaba el eje principal.

Cuando la bobina entraba en funcionamiento ejercía una fuerza de atracción tal, que la inercia hacía que terminase de dar la vuelta para de nuevo aplicar otro pulso de fuerza.

Resumiendo podemos decir que cuando el mecanismo se encontraba en movimiento funcionaba con pulsos de tensión aplicados a la bobina que ejercían un par suficiente para que diese la vuelta completa, así sucesivamente hasta que era desconectado.

8.1.-Fuente de alimentación.

El primer y mayor problema que teníamos con la placa original era su tensión de funcionamiento y como bien hemos dicho, lo ideal es hacer que la nueva funcione a la tensión y frecuencia de la red doméstica que son 230 V AC 50 Hz. Para poder conseguir esto se ha tenido que recurrir, como bien dice este apartado, a una fuente de alimentación.

Una fuente de alimentación es un dispositivo que, mediante un circuito electrónico, permite obtener una tensión continua y estable a partir de una alimentación alterna.

Dicho así a muchos nos puede parecer tanto extraño, pero es más común de lo que nos creemos. Todos los aparatos que posean cierta parte electrónica es susceptible de llevar acoplado una fuente de alimentación. En nuestros propios hogares esto se hace palpable cuando por ejemplo, cargamos el teléfono móvil, encendemos nuestro ordenador, vemos la televisión o conectamos la impresora, todos estos aparatos y muchos más poseen una fuente de alimentación, en algunos casos está oculta, como en la televisión y en otros es tan tangible como el mismo cargador del móvil.

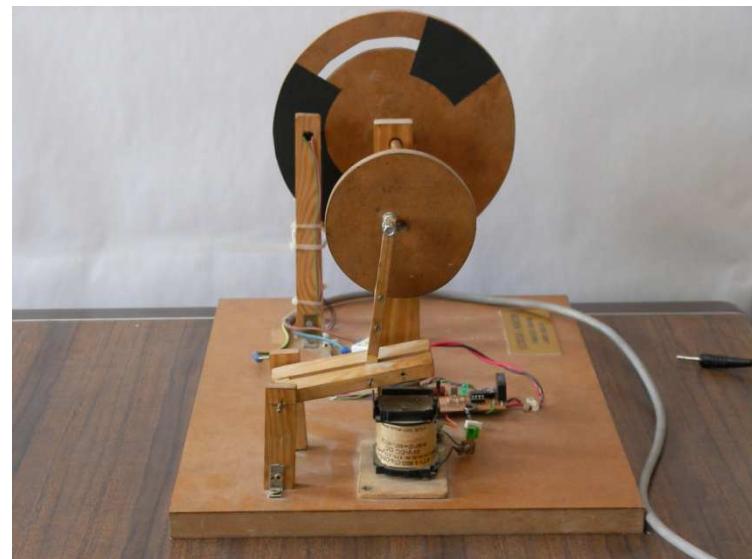


Fig.48. Vista perfil de la maqueta original.

Las fuentes de alimentación pueden clasificarse básicamente en dos apartados, lineales y conmutadas.

Las lineales tienen un diseño relativamente simple, que puede llegar a ser más complejo cuanto mayor es la corriente que deben suministrar, sin embargo su regulación de tensión es poco eficiente. Una fuente conmutada, de la misma potencia que una lineal, será más pequeña y normalmente más eficiente pero será más compleja y por tanto más susceptible a averías.

No vamos a entrar en la complejidad de cada uno de ellos, nos limitaremos a citar el esquema en que están construidas.

Las fuentes lineales siguen el esquema: transformador, rectificador, filtro, regulación y salida. Están diseñadas para una única tensión de salida.

Las fuentes conmutadas siguen el esquema: rectificador, conmutador, transformador, otro rectificador y salida. Con estas podemos variar la tensión de salida.

La fuente de alimentación que hemos obtenido por medio de la empresa Electricidad Herrera S.C con sede en Binéfar (Huesca), es ideal para nuestro proyecto, puesto que posee unos valores de entrada y salida de tensión y de corriente apropiados para nosotros. Tiene una pegatina en uno de sus laterales donde figuran dichos valores que son:

Input: 100 – 240 V AC 1,2 A 50/60 Hz

Output: +24 V 1,8 A

Añadimos una imagen donde vemos las conexiones de la fuente, a la izquierda, línea y neutro (AC), seguido del borne marcado como tierra, a continuación la salida output con $-V$ y $+V$ y lo que nos queda a la derecha marcado como "V ADJ"

no es sino la regulación para tener a la salida la tensión que deseemos hasta un máximo de +24 V DC, con un led al lado que indica si la fuente está encendida o no.

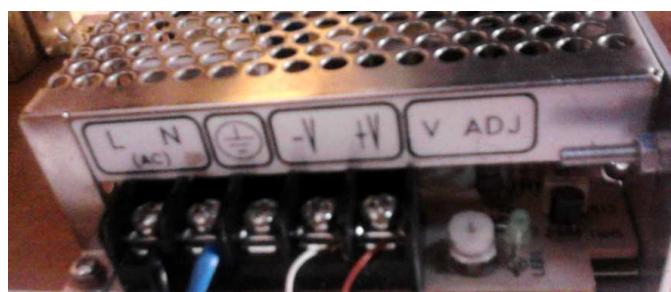


Fig.49. Fuente de alimentación, conexiones.

Es por tanto, una fuente de alimentación conmutada, con una tensión de salida variable. Por ahora no sabemos cuanta corriente consume nuestro proyecto, solo sabemos la corriente por la bobina de aproximadamente 224 mA, todavía muy lejos del máximo permitido de 1,8 A.

8.2.-Diseño placa electrónica.

Para el diseño de nuestra nueva placa se ha partido de la idea de funcionamiento que ya tenía el prototipo original, con más o menos los mismos elementos.

Partimos del punto en que la alimentación de la placa la obtenemos de la fuente de alimentación antes citada, por lo que tenemos cierto margen de maniobra.

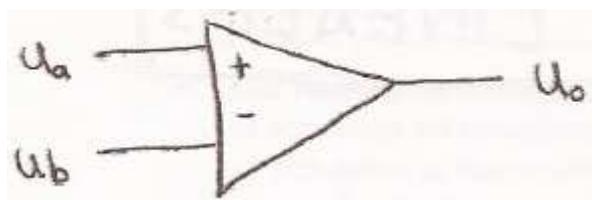
Dividimos el diseño en dos bloques, por un lado tenemos la detección de la situación de la rueda grande y por ente, la posición del sistema biela manivela. Por otro lado tenemos el bloque que aplica la tensión a la bobina, es decir, tenemos un bloque de señal y otro de potencia.

Una vez hemos desglosado la parte electrónica es tiempo de coger lápiz y papel e idear el circuito apropiado, cuando lo tengamos le pondremos valores numéricos.

El bloque de señal es sencillo de pensar, por un lado tenemos que alimentar a un diodo led, al que asociaremos una resistencia en serie para controlar la I_{max} admisible. Luego tenemos una LDR que variará en valor óhmico, comparando esta resistencia variable con otra de valor fijo podemos saber cuándo el diodo led ilumina LDR y por tanto saber en qué posición tenemos la rueda grande.

Esta comparación la realizaremos con un Amplificador Operacional (AO), dando como resultado a la salida del mismo U_0 una tensión de $\pm U_{cc}$, pues funcionará en modo saturación.

Nos apoyaremos en los apuntes de Electrónica industrial de Jesús Sergio Artal para explicar su funcionamiento.



En la figura 50 vemos una aplicación no lineal del A.O. No es más que un comparador, dadas unas tensiones U_a y U_b obtendremos una tensión U_o

Fig. 50. Apuntes J.S. Artal. Amplificador operacional.

Vamos a desarrollar su funcionamiento.

$$U_a = U_+ ; \quad U_b = U_-$$

$$U_o = \Delta_d \cdot U_d = \Delta_d [U_+ - U_-] = \Delta_d [U_a - U_b] \quad (41)$$

$$\text{Ganancia } \Delta_d = \infty$$

$$U_a > U_b \rightarrow U_d > 0 \rightarrow U_o = U_{cc}$$

$$U_a < U_b \rightarrow U_d < 0 \rightarrow U_o = -U_{cc}$$

Para que el A.O trabaje como comparador, aplicación no lineal, en lazo abierto, la diferencia entre los potenciales U_+ y U_- debe ser mayor que una cierta tensión, pongamos como ejemplo un A.O con $U_{cc} = 12 V$ y con una ganancia estándar de $\Delta_d = 200 V/mV$.

$$\Delta U_d = \frac{\Delta U_0}{\Delta_d} = \frac{24 \text{ V}}{200 \frac{\text{V}}{\text{mV}}} = 0,12 \text{ mV} \quad (42)$$

Ahora queremos que estas dos tensiones sean la señal para alimentar o no a nuestra bobina, se puede pensar que esta tensión es suficiente para alimentar la bobina pero caeríamos en un gran error y es que un AO, por lo general, no permite grandes salidas de corriente, típicamente decenas de mA. Es por esto que buscamos un bloque de potencia para alimentar la bobina.

En este caso se ha optado por poner un bloque de transistores funcionando como interruptor. En la siguiente imagen vemos como queda conectado y posteriormente su desarrollo matemático.

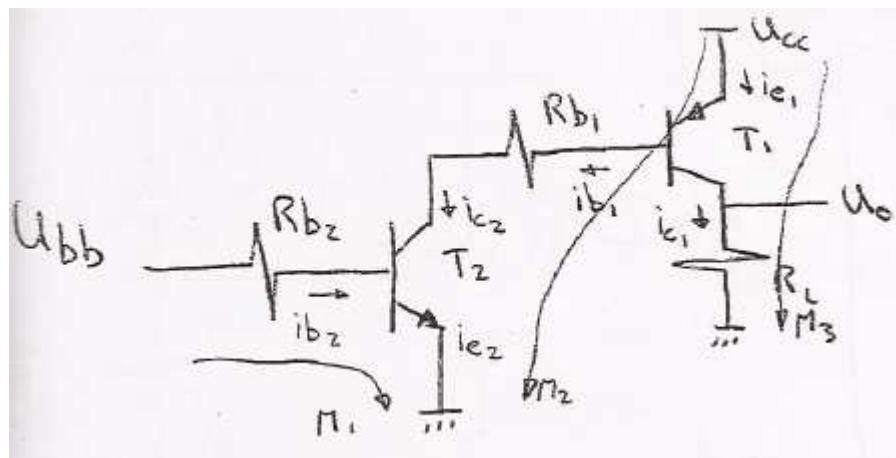


Fig. 51. Apuntes J.S. Artal. Esquema BJT como interruptor.

Del comparador que hemos visto antes tendremos dos tensiones que serán $\pm U_{cc}$, lo que en la figura vemos como U_{bb} . Tenemos ya descritos todos los componentes y las mallas necesarias para su estudio, así como las corrientes que intervienen.

Analizamos el sistema primero para $U_{hh} = 0$ V.

Malla 1:

$$U_{bb} = ib_2 \cdot Rb_2 + Ube_2 \rightarrow ib_2 = \frac{U_{bb} - Ube_2}{Rb_2} < 0 \rightarrow T_2 = CORTE \quad (43)$$

Malla 3:

$$T_2 = corte \rightarrow T_1 = corte \rightarrow U_0 = 0 \quad (44)$$

Ahora analizamos para una tensión $U_{bb} > 0$ V.

Malla 1:

$$ib_2 = \frac{U_{bb} - U_{be2}}{Rb_2} > 0 \quad \text{No queremos que se sature por tanto} \rightarrow ic_2 < ib_2 \cdot \beta_f \quad (45)$$

Malla 2:

$$U_{cc} = U_{eb1} + (ic_2 Rb_1) + U_{ce2} |_{sat} \rightarrow ic_2 = \frac{U_{cc} - U_{eb1} - U_{ce2} |_{sat}}{Rb_1} \quad (46)$$

$$\frac{U_{cc} - U_{eb1} - U_{ce2} |_{sat}}{Rb_1} < \beta_{f2} \frac{U_{bb} - U_{be2}}{Rb_2} \rightarrow Rb_2 < \frac{(U_{bb} - U_{eb2}) Rb_1 \beta_{f2}}{U_{cc} - U_{eb1} - U_{ce2} |_{sat}} \quad (47)$$

Estos son los dos bloques más importantes en nuestro diseño de la placa electrónica. Ahora que ya tenemos una idea bastante clara de cómo hacerla, con los cálculos previos es tiempo de pasar al siguiente apartado.

8.3.- Circuito electrónico.

Para comenzar a realizar el montaje de nuestra placa primero hemos tenido que hacer una lista de qué elementos debemos conseguir. Citamos los elementos que conformarán nuestra placa:

- Un Amplificador Operacional UA741CN.
- Un transistor NPN 548B de señal.
- Un transistor PNP BD138 de potencia.
- Un potenciómetro de tres patas de 10 kΩ.
- Un diodo led verde de señalización.
- Un diodo led Nichia de alta luminosidad.
- Un diodo.
- Hemos aprovechado la resistencia LDR del prototipo original.
- Resistencias de varios valores, 1 kΩ, 2,2 kΩ, 5,6 kΩ, 10 kΩ, 20 kΩ.

Antes de hacer uso de todos estos elementos, tenemos que conocer sus particularidades, para ello se han añadido en los anexos las hojas de características de todos ellos. Se han reseñado las más importantes.

En el apartado del diseño de nuestra placa se explicaron los dos bloques más importantes pero claro está, esto hay que implementarlo con más elementos. Y por ello presentamos el siguiente esquema, figura 52, realizado con el programa Crocodile Technology. Este no es un programa de uso libre, aunque sí podemos utilizar el Crocodile clips, que sí es de distribución gratuita y con el que podemos realizar multitud de ensayos.

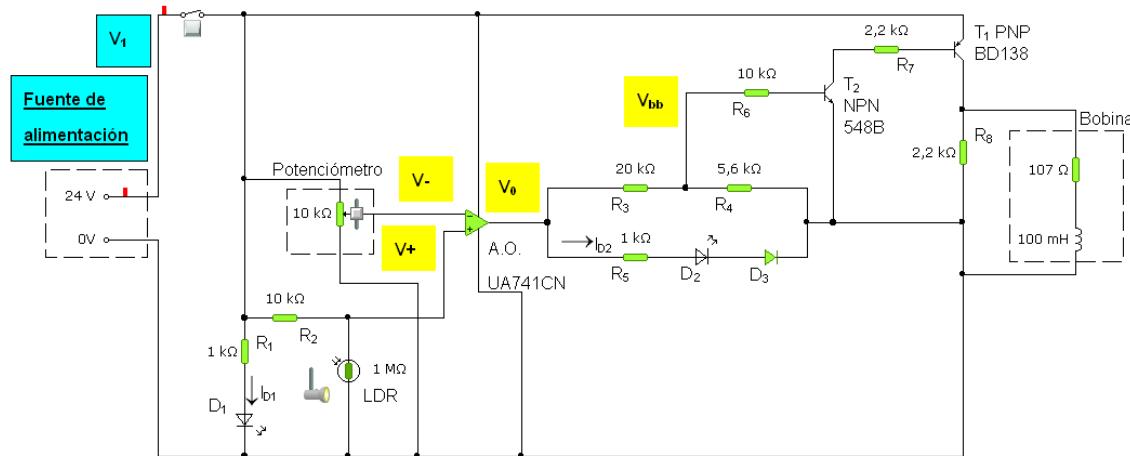


Fig. 52. Programa Crocodile Technology. Esquema electrónico.

Están todos los elementos perfectamente identificados, partiendo de la fuente de alimentación que hemos descrito anteriormente y terminando por la bobina. Se puede ver un interruptor en la parte superior izquierda, éste no está en la placa electrónica, pero se ha querido añadir en el programa para evitar que entre en funcionamiento, pues el objeto de la imagen es tener una idea de cuál es el desarrollo electrónico realizado.

Tenemos varios puntos interesantes para calcular, están marcados con fondo amarillo y también dos corrientes importantes para hacer que nuestros diodos funcionen en los márgenes adecuados.

Vamos a calcular en primera instancia el valor de corriente I_{D1} correspondiente a nuestro led "Nichia" de 5 mm, las características las podemos encontrar en la web alojada en la bibliografía. Este led de alta luminosidad tiene algunas características especiales tales como $U_F = 3,2$ V y corriente típica de funcionamiento $I_{led} = 20$ mA hasta un máximo de $I_{max} = 30$ mA.

Calculamos:

$$I_{D1} = \frac{V_1 - U_F}{R_1} = \frac{24 - 3,2}{1000} = 20,8 \text{ mA.} \quad (48)$$

La corriente es adecuada para su buen funcionamiento puesto que es menor que I_{max} .

Ahora vamos a calcular las dos tensiones del comparador. Queremos recordar que la intensidad que absorbe el amplificador operacional es prácticamente 0 por tanto su cálculo es inmediato aplicando un divisor de tensión.

Calculamos V- :

$$V- = V_1 \frac{R_b}{R_a + R_b} = 24 \frac{5}{5 + 5} = 12 \text{ V} \quad (49)$$

Siendo R_a y R_b los valores en $k\Omega$ de la resistencia del potenciómetro, la suma de ambos siempre será la impedancia total que son $10 \text{ k}\Omega$, aunque por separado podrán variar en función de cuánto giremos la rosca que tiene. En la ecuación se ha elegido para un valor medio.

Conozcamos ahora el valor de V+ dependiente de una resistencia fija y nuestra LDR. Ya sabemos que nuestra LDR tomará valores diferentes en función de si está o no iluminada por el diodo led. Mediante el uso de un multímetro y en condiciones reales de funcionamiento, se obtuvieron los dos valores.

Resistencia del LDR cuando está iluminado: $R_{LDRluz} = 700 \Omega$

Resistencia del LDR cuando no está iluminado: $R_{LDRnoluz} = 85 \text{ k}\Omega$

De esta forma ya podemos conocer el valor de V+ en cada una de las situaciones.

$$V+ = V_1 \frac{R_{LDR}}{R_2 + R_{LDR}} \quad (50)$$

$$V+ = 24 \frac{700}{10.000 + 700} = 1,57 \text{ V} \quad \text{Tensión cuando está iluminada}$$

$$V+ = 24 \frac{85}{10 + 85} = 21,47 \text{ V} \quad \text{Tensión cuando no está iluminada}$$

En función de la comparación entre V- y V+ obtenemos a la salida del amplificador una tensión V_0 como describimos en el apartado del comparador. Con esta tensión hacemos funcionar el bloque de transistores actuando como interruptor explicado anteriormente. Como único criterio de diseño hay que cumplir con la ecuación 47.

Vamos a recordar esta ecuación y poner valores, nuestra R_{b2} de la teoría es R_6 en el esquema electrónico. Los valores que necesitamos de los componentes se han extraído de sus hojas de características, en los anexos.

$$R_6 < \frac{(U_{bb} - U_{eb2})R_7\beta_{f2}}{U_{cc} - U_{eb1} - U_{ce2} |_{sat}}$$

$$R_6 < \frac{(3,34 - 0,7)2200 \cdot 290}{24 - 1 - 0,3} = 74 \text{ k}\Omega \quad (51)$$

El valor de U_{bb} se ha obtenido según ensayo, el valor de nuestra resistencia es de $R_6 = 10 \text{ k}\Omega$ por supuesto muy inferior a esos $74 \text{ k}\Omega$.

Ya sólo nos queda calcular la corriente por el diodo 2.

$$I_{D2} = \frac{V_0 - U_{F2} - U_{F3}}{R_5} = \frac{20,6 - 2,1 - 0,7}{1000} = 17,8 \text{ mA} \quad (52)$$

El valor de salida del amplificador operacional V_0 es debido a la no idealidad del mismo, aún así conseguimos una corriente aceptable para que pueda funcionar correctamente el diodo 3.

8.4.- Montaje de la placa electrónica.

Ya sólo nos queda implementar todos estos elementos y comprobar que nuestro diseño de la placa electrónica funciona correctamente. Además de la placa habrá que ver si la posición del led y LDR son correctas, etc.

Comenzamos por el cable de alimentación, utilizaremos una manguera de $3 \times 1,5 \text{ mm}^2$. En un extremo tenemos una clavija Schuko macho y en el otro extremo colocamos tres bananas de seguridad también macho. Estas bananas irán conectadas a sus complementarias hembras que tenemos en nuestra zona de mando del prototipo. De ahí alimentamos a nuestra fuente de alimentación interponiendo un interruptor bipolar. La alimentación se ha realizado con cable unifilar de $1,5 \text{ mm}^2$ de sección.

La fuente de alimentación alimentará nuestra placa electrónica. El montaje se ha realizado en una placa de prototipos o protoboard, así se las conoce. Es esencialmente una placa agujereada con conexiones internas dispuestas en hileras, de modo que forman una matriz de taladros los que podemos “pinchar” componentes y formar el circuito deseado. Cada agujero de inserción está a una distancia normalizada de los demás, lo que quiere decir que un circuito integrado encajará perfectamente.

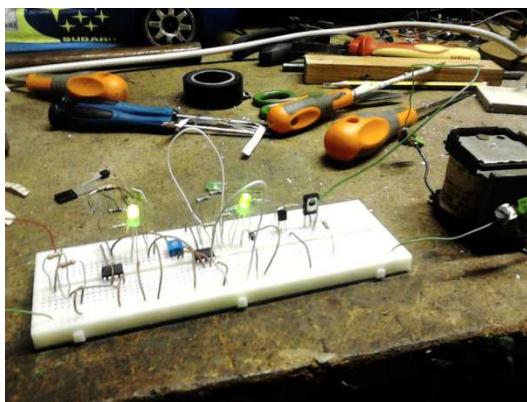


Fig. 53a. Placa de prototipos o protoboard.



Fig. 53b. Diodo soldado con estaño.

Aclaramos como son estas placas viendo la figura 53a. Con el prototipo ya montado existen diversos elementos que están fuera de la placa, nos referimos a la resistencia LDR, al led de alta luminosidad y por supuesto, a la bobina. En referencia a los dos primeros tenemos que decir que sus patas fueron soldadas con estaño para conseguir una unión sólida y duradera, ver figura 53b.

9.- Conclusiones.

Se ha realizado un prototipo con un mecanismo biela manivela que transforma el movimiento lineal en rotacional, la energía aplicada se hace a cargo de una bobina asociada a un núcleo ferromagnético. La regulación se ha llevado a cabo por medio de un sistema electrónico creado para tal fin.

La creación del prototipo se ha llevado a realizado usando materiales de larga duración, principalmente de metacrilato. Se han utilizado rodamientos en todas las partes móviles para minimizar los efectos negativos del rozamiento.

El estudio electromagnético por el método de tensor de Maxwell se ha llevado a cabo con el programa de distribución libre Femm 4.2 de David Meeker.

En definitiva, un prototipo que realiza un movimiento circular de forma continuada en el tiempo aplicando una fuerza pulsante a través de un solenoide. Aunque además de tener esta función como principal, también debemos destacar que si colocamos una serie de imanes en el pedal o parte móvil y hacemos girar de forma manual el mecanismo obtenemos en bornes de la bobina una tensión inducida. Esto obedece la ley de Faraday, por tanto nuestro prototipo se puede utilizar de forma reversible.

Al término de esta memoria y posterior carga en Zaguán se estaba trabajando en mejorar la placa electrónica haciendo que ésta fuese una placa de circuito impreso (PCB).

Posibles mejoras que se pueden acometer de cara al futuro es mejorar el par de funcionamiento, por medio de un volante de inercia, por ejemplo. También sería interesante que el prototipo comenzase a funcionar de forma autónoma y además que el movimiento fuese aprovechado para realizar algún tipo de trabajo.

10.- Bibliografía.

La realización de esta memoria no habría sido posible sin consultar y tomar datos de otras fuentes.

- [1] PARDINA, Antonio. Apuntes de electricidad y magnetismo 1^{er} curso Ingeniería Técnica Industrial, Electricidad. Universidad de Zaragoza.
- [2] ARTAL SEVIL, J. Sergio. Apuntes de electrónica industrial 2^º curso Ingeniería Técnica Industrial, Electricidad. Universidad de Zaragoza.
- [3] Concepto y uso de escalas:
<http://www.dibujotecnico.com/saladeestudios/teoria/normalizacion/Escalas/Escalas.php>
- [4] Todo sobre rodamientos: <http://es.scribd.com/doc/58876483/DIBUJO-TECNICO-RODAMIENTOS-ELEMEN-TOS-DE-PROTECCION-Y-SEGURIDAD-SOPORTES-ENGRASADORES-COJINETES>
- [5] Canaletas UNEX: <http://www.unex.net>
- [6] Diodo Nichia de alta luminosidad: <http://www.led1.de/shop/lng/en/nichia-led-5mm-white-44000mcd-nspw500gs-k1.html>
- [7] Enciclopedia libre: <http://es.wikipedia.org>

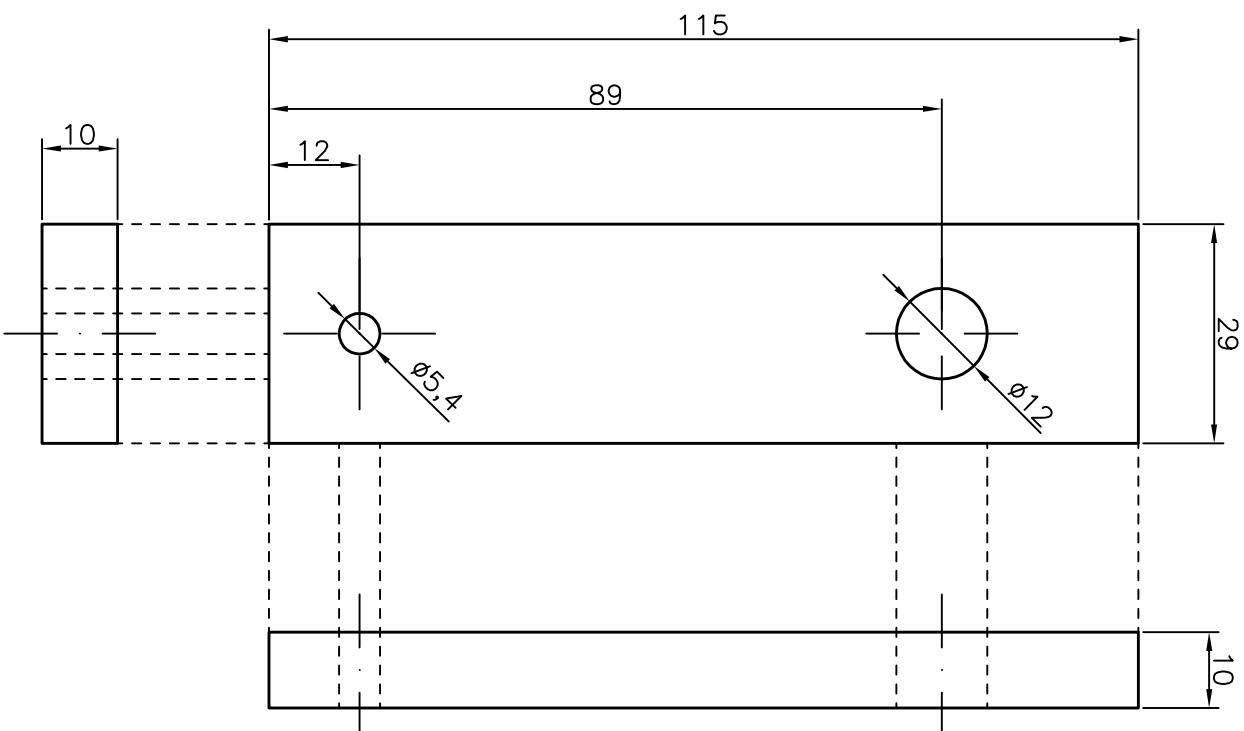
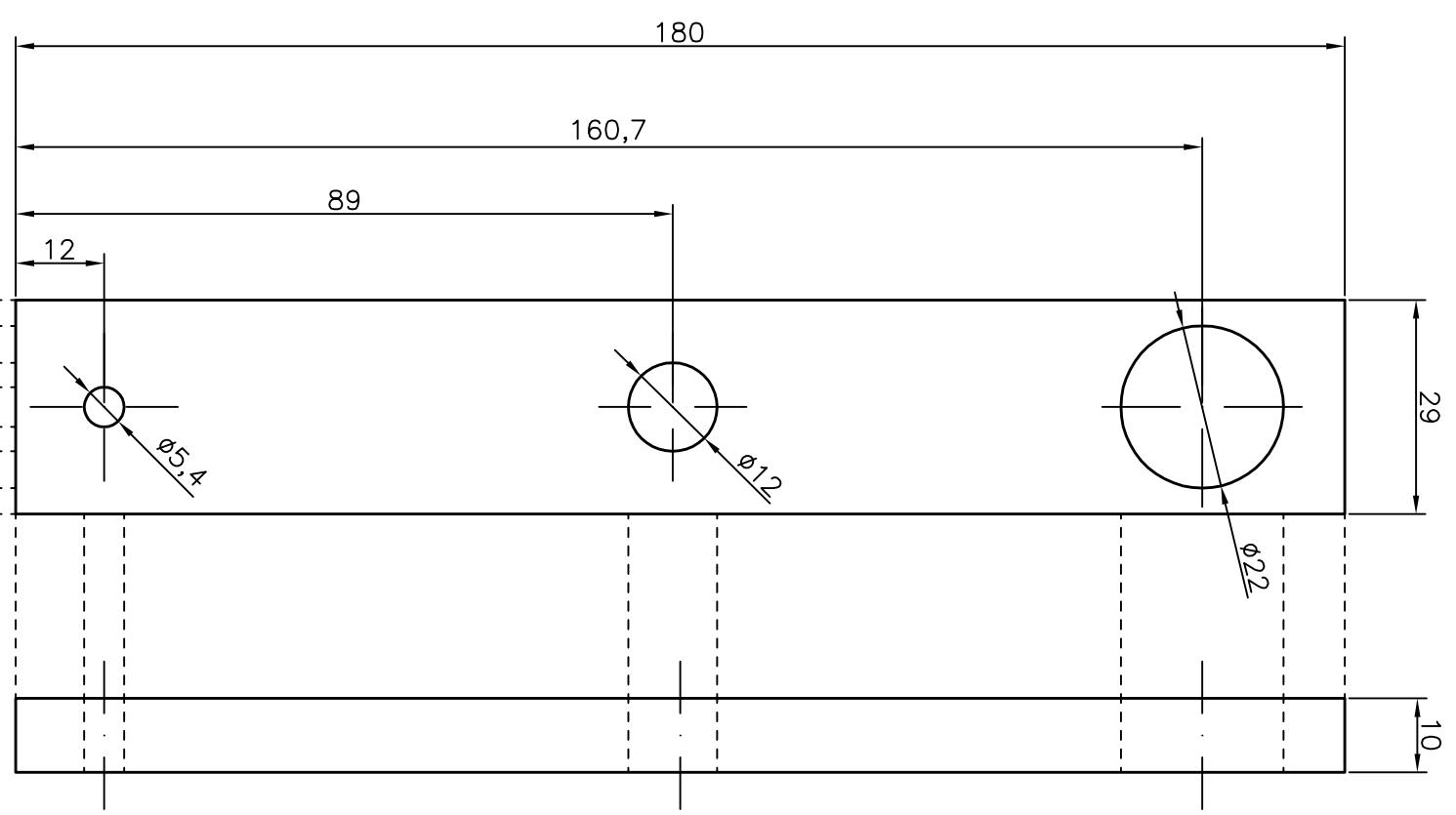
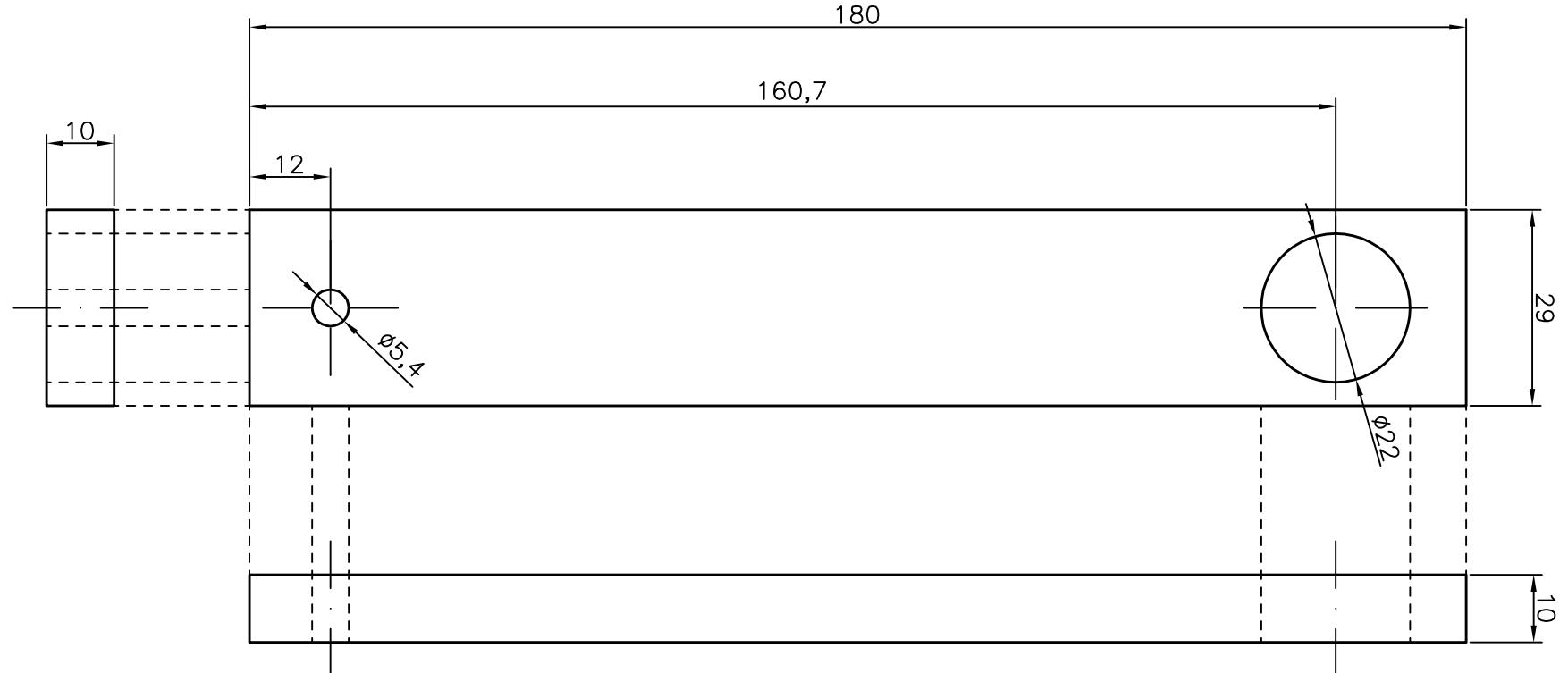
10.- Anexos.

Apartado dedicado a contener apoyo y referencias en todo lo necesario para completar la memoria. Introducimos dos apartados, en primer lugar los planos del prototipo y en segundo lugar las hojas de características de los componentes electrónicos.

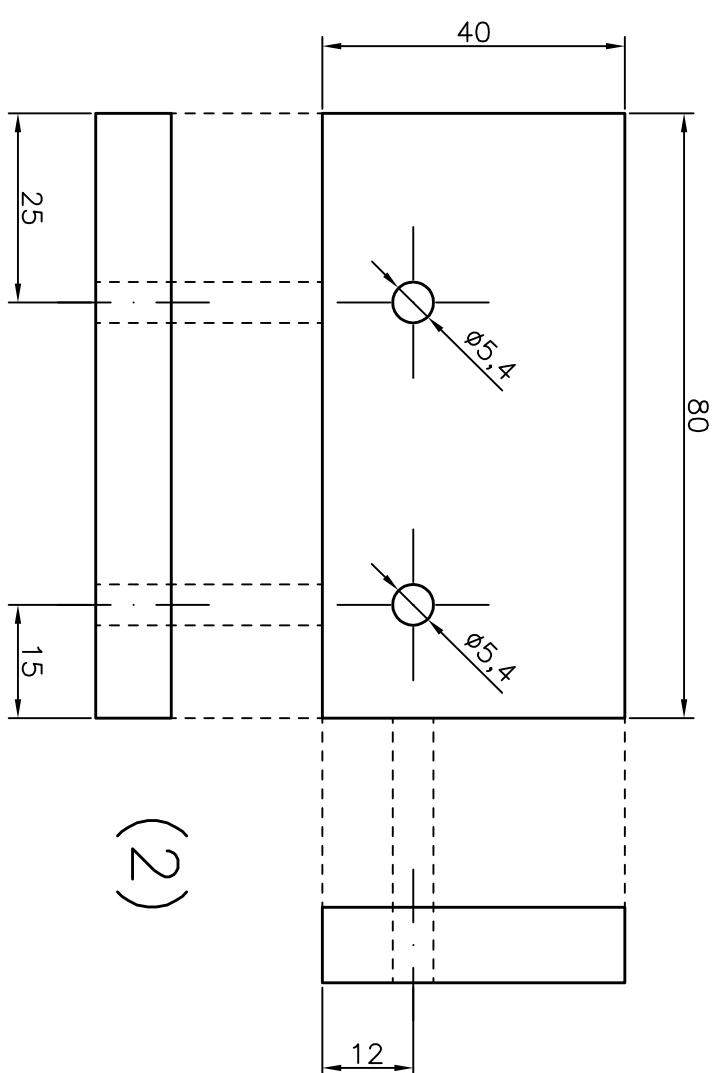
10.1.- Planos.

Son 11 los planos realizados del prototipo, todas las piezas han sido debidamente dibujadas y acotadas. De esta forma apoyamos la descripción que se ha realizado del mismo.

Se sucederán de forma consecutiva y se han ordenado de forma que en primer lugar los planos 1 son los enfocados a describir las piezas realizadas en metacrilato seguido de los planos 2 donde encontramos las piezas hechas en madera, los planos 3 que hacen referencia a todos los elementos de tornillería etc. y por último el plano 4 que hace referencia al mecanismo biela manivela.

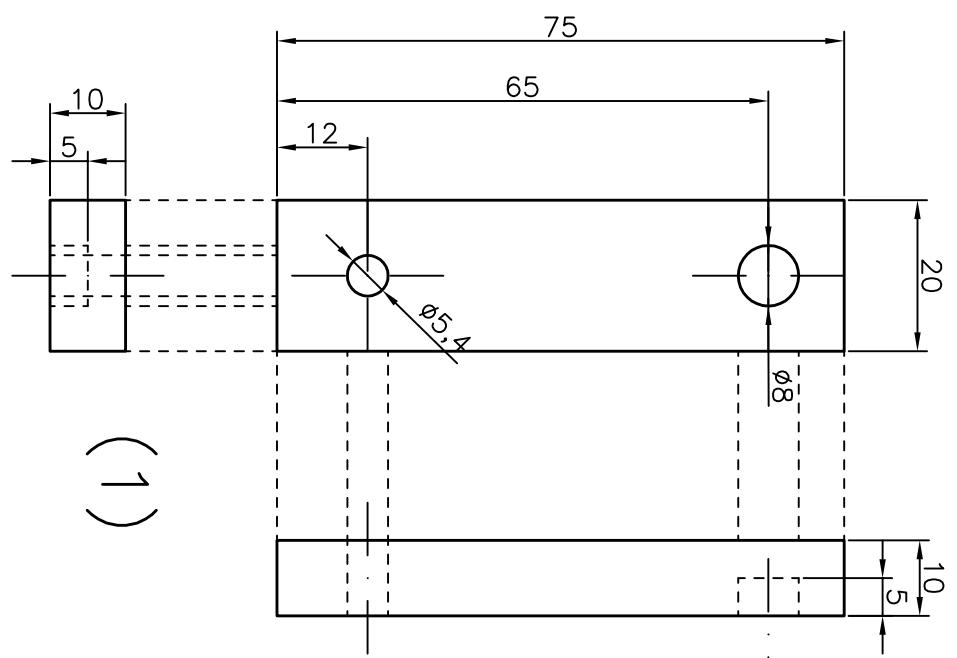


| | | | | | |
|----------|----------|-------------|------------------------|---------------|--|
| Fecha: | 07/10/13 | Nombre: | J.Izquierdo | Firma | Escuela de Ingeniería y Arquitectura Universidad de Zaragoza |
| Dibujado | | | | | |
| Comprob. | | | | | |
| Escala: | 1:1 | Piezas | soportes eje principal | Plano: | 1 |
| | | metacrilato | y soporte | Hoja: | 1 |
| | | | LDL | Especialidad: | Electricidad |
| | | | | | |

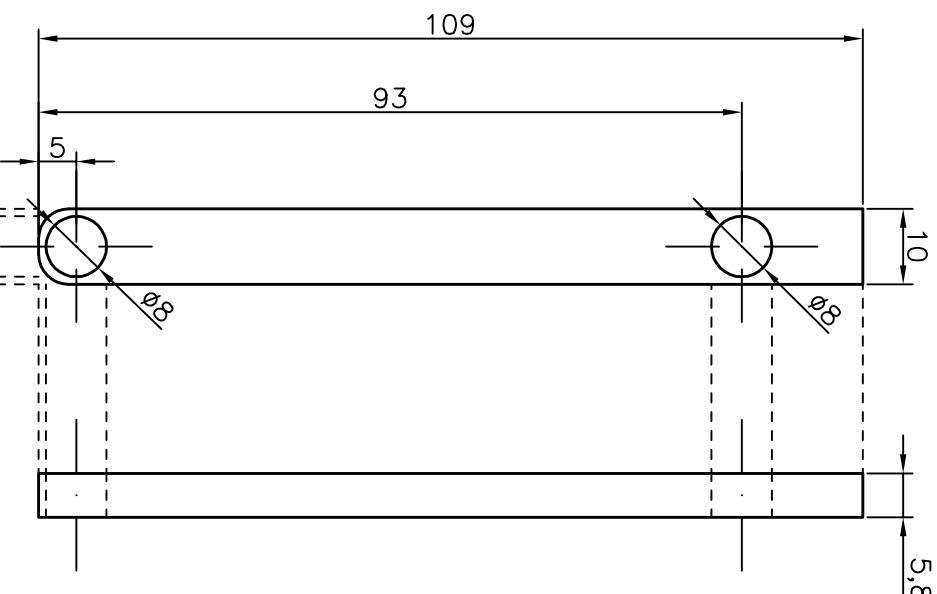
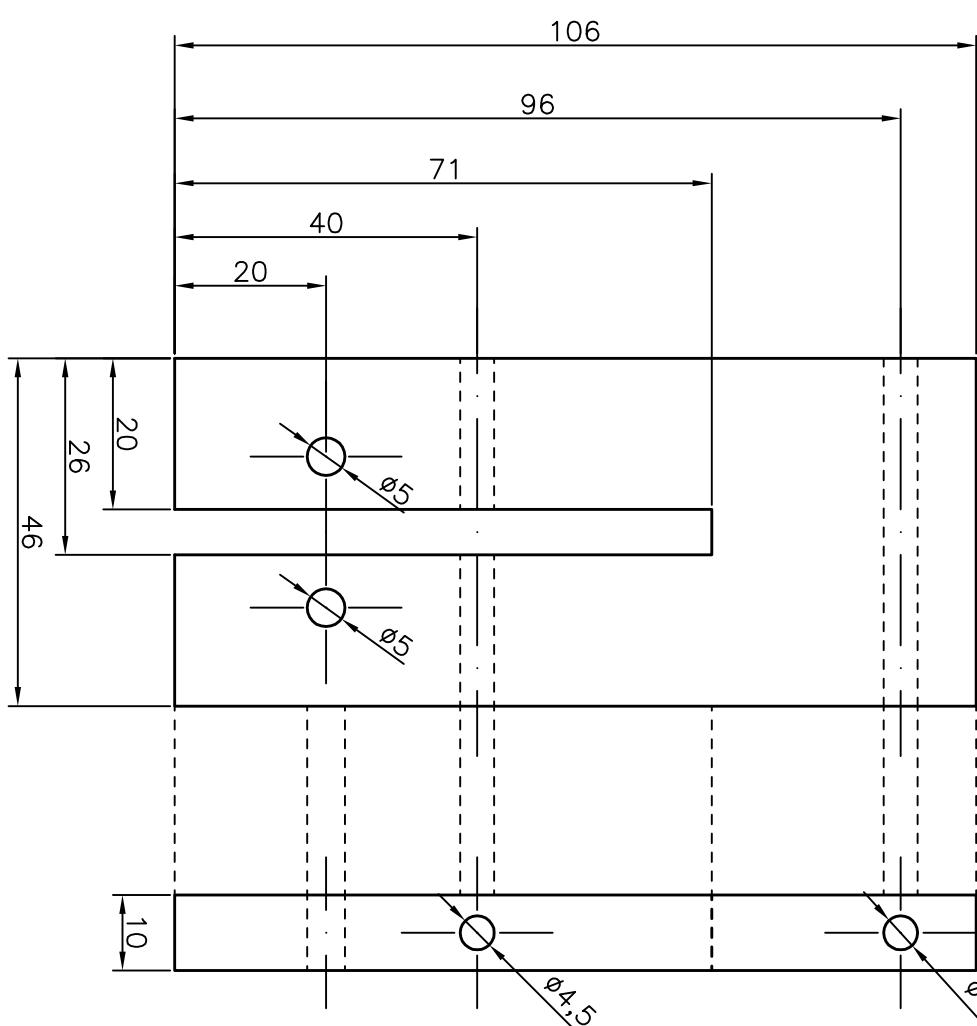


(2)

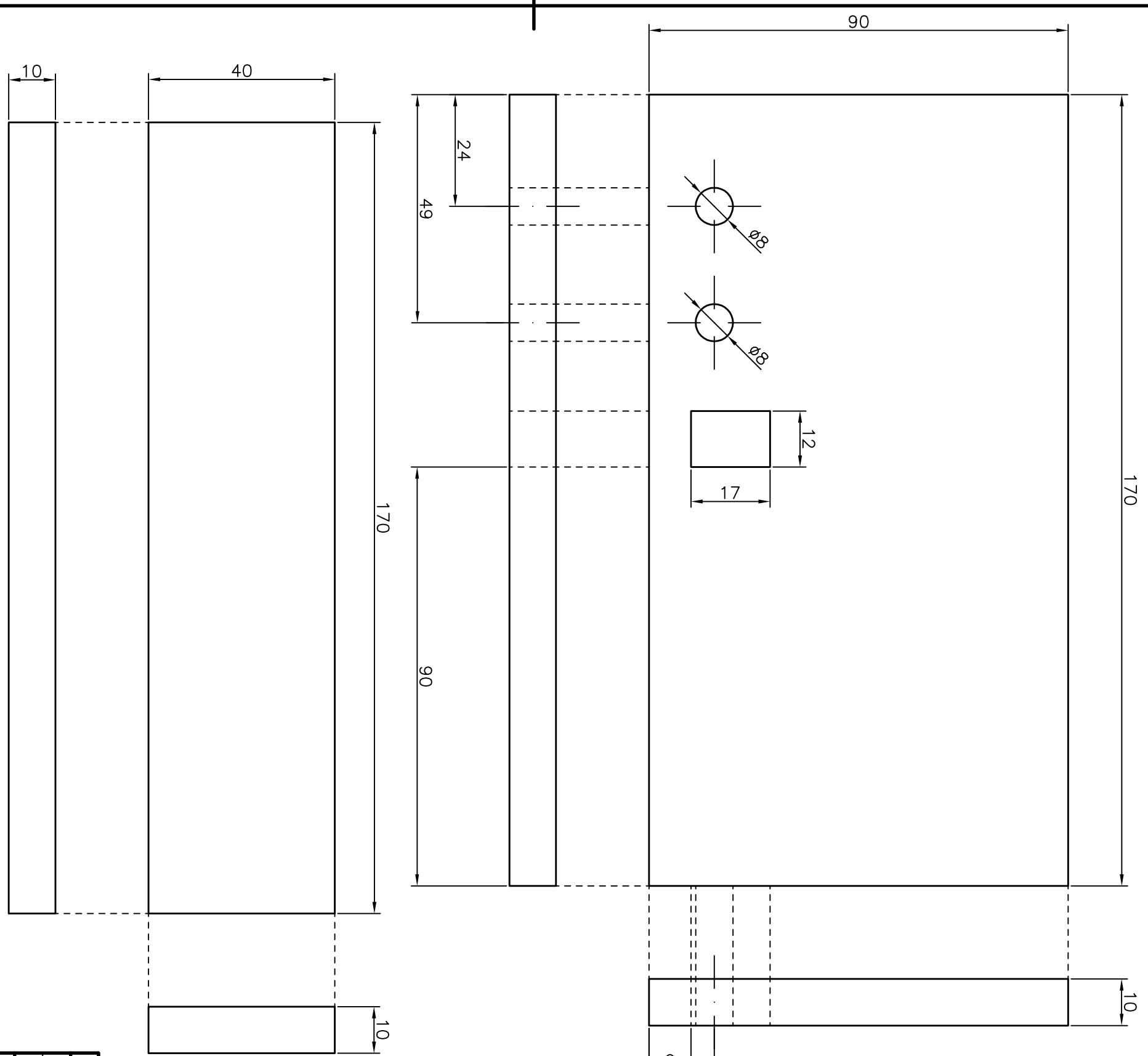
Las piezas indicadas como "(1)" y "(2)" corresponden a que hay dos idénticas de cada una de las mismas para el montaje de la maqueta.



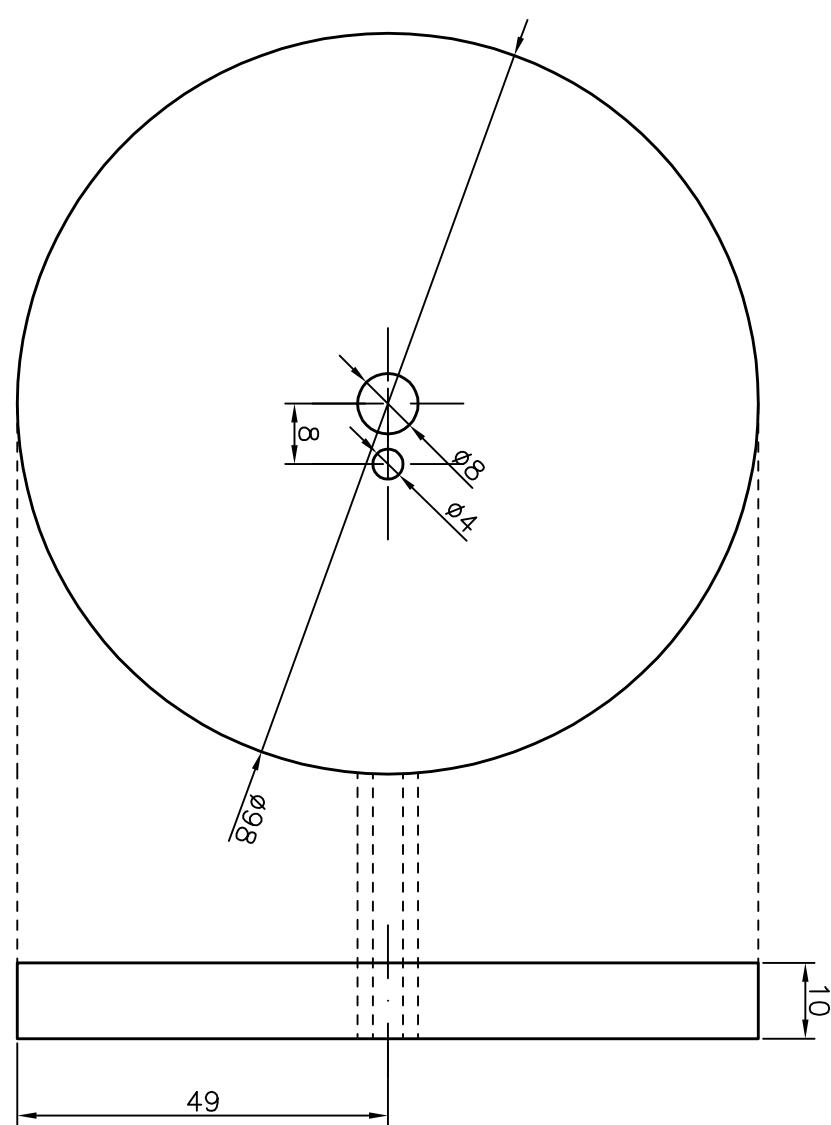
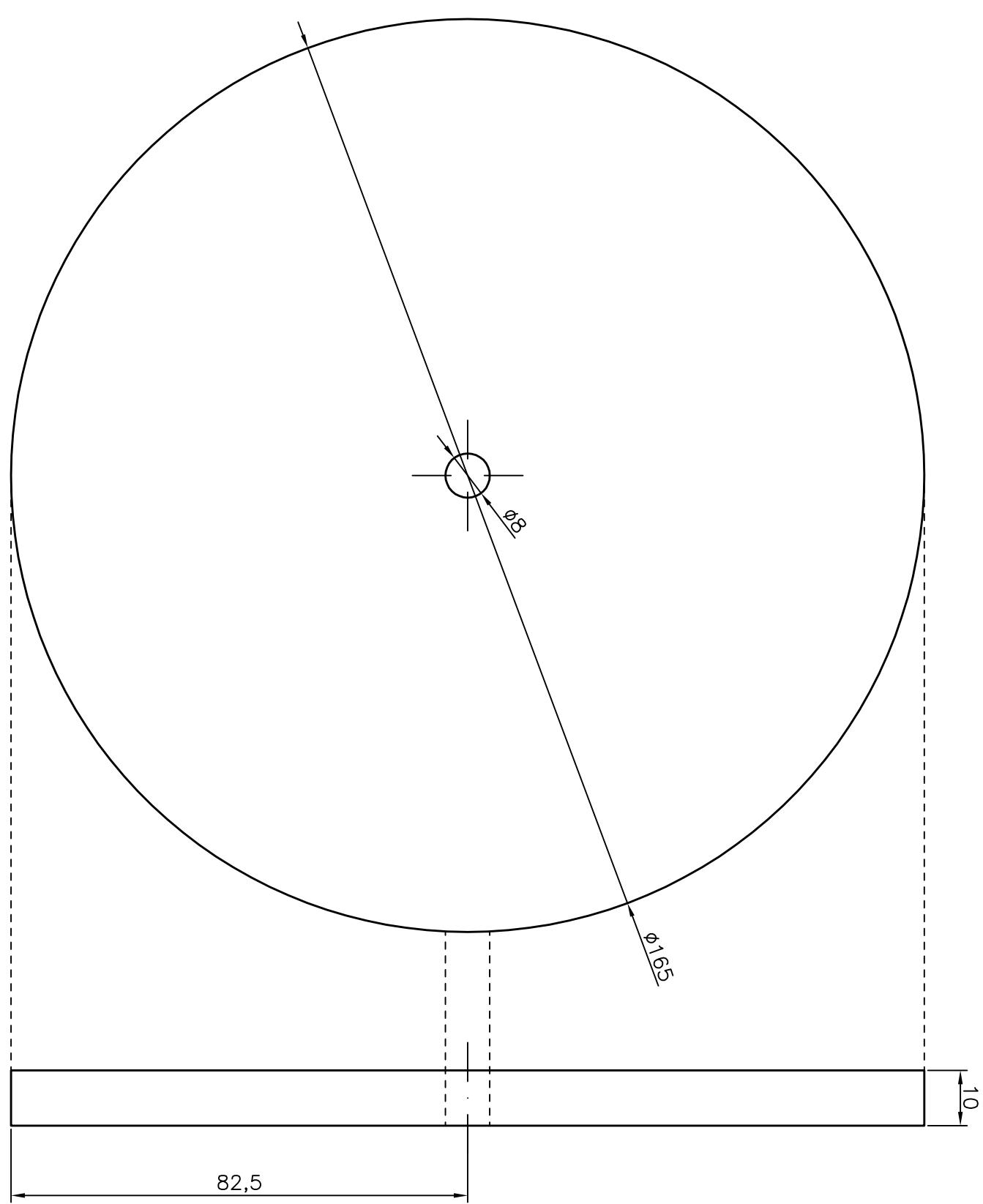
(1)



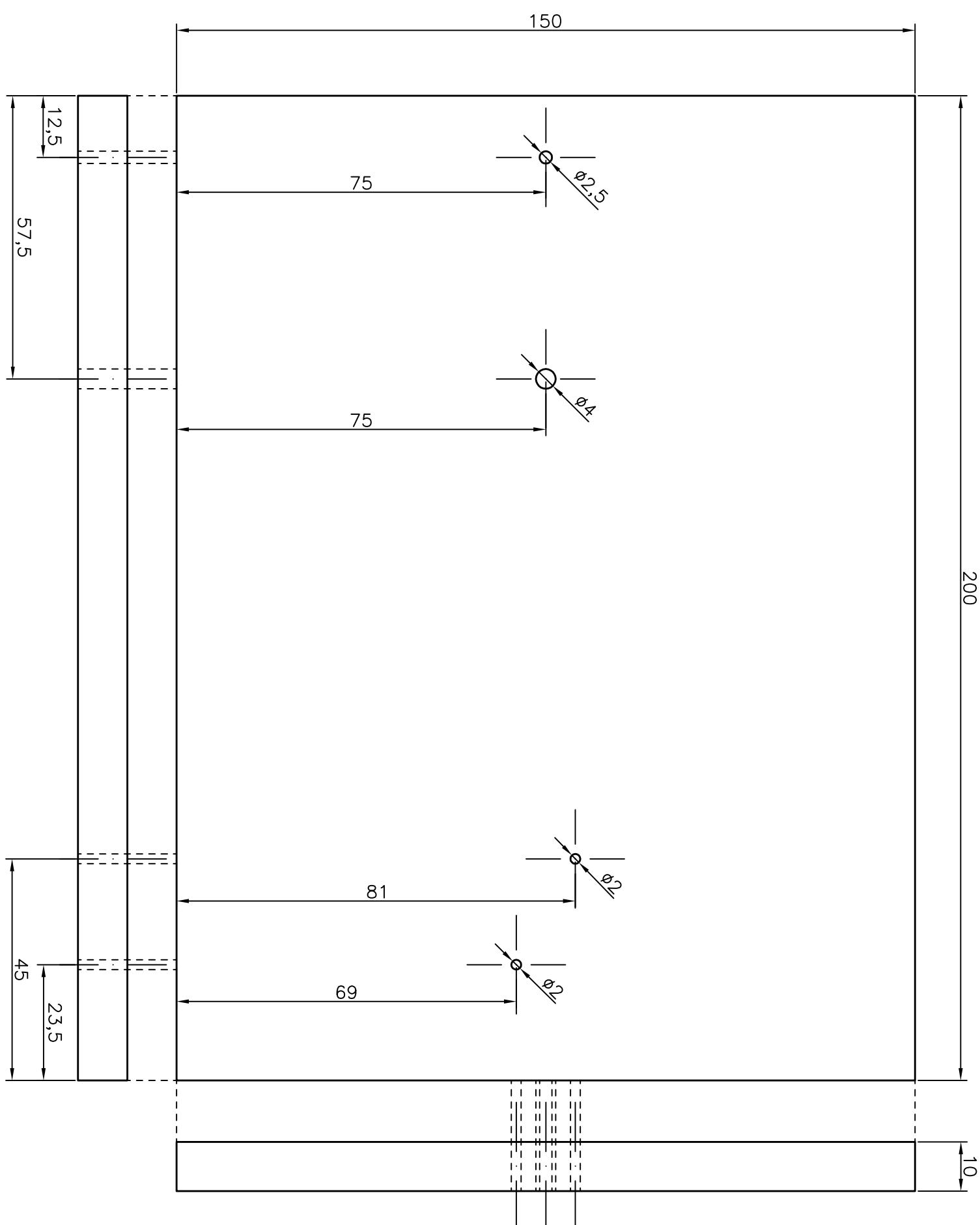
| | Fecha: | Nombre: | Firma | Escuela de Ingeniería y Arquitectura Universidad de Zaragoza |
|----------|----------|--|-------|--|
| Dibujado | 07/10/13 | J.Izquierdo | | |
| Comprob. | | | | |
| Escala: | 1:1 | Piezas metacrilato Soportes, biela y lateral mando | | Plano: 1 Hoja: 2 Especialidad: Electricidad |



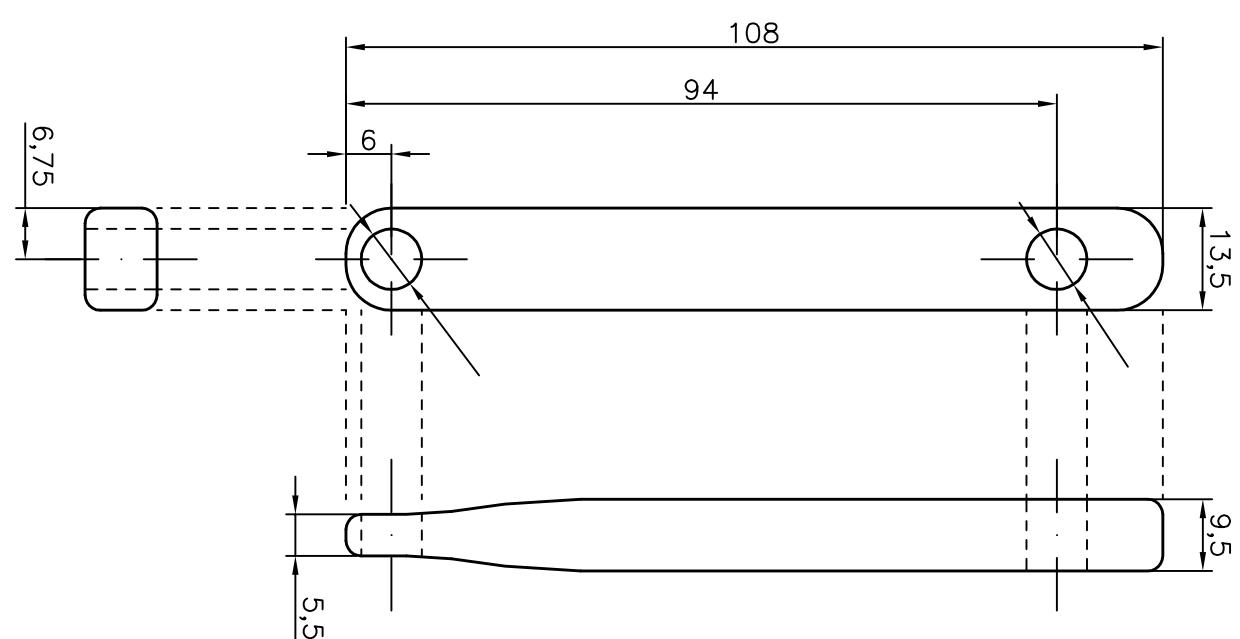
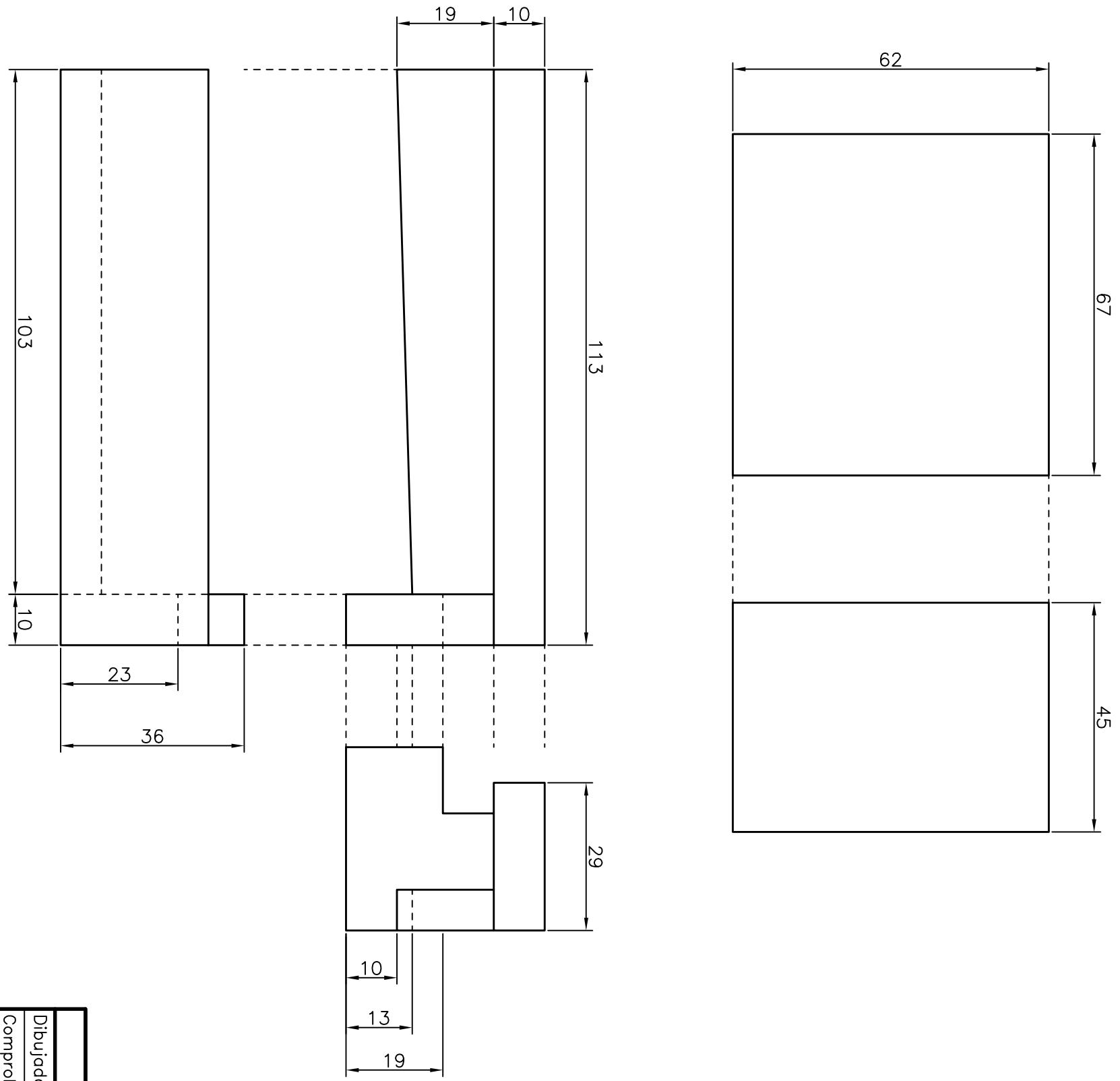
| | Fecha: | Nombre: | Firma | Escuela de Ingeniería y Arquitectura Universidad de Zaragoza |
|----------|---|-------------|-------|--|
| Dibujado | 09/10/13 | J.Izquierdo | | |
| Comprob. | | | | |
| Escala: | Piezas metacrilato | | | |
| 1:1 | base de la bobina y piezas zona de mando | | | |
| Plano: | 1 | Hoja: | 3 | Especialidad: Electricidad |



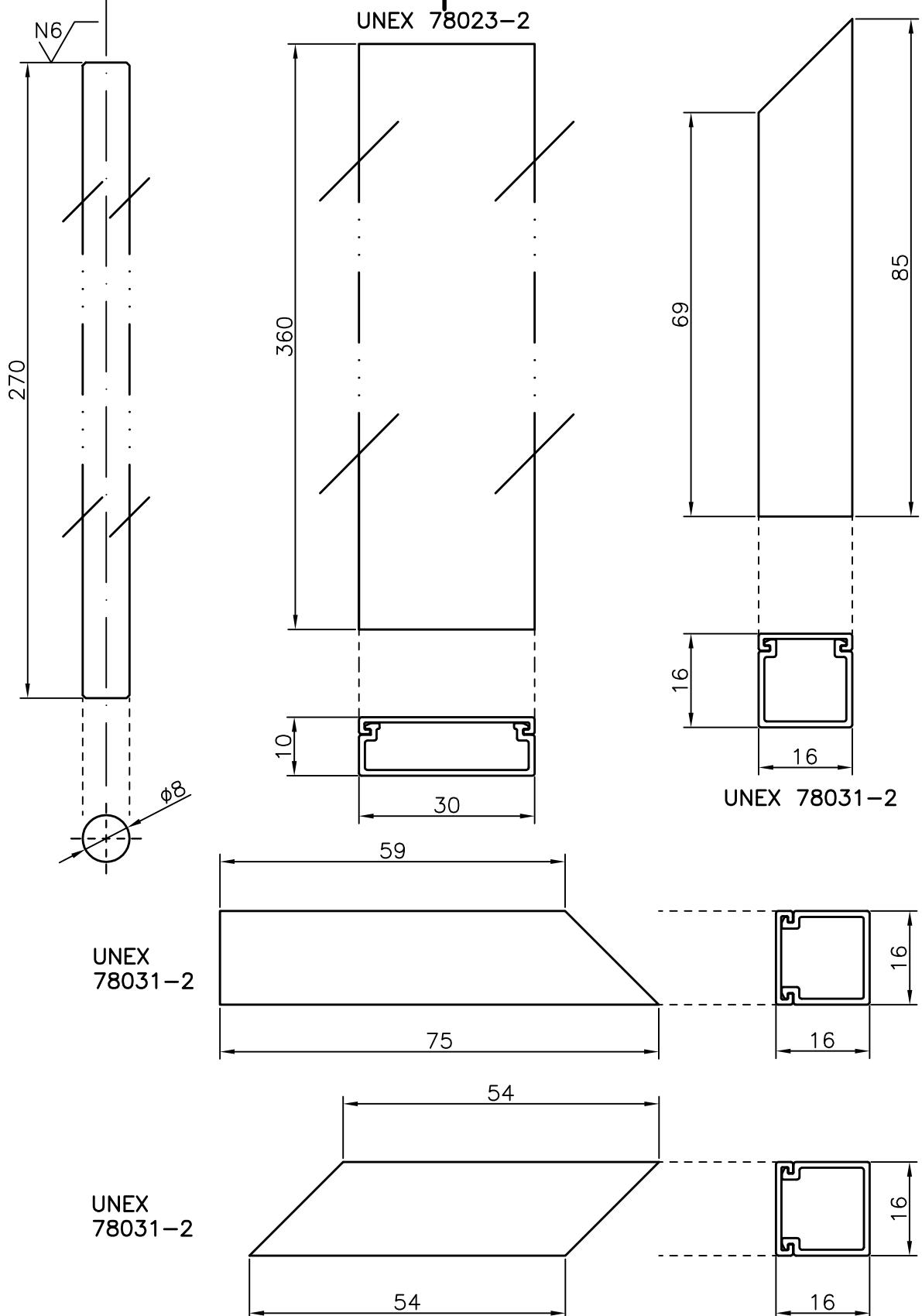
| | | | | | |
|----------|----------|--------------------|----------------|---------------|--|
| Fecha: | 09/10/13 | Nombre: | J.Izquierdo | Firma | Escuela de Ingeniería y Arquitectura Universidad de Zaragoza |
| Dibujado | | Comprob. | | | |
| Escala: | 1:1 | Piezas metacrilato | ruedas de giro | Plano: | 1 |
| | | | | Hoja: | 4 |
| | | | | Especialidad: | Electricidad |
| | | | | | |



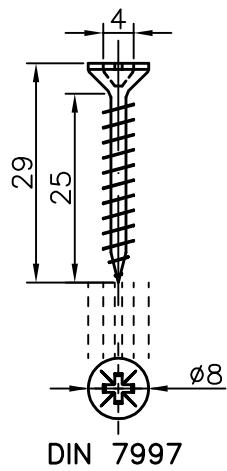
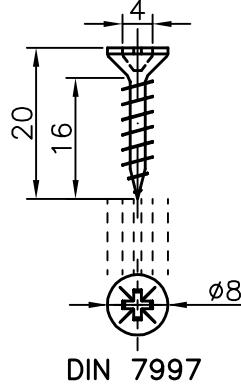
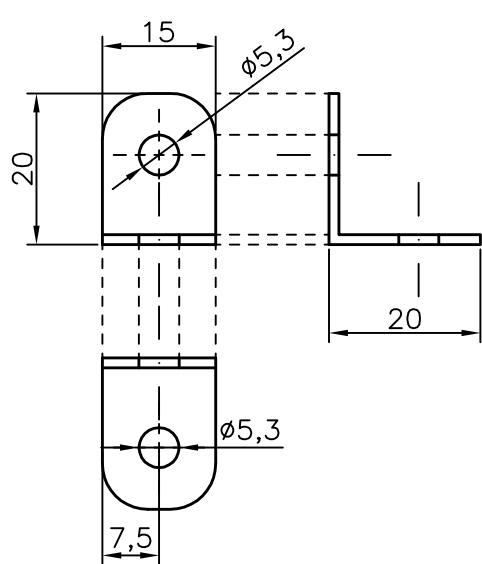
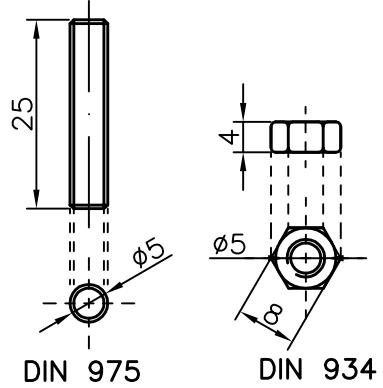
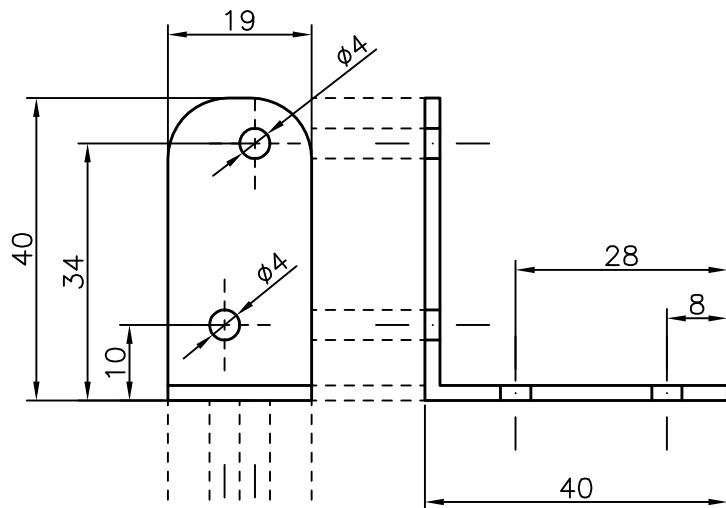
| | | | | | | |
|----------|----------|--|-------------------|--|---------------|--|
| | Fecha: | | Nombre: | | Firma | |
| Dibujado | 09/10/13 | | J.Izquierdo | | | |
| Comprob. | | | | | | |
| Escala: | 1:2 | | Piezas de madera | | | |
| | | | base del proyecto | | | |
| | | | | | Plano: 2 | |
| | | | | | Hoja: 1 | |
| | | | | | Especialidad: | |
| | | | | | Electricidad | |



| | | | | | |
|----------|----------|---|-------------|---------------|--|
| Fecha: | 09/10/13 | Nombre: | J.Izquierdo | Firma | Escuela de Ingeniería y Arquitectura Universidad de Zaragoza |
| Dibujado | | Comprob. | | | |
| Escala: | 1:1 | Piezas de madera, soportes base, biela de repuesto, protector | | Plano: | 2 |
| | | | | Hoja: | 2 |
| | | | | Especialidad: | Electricidad |

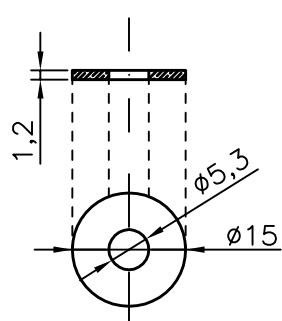
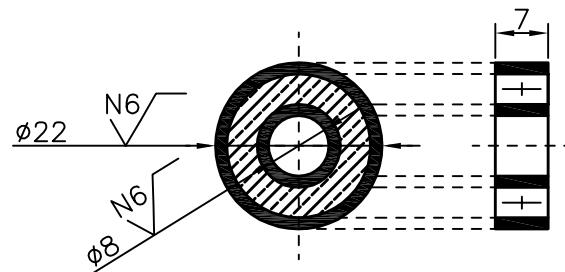
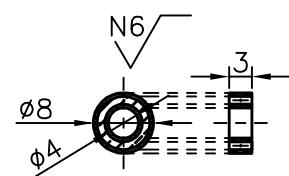
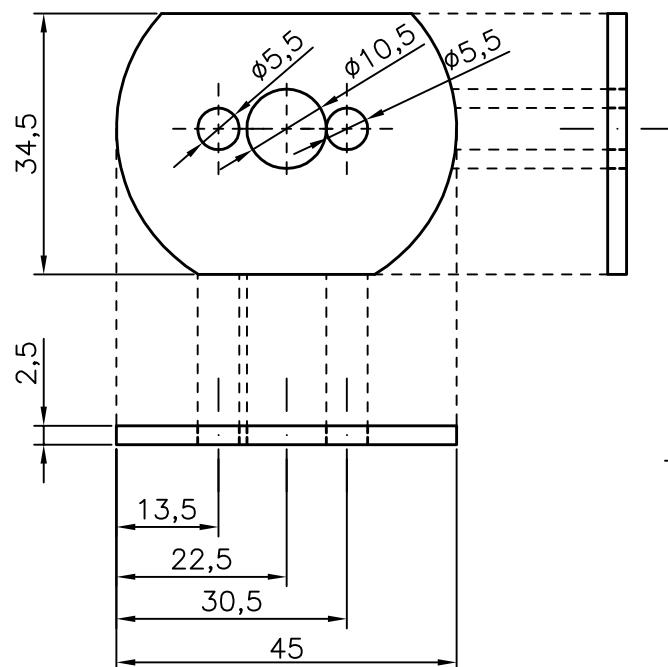


| | Fecha: | Nombre: | Firma | Escuela de Ingeniería y Arquitectura Universidad de Zaragoza |
|----------|-------------------------|-------------|-------|--|
| Dibujado | 16/10/13 | J.Izquierdo | | |
| Comprob. | | | | |
| Escala: | Piezas de ferretería | | | Plano: 3 Hoja: 1 Especialidad: Electricidad |
| 1:1 | | | | |

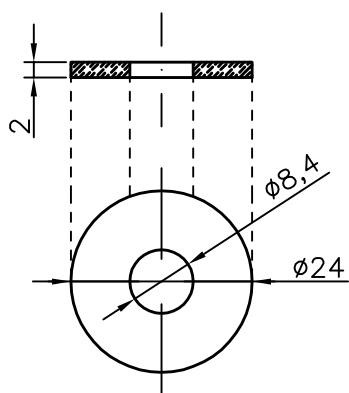


| Nombre | Nº de piezas |
|----------------|--------------|
| Ángulo 40x40 | 9 |
| Ángulo 20x20 | 17 |
| Tornillos 4x16 | 29 |
| Tornillos 4x25 | 10 |
| Varilla M5 | 9 |
| Tuerca M5 | 18 |

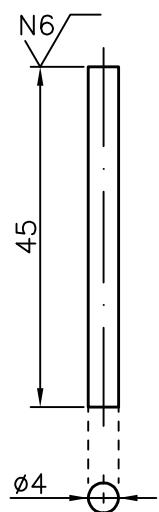
| | | | | |
|-------------|----------------------|---------------------|----------------------------|--|
| Dibujado | Fecha: 16/10/13 | Nombre: J.Izquierdo | Firma | Escuela de Ingeniería y Arquitectura Universidad de Zaragoza |
| Comprob. | | | | |
| Escala: 1:1 | Piezas de ferretería | | Plano: 3 | |
| | | | Hoja: 2 | |
| | | | Especialidad: Electricidad | |



DIN 9021

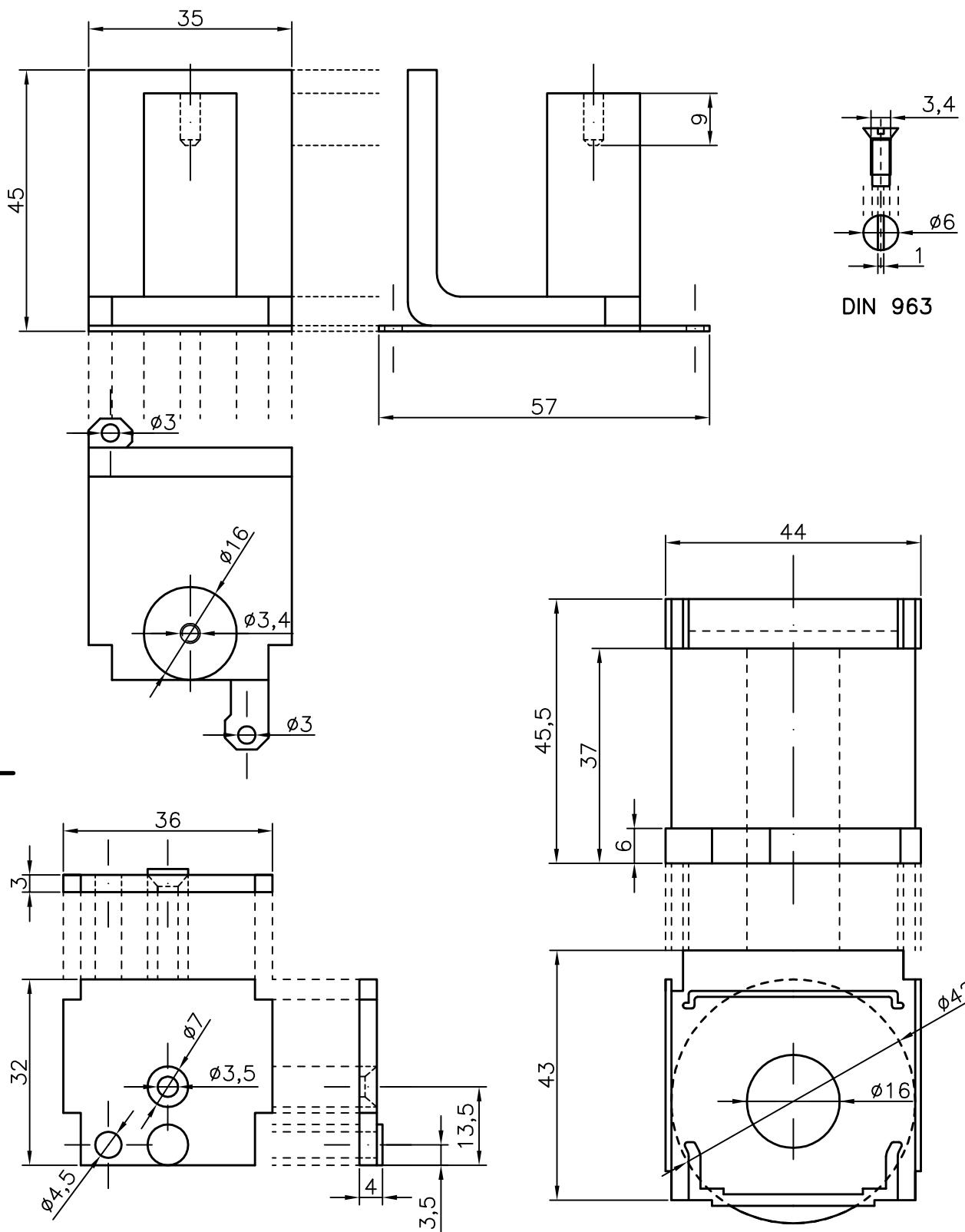


DIN 9021

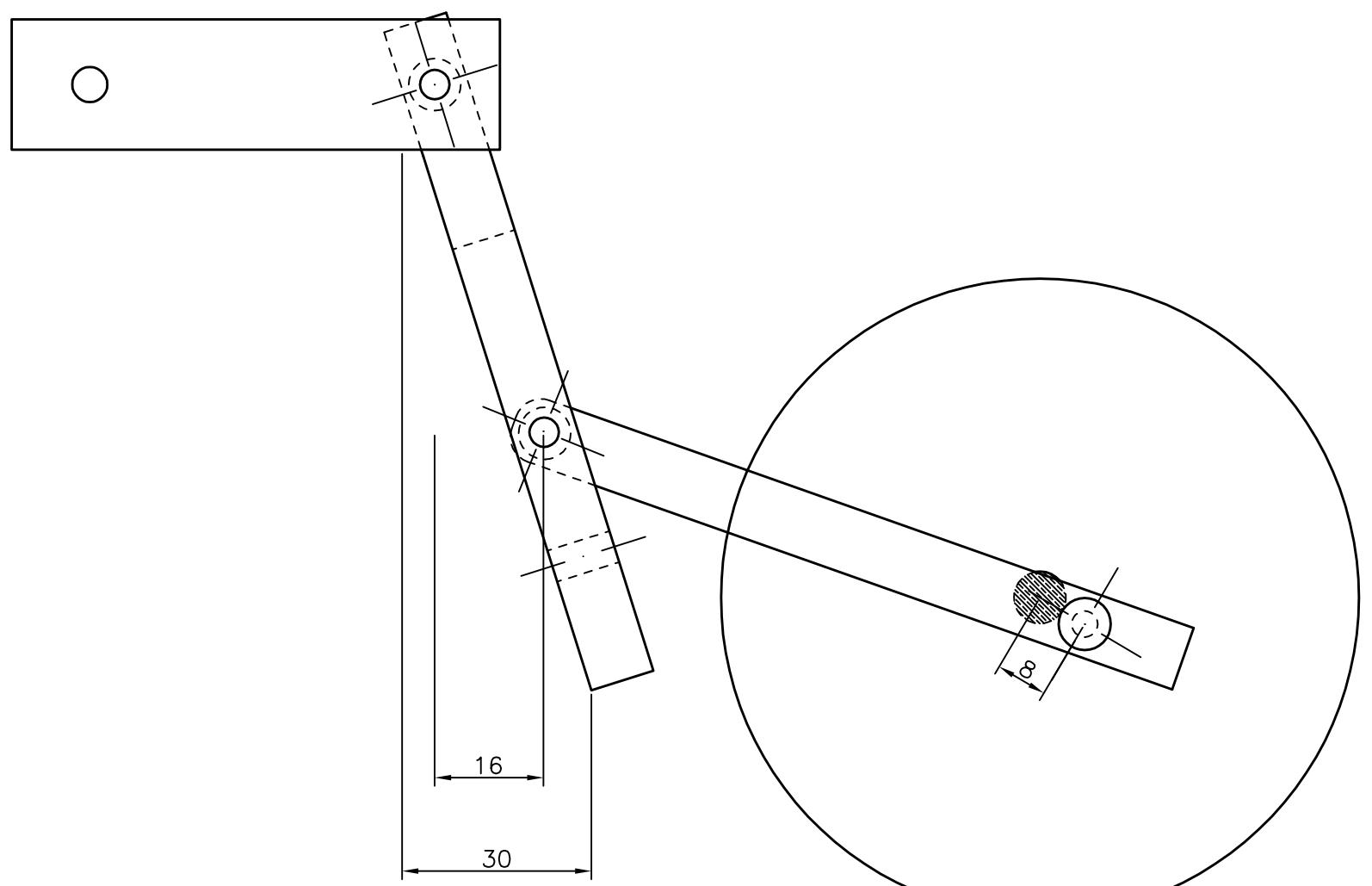
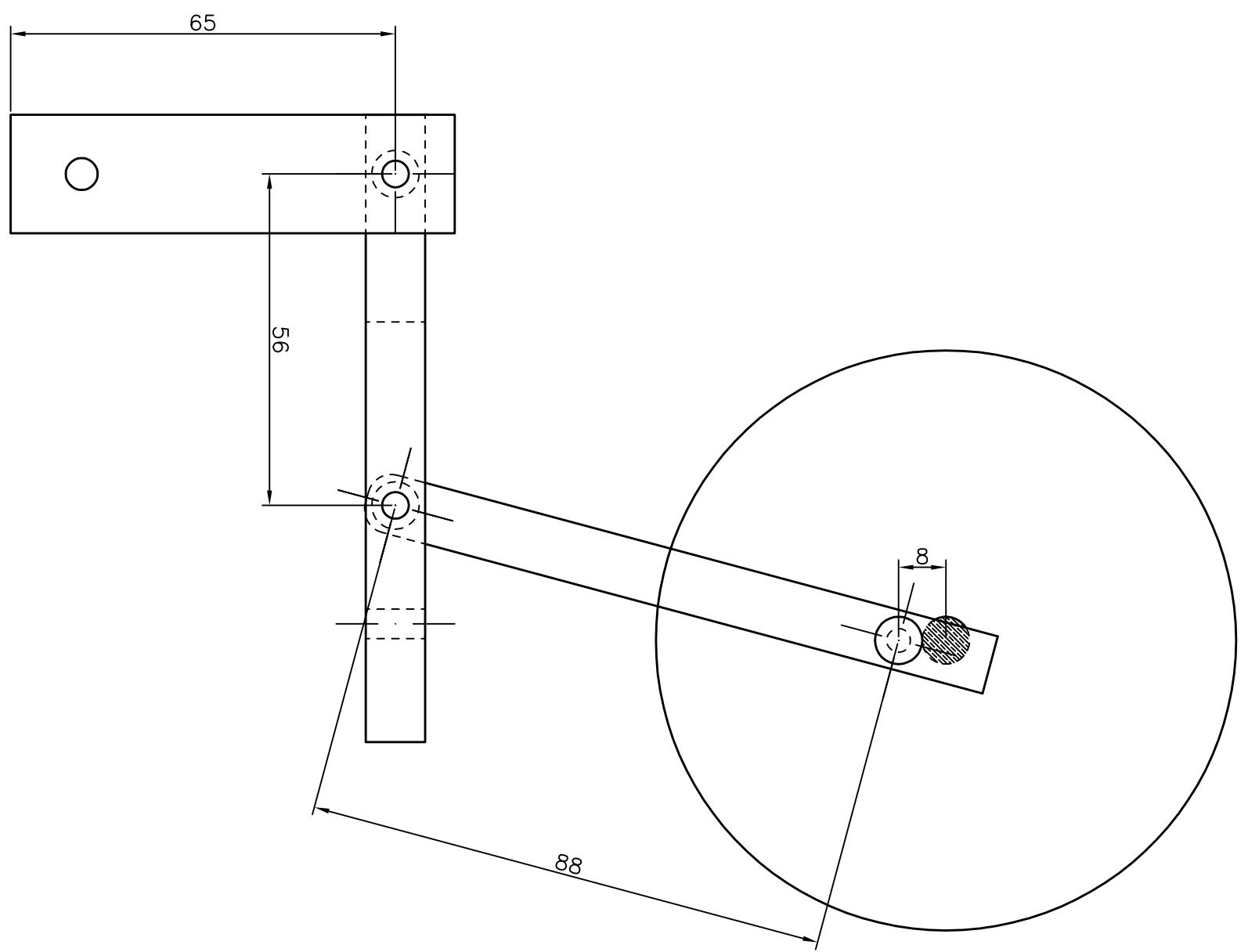


| Nombre | Nº piezas |
|----------------------------|-----------|
| Arandela plana M5 | 56 |
| Arandela plana M8 | 2 |
| Rodamiento de 8mm | 2 |
| Rodamiento de 4mm | 4 |
| Varilla de fibra de vidrio | 3 |

| | | | | |
|-------------|----------------------|---------------------|----------------------------|--|
| Dibujado | Fecha: 16/10/13 | Nombre: J.Izquierdo | Firma | Escuela de Ingeniería y Arquitectura Universidad de Zaragoza |
| Comprob. | | | | |
| Escala: 1:1 | Piezas de ferretería | | Plano: 3 | |
| | | | Hoja: 3 | |
| | | | Especialidad: Electricidad | |



| | Fecha: | Nombre: | Firma | Escuela de Ingeniería y Arquitectura Universidad de Zaragoza |
|----------|-------------------------|-------------|-------|--|
| Dibujado | 16/10/13 | J.Izquierdo | | |
| Comprob. | | | | |
| Escala: | Piezas de ferretería | | | Plano: 3 |
| 1:1 | | | | Hoja: 4 |
| | | | | Especialidad: Electricidad |



| | | | | |
|---------------|----------------|-------------|-------|--|
| | Fecha: | Nombre: | Firma | Escuela de Ingeniería y Arquitectura Universidad de Zaragoza |
| Dibujado | 23/10/13 | J.Izquierdo | | |
| Comprob. | | | | |
| Escala: | Esquema | | | |
| 1:1 | biela manivela | | | |
| Plano: | 4 | | | |
| Hoja: | 1 | | | |
| Especialidad: | Electricidad | | | |

GENERAL PURPOSE SINGLE OPERATIONAL AMPLIFIER

- LARGE INPUT VOLTAGE RANGE
- NO LATCH-UP
- HIGH GAIN
- SHORT-CIRCUIT PROTECTION
- NO FREQUENCY COMPENSATION
- REQUIRED
- SAME PIN CONFIGURATION AS THE UA709

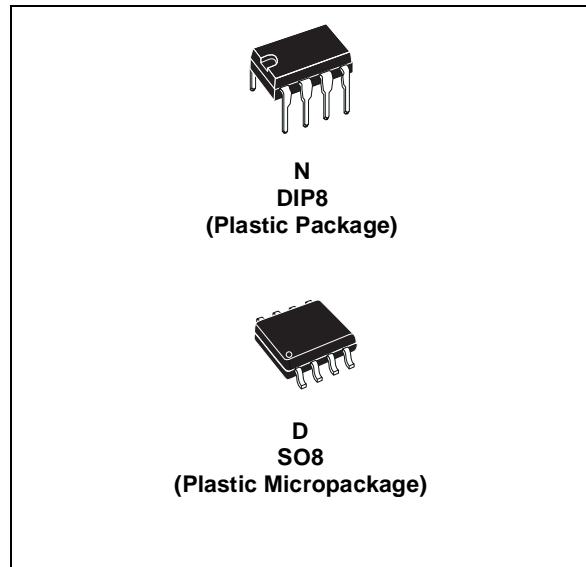
DESCRIPTION

The UA741 is a high performance monolithic operational amplifier constructed on a single silicon chip. It is intended for a wide range of analog applications.

- Summing amplifier
- Voltage follower
- Integrator
- Active filter
- Function generator

The high gain and wide range of operating voltages provide superior performances in integrator, summing amplifier and general feedback applications. The internal compensation network (6dB/octave) insures stability in closed loop circuits.

PIN CONNECTIONS (top view)



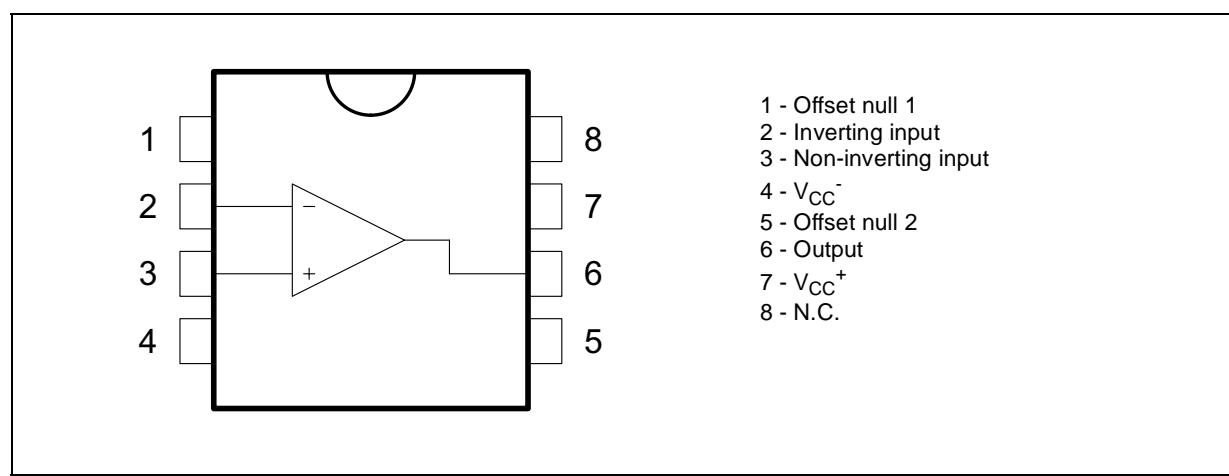
ORDER CODE

| Part Number | Temperature Range | Package | |
|-------------|-------------------|---------|---|
| | | N | D |
| UA741C | 0°C, +70°C | • | • |
| UA741I | -40°C, +105°C | • | • |
| UA741M | -55°C, +125°C | • | • |

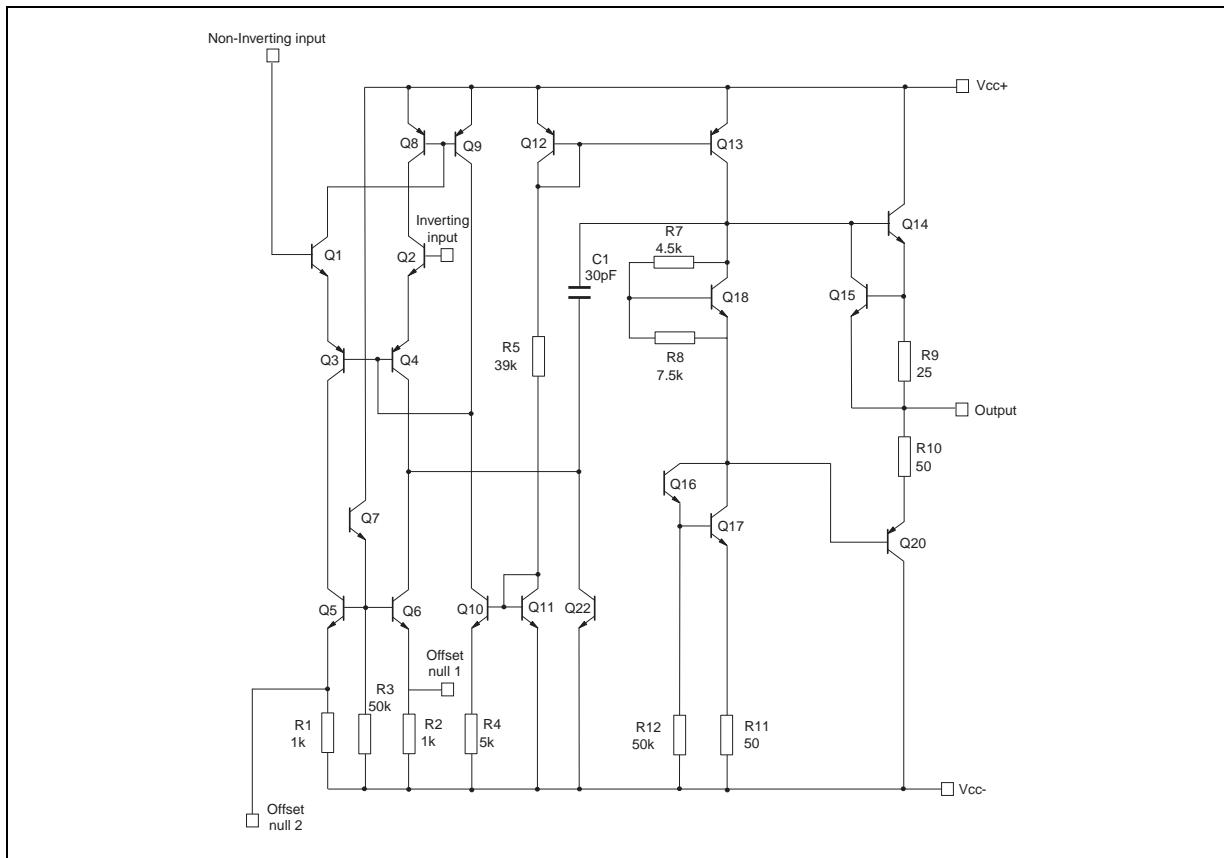
Example : UA741CN

N = Dual in Line Package (DIP)

D = Small Outline Package (SO) - also available in Tape & Reel (DT)



SCHEMATIC DIAGRAM



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

| Symbol | Parameter | UA741M | UA741I | UA741C | Unit |
|------------|--------------------------------------|-------------|-------------|----------|------|
| V_{CC} | Supply voltage | ± 22 | | | V |
| V_{id} | Differential Input Voltage | ± 30 | | | V |
| V_i | Input Voltage | ± 15 | | | V |
| P_{tot} | Power Dissipation ¹⁾ | 500 | | | mW |
| | Output Short-circuit Duration | Infinite | | | |
| T_{oper} | Operating Free-air Temperature Range | -55 to +125 | -40 to +105 | 0 to +70 | °C |
| T_{stg} | Storage Temperature Range | -65 to +150 | | | °C |

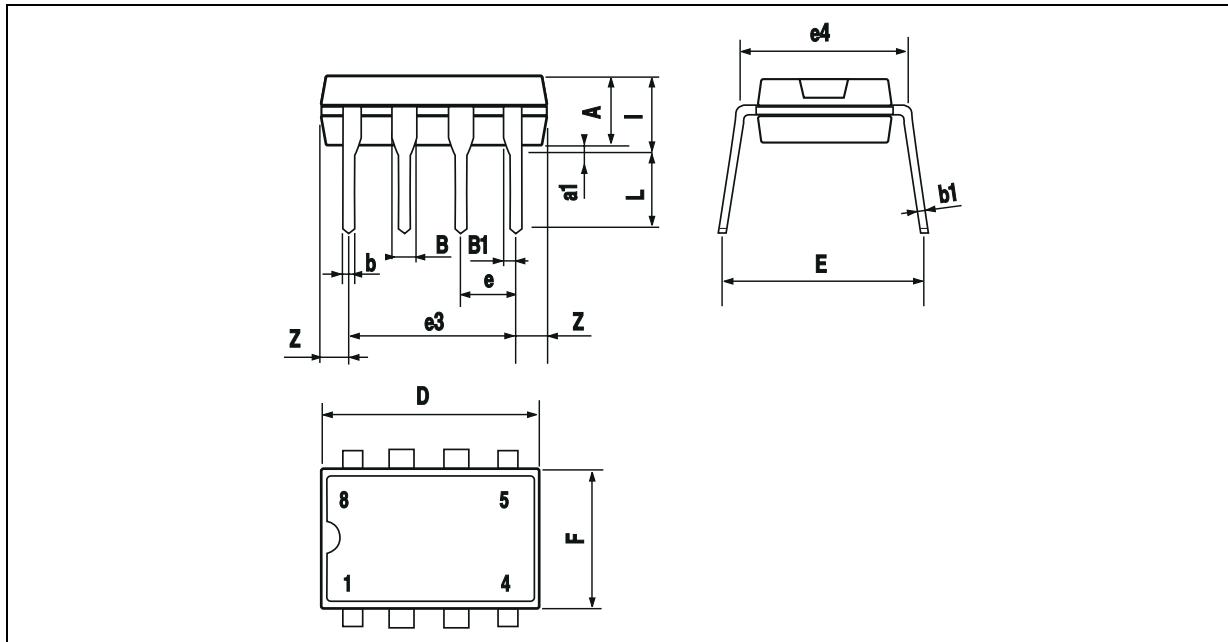
1. Power dissipation must be considered to ensure maximum junction temperature (T_j) is not exceeded.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

 $V_{CC} = \pm 15V, T_{amb} = +25^\circ C$ (unless otherwise specified)

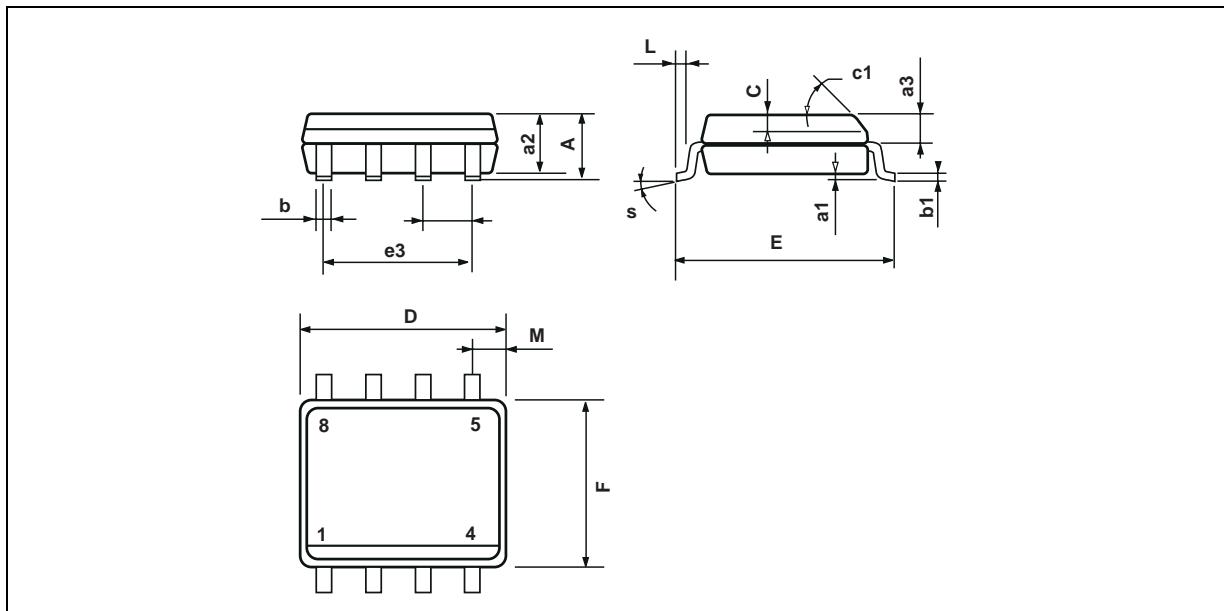
| Symbol | Parameter | Min. | Typ. | Max. | Unit |
|---------------|--|----------------------|----------|------------|------------------------|
| V_{io} | Input Offset Voltage ($R_s \leq 10k\Omega$) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ | | 1 | 5 6 | mV |
| I_{io} | Input Offset Current $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ | | 2 | 30 70 | nA |
| I_{ib} | Input Bias Current $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ | | 10 | 100 200 | nA |
| A_{vd} | Large Signal Voltage Gain ($V_o = \pm 10V, R_L = 2k\Omega$) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ | 50 25 | 200 | | V/mV |
| SVR | Supply Voltage Rejection Ratio ($R_s \leq 10k\Omega$) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ | 77 77 | 90 | | dB |
| I_{cc} | Supply Current, no load $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ | | 1.7 | 2.8 3.3 | mA |
| V_{icm} | Input Common Mode Voltage Range $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ | ± 12 ± 12 | | | V |
| CMR | Common Mode Rejection Ratio ($R_s \leq 10k\Omega$) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ | 70 70 | 90 | | dB |
| I_{os} | Output short Circuit Current | 10 | 25 | 40 | mA |
| $\pm V_{opp}$ | Output Voltage Swing $T_{amb} = +25^\circ C$ $R_L = 10k\Omega$ $R_L = 2k\Omega$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ $R_L = 10k\Omega$ $R_L = 2k\Omega$ | 12 10 12 10 | 14 13 | | V |
| SR | Slew Rate $V_i = \pm 10V, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF$, unity Gain | 0.25 | 0.5 | | V/ μ s |
| t_r | Rise Time $V_i = \pm 20mV, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF$, unity Gain | | 0.3 | | μ s |
| K_{ov} | Overshoot $V_i = 20mV, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF$, unity Gain | | 5 | | % |
| R_i | Input Resistance | 0.3 | 2 | | M Ω |
| GBP | Gain Bandwidth Product $V_i = 10mV, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF, f = 100kHz$ | 0.7 | 1 | | MHz |
| THD | Total Harmonic Distortion $f = 1kHz, A_v = 20dB, R_L = 2k\Omega, V_o = 2V_{pp}, C_L = 100pF, T_{amb} = +25^\circ C$ | | 0.06 | | % |
| e_n | Equivalent Input Noise Voltage $f = 1kHz, R_s = 100\Omega$ | | 23 | | $\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$ |
| $\emptyset m$ | Phase Margin | | 50 | | Degrees |

PACKAGE MECHANICAL DATA
8 PINS - PLASTIC DIP



| Dim. | Millimeters | | | Inches | | |
|------|-------------|------|-------|--------|-------|-------|
| | Min. | Typ. | Max. | Min. | Typ. | Max. |
| A | | 3.32 | | | 0.131 | |
| a1 | 0.51 | | | 0.020 | | |
| B | 1.15 | | 1.65 | 0.045 | | 0.065 |
| b | 0.356 | | 0.55 | 0.014 | | 0.022 |
| b1 | 0.204 | | 0.304 | 0.008 | | 0.012 |
| D | | | 10.92 | | | 0.430 |
| E | 7.95 | | 9.75 | 0.313 | | 0.384 |
| e | | 2.54 | | | 0.100 | |
| e3 | | 7.62 | | | 0.300 | |
| e4 | | 7.62 | | | 0.300 | |
| F | | | 6.6 | | | 0.260 |
| i | | | 5.08 | | | 0.200 |
| L | 3.18 | | 3.81 | 0.125 | | 0.150 |
| Z | | | 1.52 | | | 0.060 |

PACKAGE MECHANICAL DATA
8 PINS - PLASTIC MICROPACKAGE (SO)



| Dim. | Millimeters | | | Inches | | |
|------|-------------|------|------|--------|-------|-------|
| | Min. | Typ. | Max. | Min. | Typ. | Max. |
| A | | | 1.75 | | | 0.069 |
| a1 | 0.1 | | 0.25 | 0.004 | | 0.010 |
| a2 | | | 1.65 | | | 0.065 |
| a3 | 0.65 | | 0.85 | 0.026 | | 0.033 |
| b | 0.35 | | 0.48 | 0.014 | | 0.019 |
| b1 | 0.19 | | 0.25 | 0.007 | | 0.010 |
| C | 0.25 | | 0.5 | 0.010 | | 0.020 |
| c1 | 45° (typ.) | | | | | |
| D | 4.8 | | 5.0 | 0.189 | | 0.197 |
| E | 5.8 | | 6.2 | 0.228 | | 0.244 |
| e | | 1.27 | | | 0.050 | |
| e3 | | 3.81 | | | 0.150 | |
| F | 3.8 | | 4.0 | 0.150 | | 0.157 |
| L | 0.4 | | 1.27 | 0.016 | | 0.050 |
| M | | | 0.6 | | | 0.024 |
| S | 8° (max.) | | | | | |

Information furnished is believed to be accurate and reliable. However, STMicroelectronics assumes no responsibility for the consequences of use of such information nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of STMicroelectronics. Specifications mentioned in this publication are subject to change without notice. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. STMicroelectronics products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems without express written approval of STMicroelectronics.

© The ST logo is a registered trademark of STMicroelectronics

© 2001 STMicroelectronics - Printed in Italy - All Rights Reserved
STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES

Australia - Brazil - Canada - China - Finland - France - Germany - Hong Kong - India - Israel - Italy - Japan - Malaysia
Malta - Morocco - Singapore - Spain - Sweden - Switzerland - United Kingdom - United States

© <http://www.st.com>

This datasheet has been download from:

www.datasheetcatalog.com

Datasheets for electronics components.

MCC

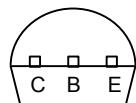
Micro Commercial Components
21201 Itasca Street Chatsworth
CA 91311
Phone: (818) 701-4933
Fax: (818) 701-4939

**BC546,B
BC547,A,B,C
BC548,A,B,C**

Features

- Through Hole Package
- 150°C Junction Temperature

Pin Configuration
Bottom View



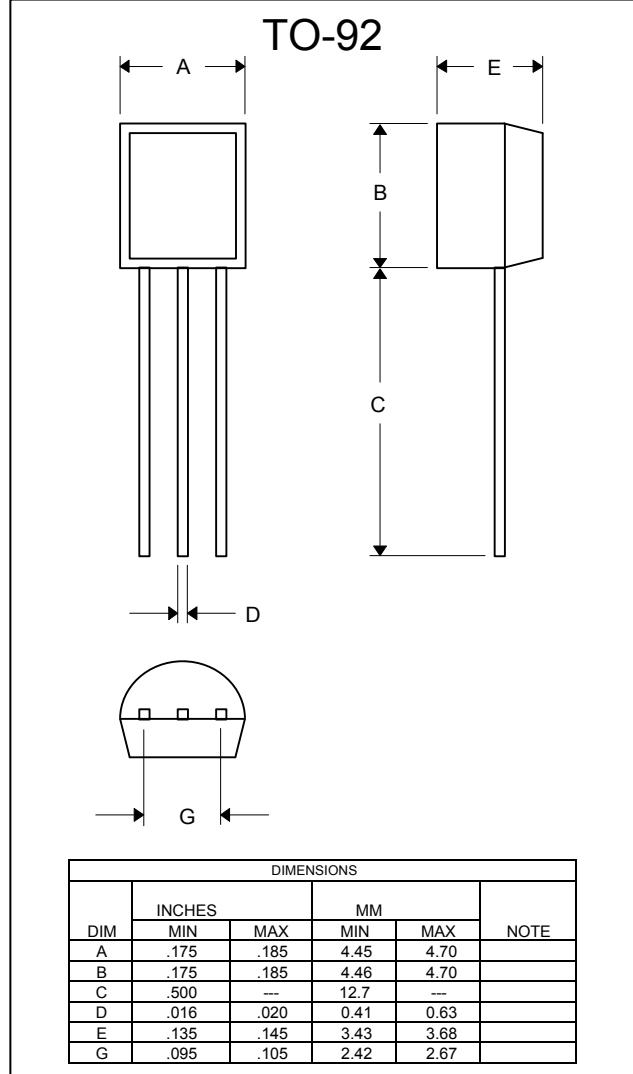
**NPN Silicon
Amplifier Transistor
625mW**

Mechanical Data

- Case: TO-92, Molded Plastic
- Polarity: indicated as above.

Maximum Ratings @ 25°C Unless Otherwise Specified

| Characteristic | Symbol | Value | Unit |
|--|-----------------|------------|----------------------------|
| Collector-Emitter Voltage | V_{CEO} | 65 | |
| | | 45 | V |
| | | 30 | |
| Collector-Base Voltage | V_{CBO} | 80 | |
| | | 50 | V |
| | | 30 | |
| Emitter-Base Voltage | V_{EBO} | 6.0 | V |
| Collector Current(DC) | I_C | 100 | mA |
| Power Dissipation@ $T_A=25^\circ\text{C}$ | P_d | 625 5.0 | mW mW/ $^\circ\text{C}$ |
| Power Dissipation@ $T_C=25^\circ\text{C}$ | P_d | 1.5 12 | W mW/ $^\circ\text{C}$ |
| Thermal Resistance, Junction to Ambient Air | $R_{\theta JA}$ | 200 | $^\circ\text{C}/\text{W}$ |
| Thermal Resistance, Junction to Case | $R_{\theta JC}$ | 83.3 | $^\circ\text{C}/\text{W}$ |
| Operating & Storage Temperature | T_i, T_{STG} | -55~150 | $^\circ\text{C}$ |



ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

| Characteristic | Symbol | Min | Typ | Max | Unit |
|---|-----------------------------|-----|-----|-----|------|
| OFF CHARACTERISTICS | | | | | |
| Collector-Emitter Breakdown Voltage ($I_C = 1.0 \text{ mA}$, $I_B = 0$) | $V_{(\text{BR})\text{CEO}}$ | 65 | — | — | V |
| BC546 | | 45 | — | — | |
| BC547 | | 30 | — | — | |
| BC548 | | — | — | — | |
| Collector-Base Breakdown Voltage ($I_C = 100 \mu\text{A}$) | $V_{(\text{BR})\text{CBO}}$ | 80 | — | — | V |
| BC546 | | 50 | — | — | |
| BC547 | | 30 | — | — | |
| BC548 | | — | — | — | |
| Emitter-Base Breakdown Voltage ($I_E = 10 \mu\text{A}$, $I_C = 0$) | $V_{(\text{BR})\text{EBO}}$ | 6.0 | — | — | V |
| BC546 | | 6.0 | — | — | |
| BC547 | | 6.0 | — | — | |
| BC548 | | 6.0 | — | — | |

ON CHARACTERISTICS

| | | | | | | |
|--|---|------------------------|--|----------------------------------|--|---|
| DC Current Gain ($I_C = 10 \mu\text{A}$, $V_{CE} = 5.0 \text{ V}$) | BC547A/548A BC546B/547B/548B BC548C | h_{FE} | — — — | 90 150 270 | — | — |
| ($I_C = 2.0 \text{ mA}$, $V_{CE} = 5.0 \text{ V}$) | BC546 BC547 BC548 BC547A/548A BC546B/547B/548B BC547C/BC548C | | 110 110 110 110 200 420 | — — — 180 290 520 | 450 800 800 220 450 800 | |
| ($I_C = 100 \text{ mA}$, $V_{CE} = 5.0 \text{ V}$) | BC547A/548A BC546B/547B/548B BC548C | | — — — | 120 180 300 | — — — | |
| Collector-Emitter Saturation Voltage ($I_C = 100 \text{ mA}$, $I_B = 5.0 \text{ mA}$) | $V_{CE(\text{sat})}$ | | — | --- | 0.3 | V |
| Base-Emitter Saturation Voltage ($I_C = 100 \text{ mA}$, $I_B = 5.0 \text{ mA}$) | $V_{BE(\text{sat})}$ | | — | — | 1.0 | V |
| Base-Emitter On Voltage ($I_C = 2.0 \text{ mA}$, $V_{CE} = 5.0 \text{ V}$) ($I_C = 10 \text{ mA}$, $V_{CE} = 5.0 \text{ V}$) | $V_{BE(\text{on})}$ | | 0.55 — | — — | 0.7 0.77 | V |

SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS

| | | | | | | |
|--|---|------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-----|
| Current-Gain — Bandwidth Product ($I_C = 10 \text{ mA}$, $V_{CE} = 5.0 \text{ V}$, $f = 100 \text{ MHz}$) | BC546 BC547 BC548 | f_T | 150 150 150 | 300 300 300 | — — — | MHz |
| Output Capacitance ($V_{CB} = 10 \text{ V}$, $I_C = 0$, $f = 1.0 \text{ MHz}$) | C_{obo} | | — | 1.7 | 4.5 | pF |
| Input Capacitance ($V_{EB} = 0.5 \text{ V}$, $I_C = 0$, $f = 1.0 \text{ MHz}$) | C_{ibo} | | — | 10 | — | pF |
| Small-Signal Current Gain ($I_C = 2.0 \text{ mA}$, $V_{CE} = 5.0 \text{ V}$, $f = 1.0 \text{ kHz}$) | BC546 BC547/548 BC547A/548A BC546B/547B/548B BC547C/548C | h_{fe} | 125 125 125 240 450 | — — 220 330 600 | 500 900 260 500 900 | — |
| Noise Figure ($I_C = 0.2 \text{ mA}$, $V_{CE} = 5.0 \text{ V}$, $R_S = 2 \text{ k}\Omega$, $f = 1.0 \text{ kHz}$, $\Delta f = 200 \text{ Hz}$) | BC546 BC547 BC548 | NF | — — — | 2.0 2.0 2.0 | 10 10 10 | dB |

BC546 thru BC548C

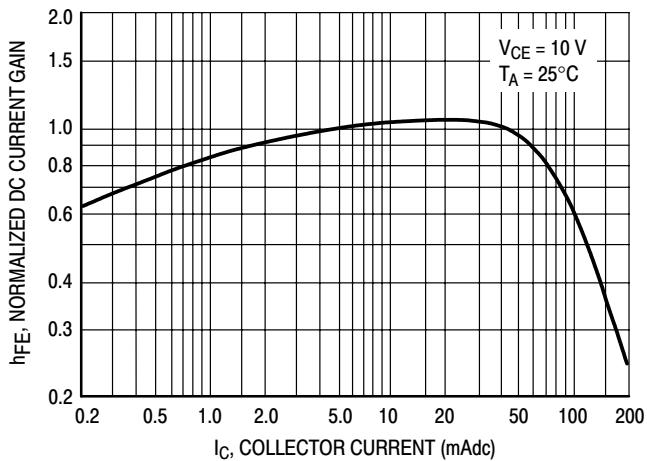


Figure 1. Normalized DC Current Gain

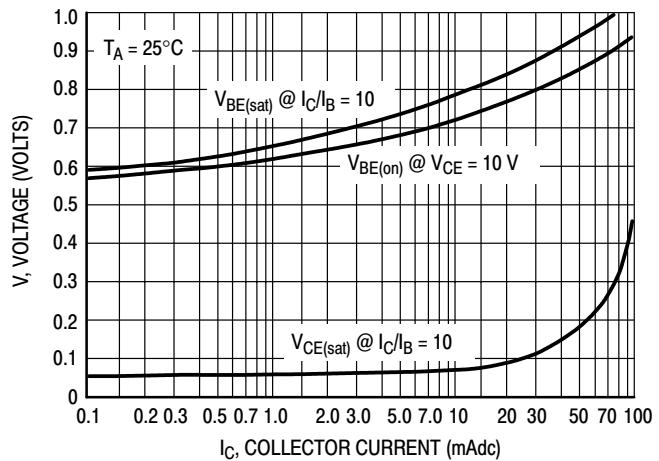


Figure 2. "Saturation" and "On" Voltages

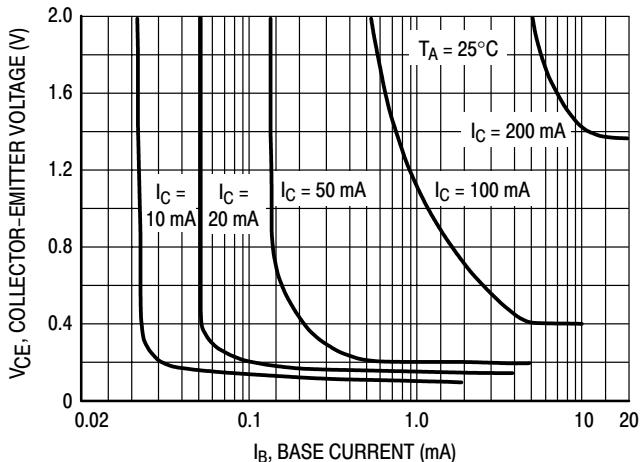


Figure 3. Collector Saturation Region

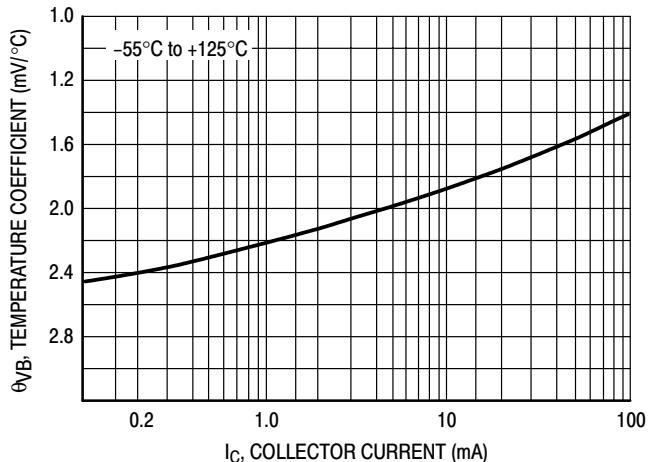


Figure 4. Base-Emitter Temperature Coefficient

BC547/BC548

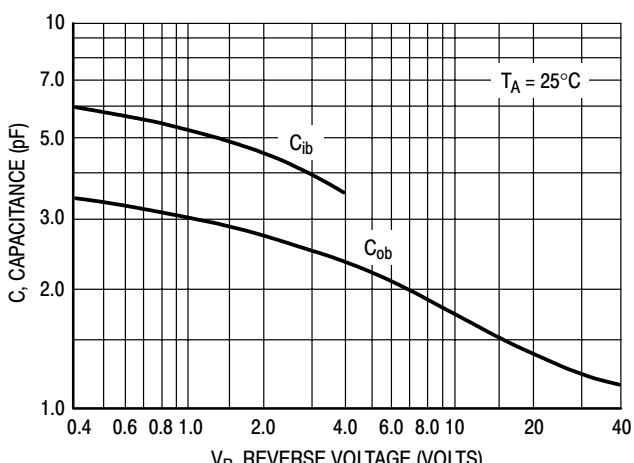


Figure 5. Capacitances

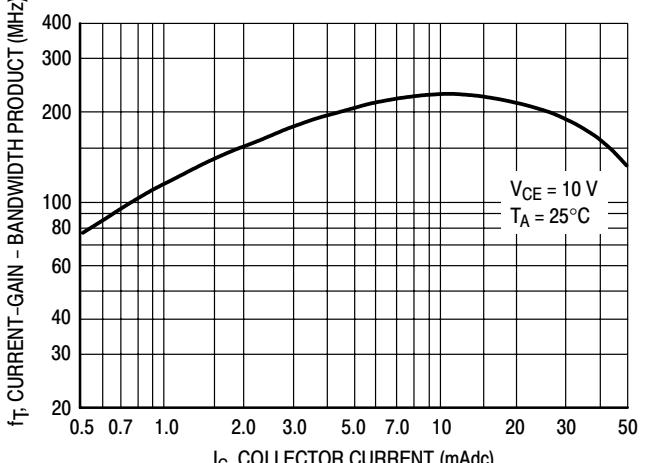


Figure 6. Current-Gain - Bandwidth Product

BC546 thru BC548C

BC547/BC548

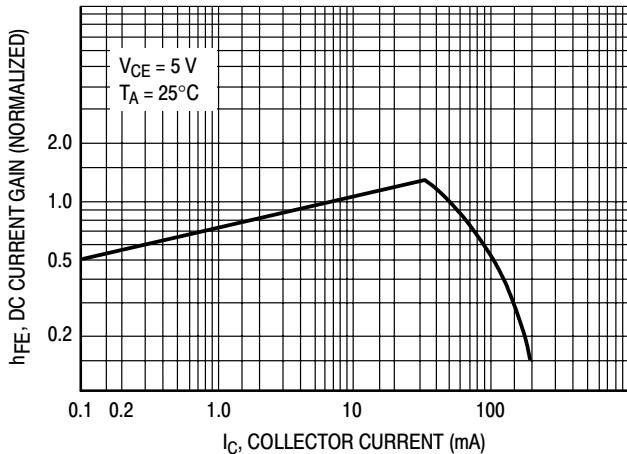


Figure 7. DC Current Gain

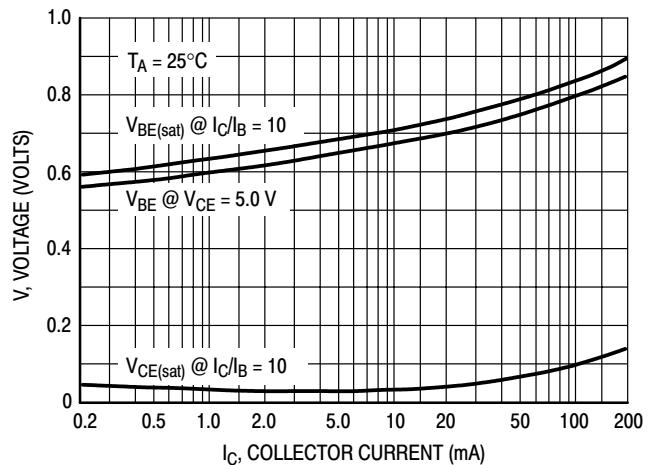


Figure 8. "On" Voltage

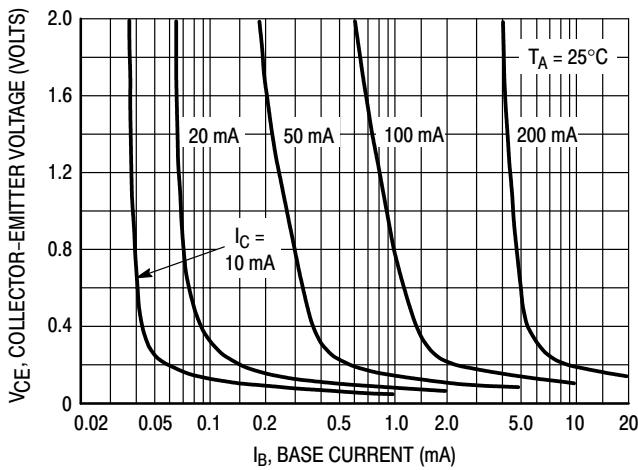


Figure 9. Collector Saturation Region

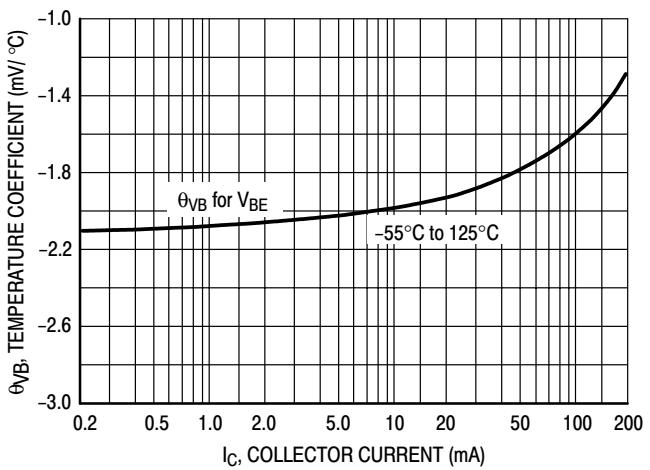


Figure 10. Base-Emitter Temperature Coefficient

BC546

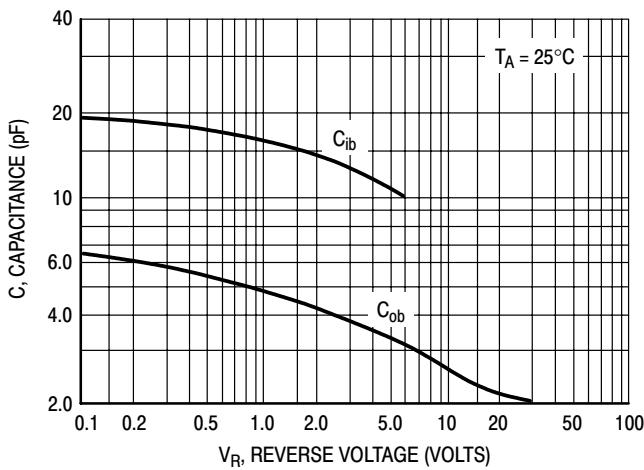


Figure 11. Capacitance

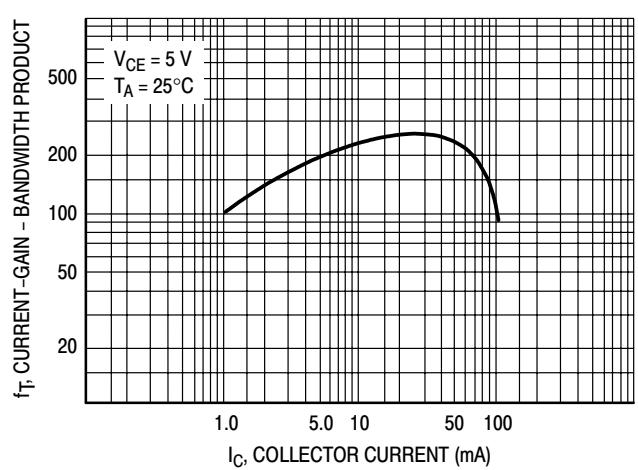


Figure 12. Current-Gain - Bandwidth Product

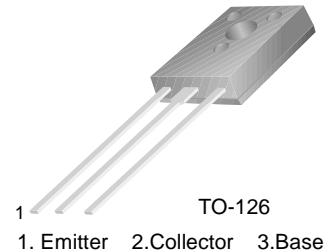
This datasheet has been download from:

www.datasheetcatalog.com

Datasheets for electronics components.

Medium Power Linear and Switching Applications

- Complement to BD135, BD137 and BD139 respectively



PNP Epitaxial Silicon Transistor

Absolute Maximum Ratings $T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

| Symbol | Parameter | Value | Units |
|-----------|--|------------|------------------|
| V_{CBO} | Collector-Base Voltage : BD136 | - 45 | V |
| | : BD138 | - 60 | V |
| | : BD140 | - 80 | V |
| V_{CEO} | Collector-Emitter Voltage : BD136 | - 45 | V |
| | : BD138 | - 60 | V |
| | : BD140 | - 80 | V |
| V_{EBO} | Emitter-Base Voltage | - 5 | V |
| I_C | Collector Current (DC) | - 1.5 | A |
| I_{CP} | Collector Current (Pulse) | - 3.0 | A |
| I_B | Base Current | - 0.5 | A |
| P_C | Collector Dissipation ($T_C=25^\circ\text{C}$) | 12.5 | W |
| P_C | Collector Dissipation ($T_a=25^\circ\text{C}$) | 1.25 | W |
| T_J | Junction Temperature | 150 | $^\circ\text{C}$ |
| T_{STG} | Storage Temperature | - 55 ~ 150 | $^\circ\text{C}$ |

Electrical Characteristics $T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

| Symbol | Parameter | Test Condition | Min. | Typ. | Max. | Units |
|-------------------------------------|--|--|----------------------|------|-------|---------------|
| $V_{CEO}(\text{sus})$ | * Collector-Emitter Sustaining Voltage : BD136 : BD138 : BD140 | $I_C = - 30\text{mA}$, $I_B = 0$ | - 45 - 60 - 80 | | | V |
| I_{CBO} | Collector Cut-off Current | $V_{CB} = - 30\text{V}$, $I_E = 0$ | | | - 0.1 | μA |
| I_{EBO} | Emitter Cut-off Current | $V_{EB} = - 5\text{V}$, $I_C = 0$ | | | - 10 | μA |
| h_{FE1} h_{FE2} h_{FE3} | * DC Current Gain | $V_{CE} = - 2\text{V}$, $I_C = - 5\text{mA}$ $V_{CE} = - 2\text{V}$, $I_C = - 0.5\text{A}$ $V_{CE} = - 2\text{V}$, $I_C = - 150\text{mA}$ | 25 25 40 | | 250 | |
| $V_{CE}(\text{sat})$ | * Collector-Emitter Saturation Voltage | $I_C = - 500\text{mA}$, $I_B = - 50\text{mA}$ | | | - 0.5 | V |
| $V_{BE}(\text{on})$ | * Base-Emitter ON Voltage | $V_{CE} = - 2\text{V}$, $I_C = - 0.5\text{A}$ | | | - 1 | V |

* Pulse Test: $PW=350\mu\text{s}$, duty Cycle=2% Pulsed

h_{FE} Classification

| | | | |
|----------------|----------|----------|-----------|
| Classification | 6 | 10 | 16 |
| h_{FE3} | 40 ~ 100 | 63 ~ 160 | 100 ~ 250 |

Typical Characteristics

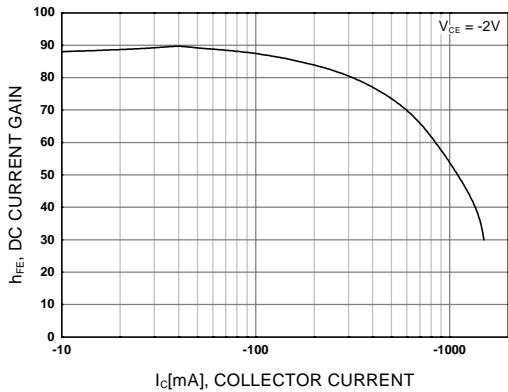


Figure 1. DC current Gain

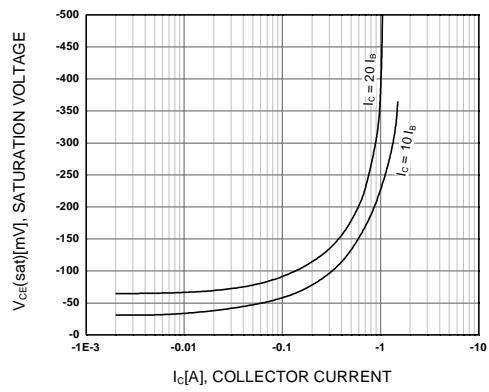


Figure 2. Collector-Emitter Saturation Voltage

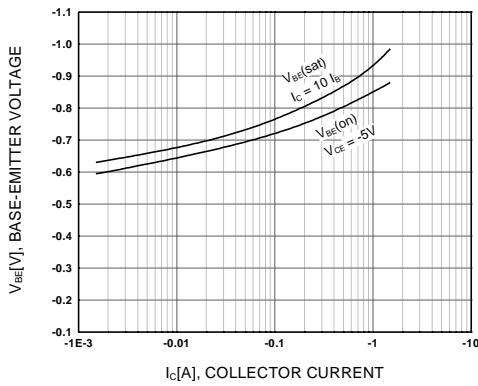


Figure 3. Base-Emitter Voltage

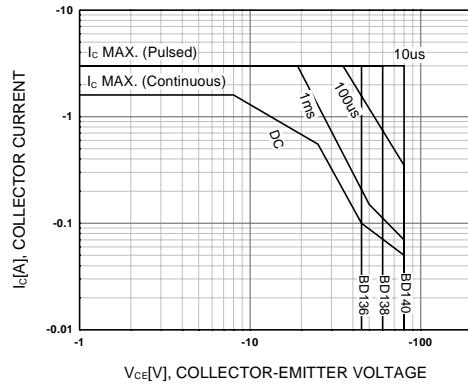


Figure 4. Safe Operating Area

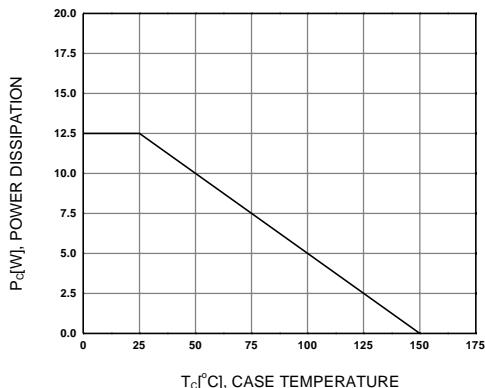
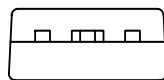
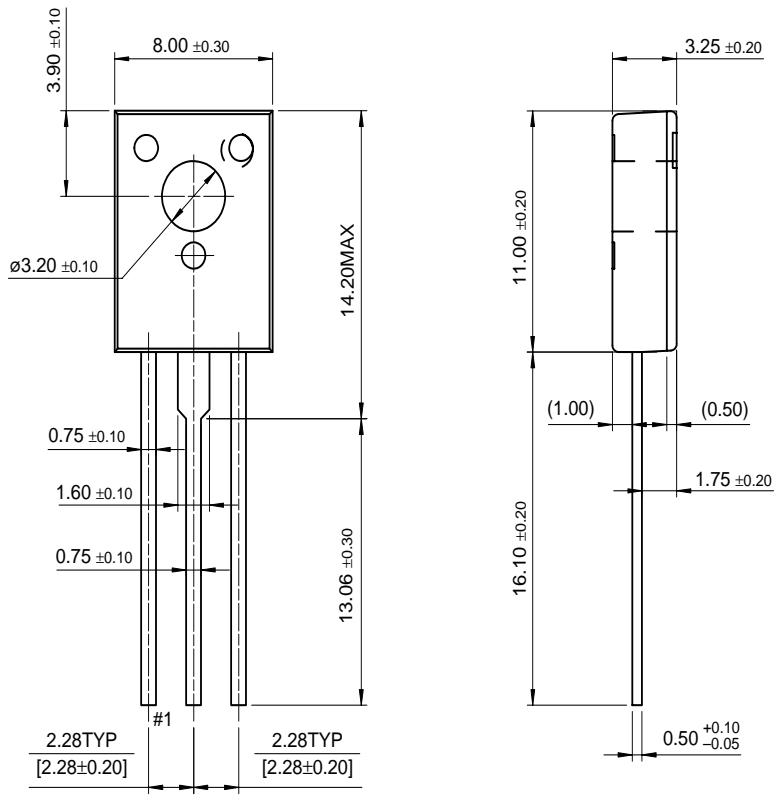


Figure 5. Power Derating

Package Demensions

TO-126



Dimensions in Millimeters

TRADEMARKS

The following are registered and unregistered trademarks Fairchild Semiconductor owns or is authorized to use and is not intended to be an exhaustive list of all such trademarks.

| | | |
|-----------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| ACE TM | HiSeC TM | SuperSOT TM -8 |
| Bottomless TM | ISOPLANAR TM | SyncFET TM |
| CoolFET TM | MICROWIRE TM | TinyLogic TM |
| CROSSVOLT TM | POP TM | UHC TM |
| E ² CMOS TM | PowerTrench [®] | VCX TM |
| FACT TM | QFET TM | |
| FACT Quiet Series TM | QS TM | |
| FAST [®] | Quiet Series TM | |
| FAST TM | SuperSOT TM -3 | |
| GTO TM | SuperSOT TM -6 | |

DISCLAIMER

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS.

LIFE SUPPORT POLICY

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR INTERNATIONAL.

As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, or (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

PRODUCT STATUS DEFINITIONS

Definition of Terms

| Datasheet Identification | Product Status | Definition |
|--------------------------|------------------------|---|
| Advance Information | Formative or In Design | This datasheet contains the design specifications for product development. Specifications may change in any manner without notice. |
| Preliminary | First Production | This datasheet contains preliminary data, and supplementary data will be published at a later date. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice in order to improve design. |
| No Identification Needed | Full Production | This datasheet contains final specifications. Fairchild Semiconductor reserves the right to make changes at any time without notice in order to improve design. |
| Obsolete | Not In Production | This datasheet contains specifications on a product that has been discontinued by Fairchild semiconductor. The datasheet is printed for reference information only. |

This datasheet has been download from:

www.datasheetcatalog.com

Datasheets for electronics components.