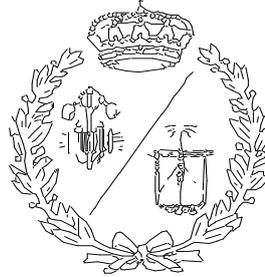


**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto / Trabajo Fin de Carrera

**DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE
GENERADOR SÍNCRONO PARA
AUTOMOCIÓN**

**(DESIGNING A PROTOTYPE OF SYNCHRONOUS
GENERATOR FOR AUTOMOTIVE)**

Para acceder al Título de

INGENIERO INDUSTRIAL

Autor: Rodrigo Díez Fernández

Mayo-16

ÍNDICE

ÍNDICE	2
INTRODUCCIÓN	5
PROBLEMÁTICA	8
ALCANCE	11
MEMORIA	12
DISEÑO DEL INDUCIDO	14
CÁLCULOS PRELIMINARES: DIÁMETROS ZONA POLAR, INDUCCIÓN Y FLUJO	15
DISEÑO DEL DEVANADO INDUCIDO	20
CONSIDERACIONES FINALES EN EL DISEÑO DEL INDUCIDO	28
DISEÑO DEL INDUCTOR	29
INDUCTOR A)	30
ARROLLAMIENTO DEL INDUCTOR	30
DISEÑO DE LOS POLOS INDUCTORES	32
FUERZA MAGNETOMOTRIZ POLAR	37
PERÍMETRO DEL NUCLEO POLAR	39
LONGITUD MEDIA ESPIRA	40
DIMENSIONADO DEL ARROLLAMIENTO	41
CONSIDERACIONES FINALES EN EL DISEÑO DEL INDUCTOR A	46
INDUCTOR B)	48
ARROLLAMIENTO DEL INDUCTOR	48
DISEÑO DEL CILINDRO INTERIOR: LONGITUD DE MEDIA ESPIRA	50
DIMENSIONADO DEL ARROLLAMIENTO	53
DISEÑO DE LOS POLOS INDUCTORES	58
DISEÑO DEL CILINDRO EXTERIOR	61
DISEÑO DE LA TAPA LATERAL DEL INDUCTOR	64
CONSIDERACIONES FINALES EN EL DISEÑO DEL INDUCTOR B	67
FLUJOS DE DISPERSIÓN	69
CONCLUSIÓN	81
JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS	84
DIMENSIONADO DEL INDUCIDO	85
JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS 1	85

JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS 2.....	89
DIMENSIONADO DEL INDUCTOR A	90
JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS 3.....	90
JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS 4.....	93
JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS 5.....	94
JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS 6.....	95
JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS 7.....	96
DIMENSIONADO DEL INDUCTOR B	98
JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS 8.....	98
JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS 9.....	100
JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS 10.....	102
JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS 11.....	104
JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS 12.....	106
PLANOS	108
PLANO 1: Desarrollo del arrollamiento en el inducido (imbricado).....	109
PLANO 2: Desarrollo del arrollamiento en el inducido (concentrado)	110
PLANO 3: Inducido	111
PLANO 4: Diseño del inductor A.....	112
PLANO 5: Cilindro interior del inductor B	113
PLANO 6: Cilindro exterior del inductor B.....	114
PLANO 7: Tapa de cierre del inductor B	115
PLANO 8: Ensamblaje del inductor B.....	116
ANEXOS.....	117
ANEXO 1: Cronograma de tareas	118
ANEXO 2: Tabla para la selección de hilo rectangular	119
ANEXO 3: Extracción de la corriente generada	120
ANEXO 4: Materiales empleados para la construcción del inducido.....	121
ANEXO 5: Propiedades físicas del cobre, resistividad.....	122
ANEXO 6: Tabla de conductores de sección circular.....	123
ANEXO 7: Material empleado en la construcción del inductor	124
BIBLIOGRAFÍA.....	126

INTRODUCCIÓN

El alternador de garras (Ilustración 1) se trata de un generador eléctrico de flujo radial, el cual transforma energía mecánica en energía eléctrica. Aplicado a la automoción es un dispositivo que se encarga de suministrar tanto energía para todos los equipos eléctricos del coche (centralita, motores eléctricos de ventanillas, iluminación, dispositivos multimedia...), así como de alimentar la batería del vehículo y mantenerla cargada.

El alternador de un vehículo es accionado mediante la energía mecánica que genera un motor de combustión interna. Esto se hace mediante la conexión del alternador y del motor, usualmente, mediante correas. El régimen de giro del alternador es variable por lo que también lo es el del alternador, estando en el entorno de las 2000 rpm a las 12000 rpm.

En lo que respecta al funcionamiento interno del alternador tradicional, tenemos que está principalmente formado por un rotor, que coincide con el inductor, así como por un estator que será el inducido.

El inducido o estator es donde se encuentran unos cuantos pares de polos distribuidos de modo alterno y, en este caso, formados por un bobinado de tambor en un núcleo de chapas magnéticas de acero al silicio.

El rotor consta de dos piezas simétricas y enfrentadas. Cada una de estas piezas tiene la forma de un disco en cuya periferia salen en dirección axial varios polos de forma triangular (forma de "garra"). Este al girar genera un campo magnético variable en el tiempo, que en el estator se ve reflejado en forma de corriente alterna. Posteriormente esta corriente es rectificadora para su uso en el vehículo, mediante un puente de diodos.

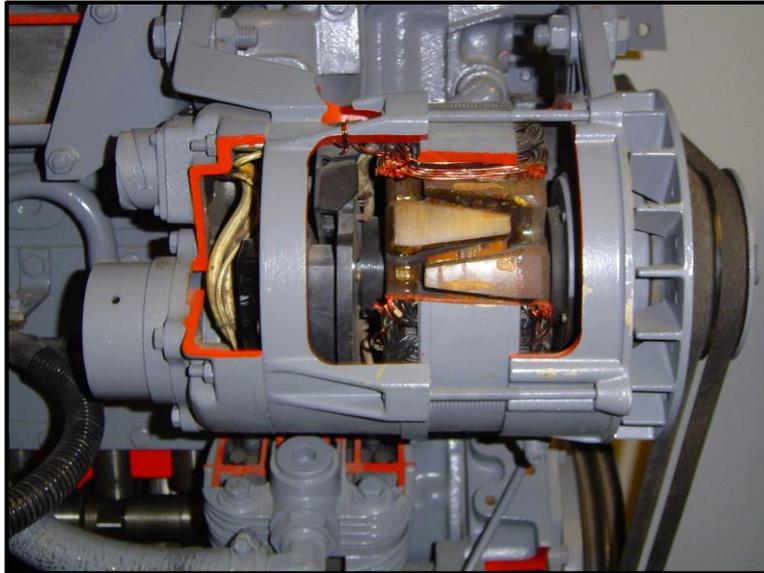


Ilustración 1 Alternador de garras

Fuente: [Wikimedia Commons](#)

Además, el puente de diodos cumple otra función muy importante, que es impedir que la batería del vehículo se descargue.

Desde la invención del alternador y su uso en vehículos, este ha ido evolucionando con el tiempo, habiendo alcanzado ya hace años a su máximo desarrollo. Pese a ello, este aun deja mucho que desear debido a las pérdidas que presenta. Estas pérdidas principalmente son:

- Rectificador de diodos
- Hierro del estator
- Arrollamientos de cobre del estator
- Hierro del rotor
- Arrollamientos de cobre del estator
- Circuitería de regulación
- Polos de garra
- Ventiladores
- Rodamientos
- Anillos colectores

Estas pérdidas se traducen, en una mayor energía mecánica aplicada para la producción de energía, lo que repercute directamente en el consumo de los vehículos. Dada la tendencia actual hacia la reducción de consumos y la optimización de los recursos disponibles, es necesario reducir estas pérdidas, o en definitiva, diseñar un nuevo sistema de producción de energía. Para este fin habrá que analizar cuál de los problemas anteriormente enumerados son factibles de reducir o eliminar y que tecnología disponible podemos aplicar para ello.

La máquina de flujo axial, también llamada de tipo disco, es una alternativa atractiva frente a la máquina común de flujo radial debido a que presenta una construcción, en principio, más compacta, y una densidad de potencia bastante alta. Por su forma de disco, pueden albergar un gran número de polos y son especialmente indicados para aplicaciones de generación de energía para pequeñas y medianas potencias, véase, turbinas eólicas, automoción... La máquina de flujo axial puede ser diseñada con un único entrehierro o con múltiples, con armaduras ranuradas, sin ranurar e incluso sin hierro.

Este tipo de máquina no es nueva, ya que en 1831 se presenta un patente registrada como M.Faraday's disc, sin embargo, la pronta aparición de la máquina de flujo radial y su pronto desarrollo tras la patente de T. Davenport, hace que la máquina de flujo axial quede rápidamente desechada. Además, la máquina de flujo axial, presentaba una serie de problemas, para los que con la tecnología de la época no había solución. Estos problemas eran:

- Fuerzas de atracción axial muy altas entre rotor y estator.
- Dificultades de fabricación como el corte de ranurados en los núcleos laminados.
- Altos costes de manufacturación.
- Dificultades en el ensamblaje y en el mantenimiento de un entrehierro uniforme.

Superados todos estos problemas, y haciendo uso de las nuevas tecnologías de fabricación, este tipo de máquina resulta viable.

PROBLEMÁTICA

La principal problemática que presentan los alternadores de garras son las pérdidas de energía que se traducen en mayores consumos de combustible y menor eficiencia de los vehículos. A continuación, se presenta un gráfico real en el cual se muestran las pérdidas principales de un alternador, así como la potencia disipada.

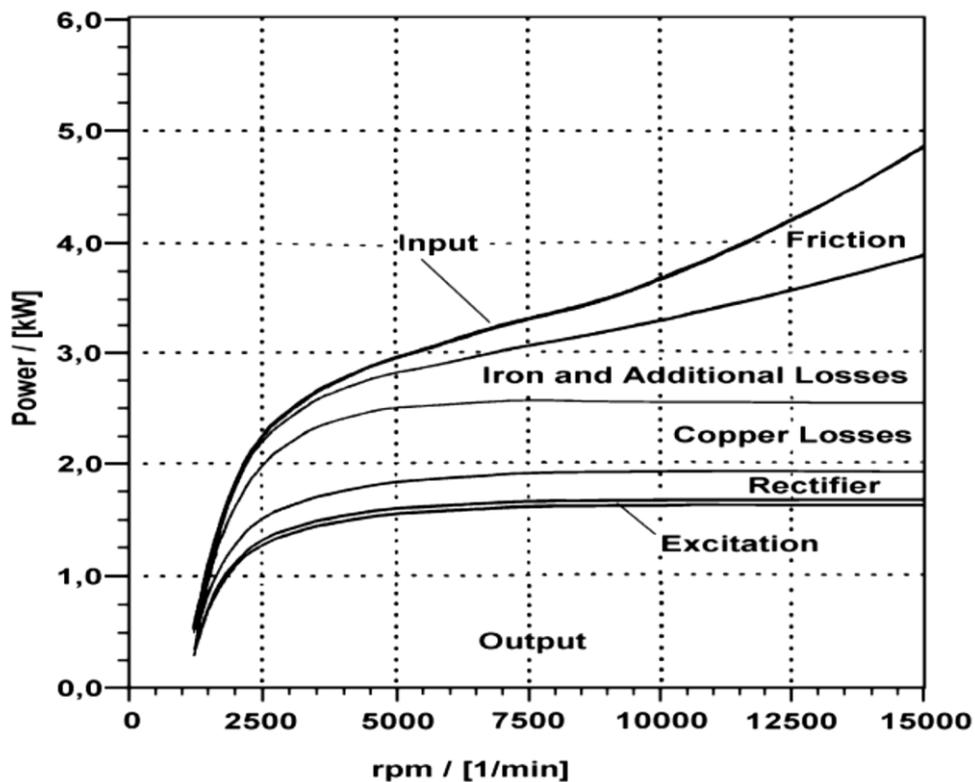


Ilustración 2 Pérdidas en alternador de garras frente a su velocidad de giro

Fuente: ROBERT BOSCH GMBH 2014

El gráfico (Ilustración 2) representa las pérdidas originadas en el alternador, subdivididas por clase, frente al régimen de giro del mismo. Como podemos observar hay unas que son más o menos constantes frente a las revoluciones

de la máquina, mientras que otras son variables. A continuación describiré brevemente las pérdidas del gráfico:

- Pérdidas en la excitación: crecientes hasta las 7500 rpm y luego constantes. Las pérdidas de excitación representan aproximadamente un 27% de las pérdidas totales. Para el funcionamiento de este tipo de máquinas es necesario la formación de electroimanes mediante bobinados de cobre. Las pérdidas en la excitación son debidas a la resistencia de estos bobinados al pasar la corriente por ellos. Esta corriente suele oscilar entre valores del 0,5% al 5% del valor nominal. En este tipo de máquinas las pérdidas de este tipo son inevitables. Pueden ser reducidas mediante el uso de secciones de cobre más amplias.
- Pérdidas en la rectificación: al igual que el anterior, su valor se estabiliza a partir de las 7500 rpm. Representan aproximadamente el 8,6% de las pérdidas totales. Estas pérdidas son originadas en el dispositivo MOSFET encargado de realizar la rectificación.
- Pérdidas en el cobre: con valor más o menos estable a partir de las 7500 rpm. Representa aproximadamente un 13% de las pérdidas totales. Estas pérdidas son originadas por la resistencia que ofrece el devanado inducido. Se puede atenuar mediante cambios de sección, hasta el límite constructivo posible, o mediante el uso de superconductores (actualmente no viable).
- Pérdidas en el hierro: variables con la velocidad y de carácter creciente. Para un régimen de trabajo de 15000 rpm estas pérdidas representan el 30% de las pérdidas totales. Sin duda se trata de las pérdidas que mayor peso tiene en este tipo de máquinas. Estas pérdidas se deben principalmente a dos causas:
 1. Corrientes de Foucault: producidas al someter al núcleo magnético del inducido a un campo magnético variable que induce f.e.m.s sobre él (Ley de Faraday). Este núcleo magnético es conductor y, en consecuencia, circularán corrientes por su interior, las cuáles darán lugar a una disipación de energía por efecto Joule.

2. Histéresis: El fenómeno de la histéresis magnética en el material ferromagnético que forma el núcleo del inducido hace que cuando se ve sometido a un campo magnético variable se produzcan unas pérdidas de energía.

Una forma de mejorar este tipo de situaciones, es eliminar el hierro, lo que daría lugar a entrehierros más grandes.

- Pérdidas por fricción: variables con la velocidad y de carácter creciente. Para un régimen de trabajo de 15000 rpm estas pérdidas representan aproximadamente el 21,4% de las pérdidas totales. Son originadas principalmente por fricciones en cojinetes y escobillas.

Lo que se quiere plantear en este proyecto, es una mejora respecto a las pérdidas de tipo magnético, es decir, principalmente las pérdidas en el hierro. Como se ha expuesto anteriormente, el margen de mejora en la máquina tradicional es muy limitado. Es por eso que debemos plantear un nuevo tipo de máquina y empezar su diseño desde cero. El tipo de máquina escogido para este fin, será una máquina de flujo axial, principalmente por la posibilidad que nos presenta al poder ser construidas con un inducido sin hierro, lo cual solucionaría nuestros problemas de pérdidas de tipo magnético. Procuraremos que esta máquina sea construida sin imanes permanentes principalmente por dos razones:

- Los imanes necesarios para la construcción de este tipo de máquinas han de ser de altas prestaciones, lo que exige imanes de tierras raras como por ejemplo de neodimio. Estos imanes presentan un alto coste y la mayoría de su producción está en china, que tiene una política de no exportar los imanes sino las máquinas que ella fabrica con ellos.
- Los imanes permanentes no se pueden regular mediante la excitación, por lo que para una máquina que va a trabajar a regímenes de giro variables, no resultan la mejor alternativa.

Por estas dos razones en este diseño el campo magnético inductor se genera mediante bobinado con hilo de cobre.

ALCANCE

Después de lo anteriormente expuesto hay que marcarse unas metas claras que van a caracterizar el desarrollo del proyecto.

La meta va a ser el desarrollo de una máquina eléctrica que sea capaz de suplir al actual alternador de garras. Esta máquina deberá bajar las pérdidas que actualmente tenemos, aumentando el rendimiento de la máquina. Todo esto queremos hacerlo mediante un diseño lo más sencillo posible, con geometrías básicas y materiales estándar que puedan encontrarse en el mercado. Esto implica el no uso de materiales especiales como pueden ser los metales de tierras raras (imanes permanentes).

Las prestaciones que brinde la nueva máquina deberán lo más similares posibles a las que daba la máquina antigua y siempre respetando que sea un modelo compacto de igual o menores dimensiones que el actual alternador de garras.

Debido a la falta de medios, como por ejemplo, el uso de programas de elementos finitos, el proceso de cálculo deberá ser simple, a la par que fiable en la medida de lo posible. Se procurará emplear fórmulas conocidas en el diseño de máquinas, adaptadas a la geometría y características de la máquina de flujo axial.

Es por tanto que se llevará a cabo un diseño eléctrico que derivará en uno mecánico. El análisis térmico quedará prácticamente obviado debido a la complejidad que lleva un estudio de este tipo y de carecer de las herramientas necesarias (formación y software de cálculo de elementos finitos)

Todos los hitos hasta llegar al diseño final quedarán perfectamente definidos por el cronograma del **anexo 1**.

La conclusión del diseño será seguida por un análisis de los resultados obtenido en el cual se expondrá la viabilidad o no del proyecto y el por qué.

MEMORIA

Superados los problemas de concepto y establecida la meta básica, que en este caso será reducir las pérdidas partiendo de un diseño nuevo, pasamos a la fase creativa del proyecto, en la cual tratamos de imaginar el aspecto físico de la máquina, siempre respetando aspectos como los mecánicos, eléctrico o térmicos. Tras varias sesiones de análisis nos quedamos principalmente con dos propuestas:

1. Como primera alternativa (Ilustración 3) planteamos una máquina de corte tradicional. El concepto, aunque quizás un poco difícil de imaginar, se basa en cortar axialmente una máquina síncrona clásica de polos salientes, volviéndola a enrollar de forma longitudinal y duplicar su inductor, de forma que esté a ambos lados del inducido. De esta forma, lo que en principio era una máquina de flujo radial, ahora se ha convertido en una de flujo axial. En lo que refiere al aspecto físico la maquina ésta formada por la parte inductora que son dos estator con 12 polos cada uno, alternando norte-sur, que se encuentran enfrentados. Entre los dos estator encontramos un rotor con forma de disco y solidario al eje, que trabaja como inducido.

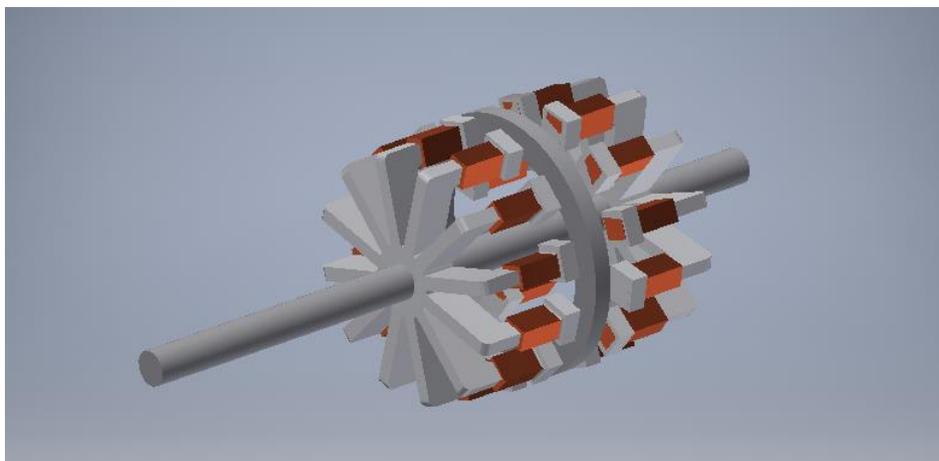


Ilustración 3 Diseño conceptual 1

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

2. Como segunda alternativa (Ilustración 4) planteamos una maquina más innovadora. Tendríamos por un lado un estator que sería el inductor, compuesto por 12 polos alternados, pero estando unidos los 6 nortes a un extremo de la pieza, y los 6 sur al otro; por otro lado, tendríamos el rotor que sería el inducido, que se encontraría separado del estator por un entrehierro. El bobinado para la excitación se encontraría en el estator concentrado. Para cerrar el circuito magnético tendríamos una chapa de material magnético detrás del inducido.

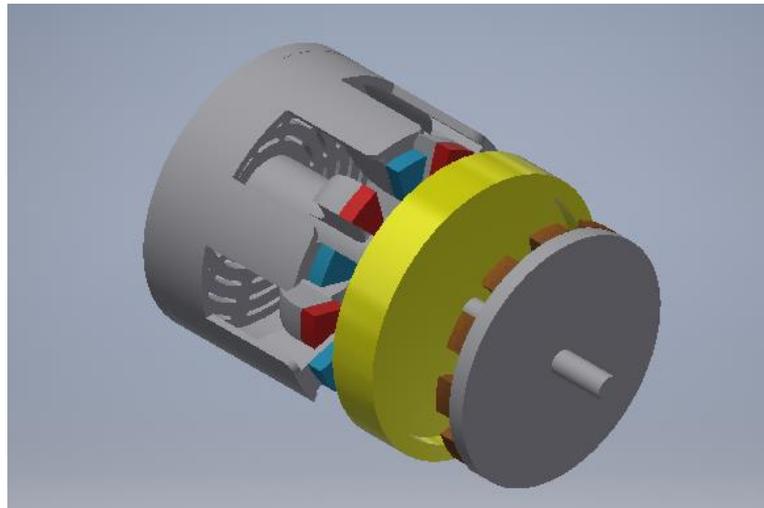


Ilustración 4 Diseño conceptual 2

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

A continuación, se va a exponer ordenado de forma cronológica los pasos seguidos para el cálculo de los valores que condicionan el diseño y viabilidad de la máquina.

DISEÑO DEL INDUCIDO

A continuación, se va a proceder a explicar el proceso de desarrollo del diseño del inducido. Para ello partimos de una premisa clara, que es, el diseño de un inducido lo más sencillo posible.

Para el cálculo de los parámetros de diseño se partirá de los datos suministrados por un alternador de garras comercial. Adicionalmente se emplearán valores estimativos en los que se mueven este tipo de máquinas.

El primer paso del cálculo será de cálculo eléctrico, para posteriormente definir características del arrollamiento del inducido y finalmente materializarlo en un diseño mecánico.

Deberemos tener en cuenta que se trata de la única pieza de la máquina que se va a encontrar girando (va a ser el rotor de la máquina), y debido a esto su forma y características han de ser las más adecuadas para conservar su integridad tanto en regímenes de giro bajo, como a regímenes altos.

CÁLCULOS PRELIMINARES: DIÁMETROS ZONA POLAR, INDUCCIÓN Y FLUJO

El inducido se trata de la parte de nuestra máquina que va a recoger la corriente útil generada. Esta corriente ha de tener unas características que se imponen más abajo, por lo que las características del conductor que tendrá, así como su geometría, se deberán adaptar a una serie de cálculos. Estas características vendrán impuestas por el circuito eléctrico del coche (batería, luces, limpiaparabrisas, etc). En las dos posibilidades de diseño, se ha propuesto como rotor al inducido. Este hecho presenta principalmente una gran ventaja y una gran desventaja:

- Como ventaja tenemos que, el núcleo del inducido no requiere ser de un material conductor ni ferromagnético, luego podemos fabricarlo en otros materiales más ligeros, como por ejemplo, materiales cerámicos o plásticos. Esto hace a su vez que la parte móvil de nuestro generador sea ligero, minimizando la sollicitación mecánica a la que se encuentra sometido cuando el generador gira a altas revoluciones.
- Como desventaja tenemos que el hecho de que el inducido gire, exige una forma especial para sacar la corriente. Requerimos el uso del sistema de anillos rozantes y por tanto el empleo de escobillas, lo que desemboca en pérdidas mecánicas por rozamiento así como desgaste mecánico de la pieza.

En principio pensamos que prima más la integridad de la propia pieza, que la forma en la que sacamos la corriente, y más teniendo en cuenta a las velocidades que va a girar (aproximadamente unas 12000 rpm a plena carga). El sistema de anillos rozantes es el sistema que actualmente usan los generadores de automoción, luego en ese sentido está muy optimizado e inicialmente no preocupan las pérdidas o la durabilidad de las escobillas. Por otro lado, la corriente suministrada a los circuitos eléctricos del vehículo es necesario que sea corriente continua. Para este fin emplearemos un rectificador de puente de diodos o similar.

Tras estos planteamientos iniciales se pasa a lo que es la parte matemática del proyecto en la cual vamos a dimensionar el sistema, tanto eléctricamente como geoméricamente. Para ello partimos de los requerimientos que actualmente tienen los vehículos, así como una serie de especificaciones que nos autoimponemos. Estos requerimientos de partida serán:

- Generador síncrono de 12 polos
- 3 fases
- Tensión de salida CC $V_{odc} = 14V$ de corriente continua + 0.3V aprox. de caída de tensión.
- Tensión de salida CA $V_{oac} = 10,6 V$ de corriente alterna generada
- Régimen máximo de giro $n_{max} = 12000$ rpm
- Para $n = 1800$ rpm $I = 100 A$

Además de estos datos de partida, que corresponden meramente al uso que se le va a dar a la energía a la salida del generador, necesitamos suponer o acotar una serie de datos extra para poder realizar los cálculos necesarios. Estos datos serán:

- Densidad lineal de corriente $A = 40000 A/m$
- Valor de la inducción $B = 0,7 T$
- Relación entre diámetros internos y externos de la parte activa $K_d = 1/2$
- $\cos(\varphi) = 1$
- Rendimiento de la máquina $\eta = 0,85$
- $K_\delta = 0,95$
- $\varepsilon = 0,94$
- Factor de empaquetamiento del arrollamiento $K_w = 0,96$
- Densidad de corriente $JA = 4,5 A/mm^2$

Para esta parte del cálculo, vamos a emplear como referencia un libro de máquinas de flujo axial de imanes permanentes (Axial flux permanent magnet brushless machines” Ed. Springer). Pese a que en principio puede parecer descabellado, puesto que nuestra máquina no va a emplear esta tecnología, es válido, ya que obtendremos una serie de valores referencia para

dimensionar las zonas activas de los polos, así como para hacernos una idea de las medidas de nuestra máquina.

Mediante la consulta del libro mencionado en el párrafo anterior llegamos a una zona de valores, en los que nos interesa que se mueva nuestra máquina. A pesar de partir de estos datos, el proceso es iterativo, por lo que estos valores no son definitivos, sino que van a ir cambiando a lo largo del cálculo.

Los valores más importantes que deseamos saber son el diámetro interno y externo, y la sección de los polos, así como los valores de inducción finales, flujo magnético y el número de espiras N .

EL primer paso del cálculo es la obtención del diámetro externo de la parte activa en el proceso de inducción. Esto lo haremos mediante los datos conocidos. A continuación, mediante la relación de diámetros que hemos pactado en las condiciones de partida, calculamos el diámetro interno. Este cálculo dimensionalmente es muy importante, ya que además de dimensionar el inducido, también dimensiona las partes activas del inductor, y de esta forma, condicionando el diseño total y los espacios disponibles para otros elementos constructivos o de índole eléctrica.

Tras el cálculo de los diámetros pasamos a calcular el flujo magnético y con este dato obtenemos a su vez el número de espiras necesarias para conseguir que se cumplan los valores anteriormente pactados.

Dado que esta cantidad ha de ser preferentemente un múltiplo del número de polos (en nuestro caso 12) se reajusta el valor y se fija como 24 espiras y una rama en paralelo (es decir, todas las espiras en serie). Tras esto se procede al cálculo inverso del flujo y posteriormente de los diámetros y de la inducción conseguida.

Justificación de cálculos 1

Tras varias iteraciones, llegamos a la conclusión de que nuestra máquina debe rondar unos diámetros un tanto extraños para llegar a los valores esperados, tanto de inducción, como de dimensiones. Se decide modificar la

relación geométrica entre diámetros internos y externos de la parte activa, de $K_d = 1/2$ a $K_d = 2/3$ así como la forma de cálculo.

Cambiamos una metodología “lineal de cálculo”, con la que es muy difícil llegar a un resultado satisfactorio, por el empleo de una hoja de cálculo, para en función de un diámetro externo, obtener el diámetro interno, así como el flujo magnético, el valor de la inducción y la densidad de corriente.

El empleo de esta herramienta nos permite calcular una gran cantidad de valores simultáneamente, y seleccionar los más adecuados a nuestras necesidades.

Se toma la decisión tras consultar varios libros de que un valor aceptable de la inducción magnética es 0,6 T y fijamos N (número de espiras) en 24 por lo que con la tabla de cálculo legamos a:

Dout (m)	Din (m)	ϕf (Wb)	Bmg(T)	A(A/m)
0,1	0,06666667	0,00031222	1,34878638	50561,7643
0,101	0,06733333	0,00031222	1,32220996	50061,1528
0,102	0,068	0,00031222	1,29641136	49570,3572
0,103	0,06866667	0,00031222	1,27136053	49089,0916
0,104	0,06933333	0,00031222	1,24702883	48617,0811
0,105	0,07	0,00031222	1,22338901	48154,0613
0,106	0,07066667	0,00031222	1,20041508	47699,7777
0,107	0,07133333	0,00031222	1,17808226	47253,9853
0,108	0,072	0,00031222	1,15636692	46816,4484

...

0,145	0,09666667	0,00031222	0,64151552	34870,1823
0,146	0,09733333	0,00031222	0,63275773	34631,3454
0,147	0,098	0,00031222	0,62417807	34395,758
0,148	0,09866667	0,00031222	0,61577172	34163,3543
0,149	0,09933333	0,00031222	0,60753407	33934,07
0,15	0,1	0,00031222	0,59946061	33707,8429
0,151	0,10066667	0,00031222	0,59154703	33484,6121
0,152	0,10133333	0,00031222	0,58378912	33264,3186
0,153	0,102	0,00031222	0,57618283	33046,9048
0,154	0,10266667	0,00031222	0,56872423	32832,3145
0,155	0,10333333	0,00031222	0,56140952	32620,4931

Tabla 1: Cálculo de diámetros, flujo e inducción magnética

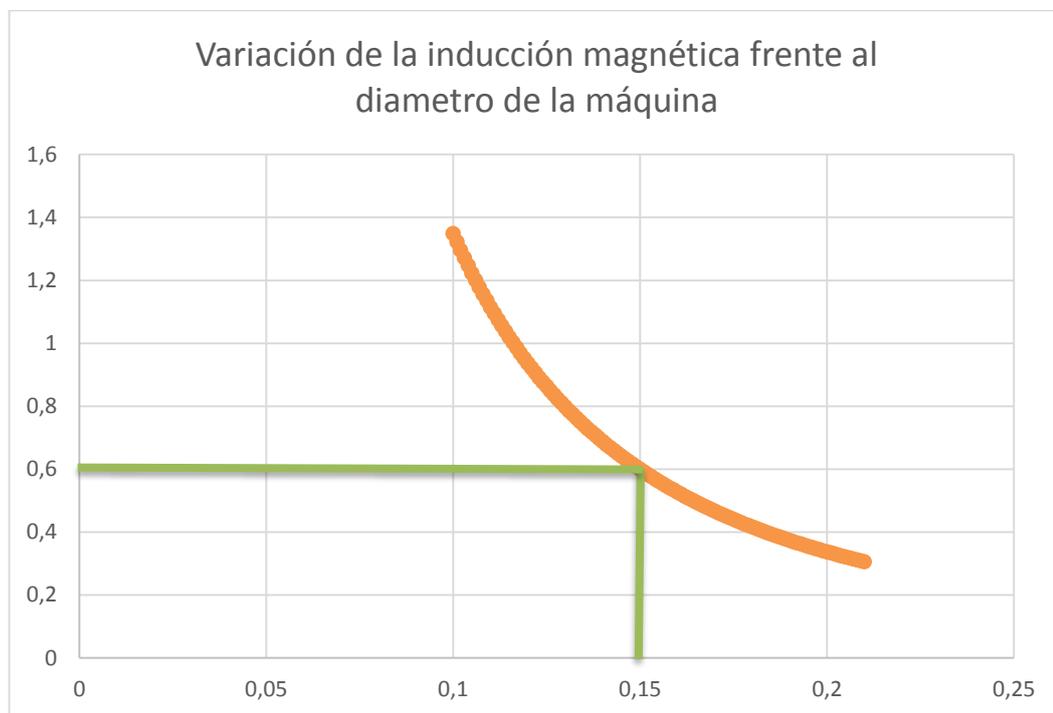


Ilustración 5: Variación del flujo magnético en función del diámetro de la máquina

Obtenemos que para un diámetro externo de 0,15 m de nuestra “zona activa”, tendremos un diámetro interno de 0,1 m y un valor de la inducción de 0,599 T lo cual prácticamente podemos decir que son los esperados 0,6 T.

También veremos que, para esos valores de diámetro e inducción, necesitaremos un flujo efectivo ϕ_r de 0,00031222 wb

Adicionalmente calculamos la sección del conductor, que será producto de dividir la corriente entre la densidad de corriente empleada en el cálculo, obteniendo 17,33 mm².

Una vez tenemos definidos estos aspectos, básicos en el diseño de cualquier máquina, comprobamos que las dimensiones que tiene la máquina son próximas a las que tiene la actual y que por tanto la máquina es dimensionalmente viable para los parámetros básicos de partida.

DISEÑO DEL DEVANADO INDUCIDO

Las fuerzas magnetomotrices inducidas en el interior de una máquina rotativa son consecuencia de las corrientes que circulan por los arrollamientos. Tradicionalmente en las máquinas eléctricas rotativas tenemos 4 formas constructivas básicas.

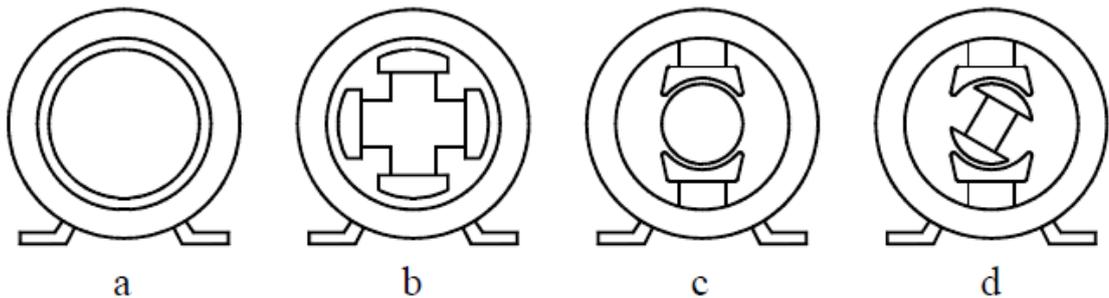


Ilustración 6 Formas constructivas básicas de las máquinas eléctricas

Fuente: Devanados (Miguel Ángel Rodríguez Pozueta)

- a) Estator y rotor cilíndrico: normalmente empleado en motores asíncronos y máquinas síncronas de alta velocidad.
- b) Estator cilíndrico y rotor de polos salientes: utilizado comúnmente en máquinas síncronas de baja velocidad.
- c) Estator con polos salientes y rotor cilíndrico: empleado en máquinas de corriente continua y en máquinas síncronas de baja potencia.
- d) Estator y rotor de polos salientes: empleado en máquinas especiales y en motores paso a paso.

Según la forma constructiva empleada los arrollamientos se colocan o bien de forma distribuida, o bien, de forma concentrada.

Para el diseño que estamos realizando, se decide que el inducido sea un arrollamiento distribuido. Este tipo de arrollamientos, están compuestos por bobinas distribuidas por toda la superficie o cerca de la superficie del inducido.

Para fijar las bobinas, éstas se colocan en lo que conocemos como ranuras. El espacio entre ranuras, es lo que conocemos como diente.

Las ranuras pueden ser de tres tipos: abiertas, semicerradas o cerradas (Ilustración 7)

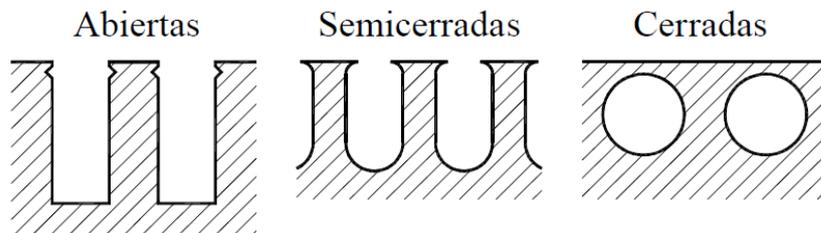


Ilustración 7 Tipos de ranuras

Fuente: Arrollamientos (Norberto A. Lemozy)

Las ranuras abiertas de lados paralelos se suelen emplear en máquinas de potencia media-grande y en los inducidos a colector, salvo en los de muy baja potencia (del orden de cientos de vatios). Para este tipo de ranurado, tenemos que los dientes no son de sección constante, sino que presentan sección trapezoidal. Esto debe ser tenido en cuenta a efectos de inducciones magnéticas y saturaciones.

Las ranuras semicerradas se emplean en máquinas de menor potencia. Las bobinas están formadas por conductores sueltos, colocados o bien individualmente o en grupos, normalmente de forma manual. Para poder acomodar mejor los conductores en las ranuras lo mejor es tener ranuras circulares y conductor circular.

Tanto en las ranuras abiertas como en las semicerradas, debe procurarse que las bobinas queden totalmente dentro de las ranuras y que no sobresalgan, especialmente si estas están sometidas a la fuerza centrífuga del motor. Normalmente se cerrará la ranura por medio de una cuña de cierre, la cual será de un material resistente y no magnético.

Por último, las ranuras cerradas, se emplean principalmente en los rotores de las máquinas asíncronas y en máquinas especiales. Dentro de este tipo de

ranuras lo que se colocan son barras conductoras, normalmente sin aislamiento.

Para la máquina que estamos diseñando decidimos que lo más simple y efectivo va a ser el empleo de ranuras semicerradas. Las razones son las siguientes:

- La máquina va a ser de relativamente poca potencia.
- El devanado va a estar sometido a esfuerzos centrífugos, ya que el inducido va a encontrarse girando, por lo que es conveniente que se encuentre lo más cerrado posible.

Dentro de cada ranura podemos encontrar uno, dos o más lados de bobina. Cuando tenemos un solo lado de bobina por ranura se dice que el arrollamiento es de simple capa, cuando hay dos o más lados de bobina, estos se disponen en dos capas y decimos que el arrollamiento es de doble capa.

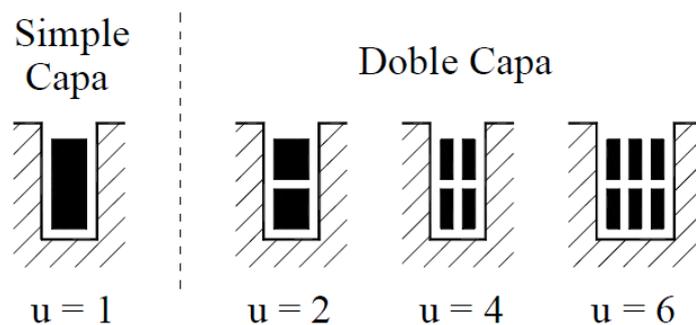


Ilustración 8 Disposición de las bobinas

Fuente: Arrollamientos (Norberto A. Lemozy)

Por nuestra parte para no complicar demasiado el diseño que estamos realizando y para reducir el espesor del inducido optamos por el empleo de simple capa.

Las bobinas que se colocan dentro de las ranuras se componen de 3 partes:

- Lados activos: parte de la bobina sometida al flujo magnético, y consecuentemente, lugar donde se inducen las tensiones y las fuerzas útiles.

- Cabeza y conexiones: concatenan únicamente flujo disperso y contribuyen en gran medida a la reactancia de dispersión, estas son las partes más afectadas por los esfuerzos dinámicos que se producen particularmente en los cortocircuitos.

El modelo más comúnmente empleado en los arrollamientos de las máquinas de pocos kilovatios, es la bobina rectangular con vértices redondeados dentro de ranuras semicerradas.

Para modelos de mediana y gran potencia es común el empleo de la forma de bobina hexagonal o de diamante con arrollamiento dispuesto en doble capa. Para ordenarlas correctamente en sus extremos giran media vuelta para poder tener sus lados a distintos niveles

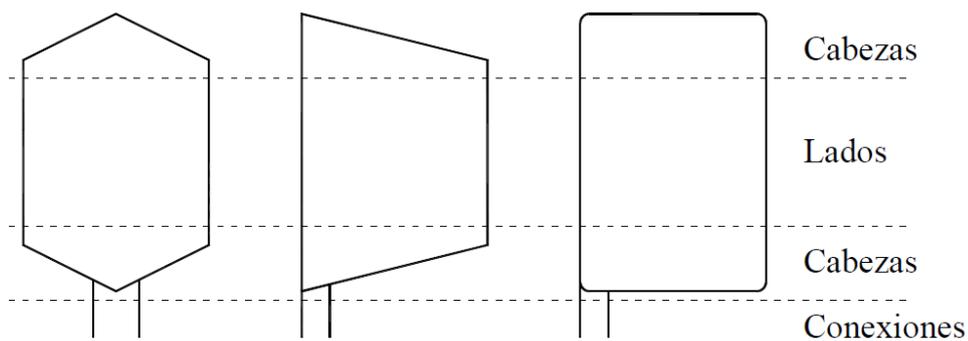


Ilustración 9 Formas comunes de bobina

Fuente: Arrollamientos (Norberto A. Lemozy)

Cuando el arrollamiento está terminado debe quedar perfectamente aislado, con las cabezas de bobina y las conexiones bien acomodadas y fijas para soportar los esfuerzos a que estarán sometidas.

Dado que nuestra máquina es de baja potencia emplearemos bobinas rectangulares.

La última decisión que tenemos que tomar antes de comenzar con el cálculo numérico es el tipo de arrollamiento distribuido que vamos a emplear. Básicamente tenemos tres: el ondulado, el imbricado y el concéntrico. El

imbricado y el concéntrico son los más comúnmente empleados en el diseño de máquinas eléctricas mientras que el ondulado es más empleado en máquinas de altas prestaciones. Es por esto que vamos a elegir o bien el arrollamiento imbricado (Ilustración 11), o bien el concéntrico (Ilustración 10). El ondulado quedará descartado por requerir de 2 capas por lo que el arrollamiento sería demasiado voluminoso.

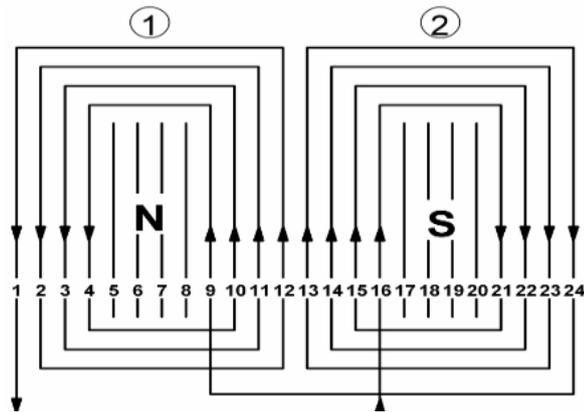


Ilustración 10 Arrollamiento concéntrico

Fuente: Devanados (Miguel Ángel Rodríguez Pozueta)

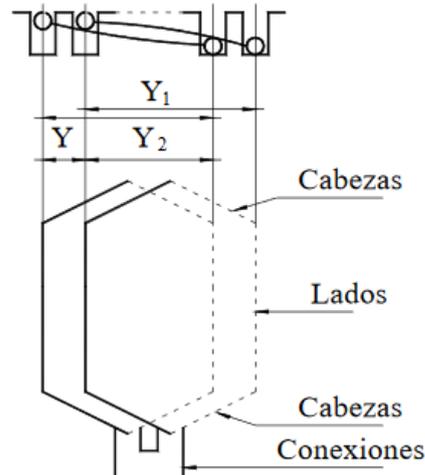


Ilustración 11 Arrollamiento imbricado

Fuente: Devanados (Miguel Ángel Rodríguez Pozueta)

Con estos datos ya estamos en disposición de definir las características del hilo del inducido.

Del paso de cálculo anterior tenemos fijados los siguientes parámetros:

- $2p = 12$ polos
- $m = 3$ fases
- Sección de conductor = $17,33 \text{ mm}^2$
- $D_{\text{int}} = 100 \text{ mm}$
- $D_{\text{ext}} = 150 \text{ mm}$

Además de estos datos, con lo anteriormente expuesto y tras consultar con mi tutor las distintas opciones de cálculo se decide disponer de:

- $a' =$ ramas en paralelo = 1
- $q =$ ranuras/polo y fase = 2
- cada bobina va a tener 1 espira

Tenemos que para tener 12 polos necesitamos tener 24 espiras/fase lo que vienen a ser 72 ranuras. Estos son todos los datos necesarios para calcular el hilo que vamos a emplear.

En primer lugar, se calcula sobre el diámetro más desfavorable, la distancia entre ranuras, que va ser producto del perímetro del diámetro interno D_{int} , dividido entre el número de ranuras. Con esta operación vemos que el espacio disponible es de 4,36 mm. Este espacio se conoce como paso de ranura.

Como vamos a usar espiras cuadradas, para aprovechar al máximo el espacio, caemos en la cuenta de que el cálculo anteriormente realizado no es del todo correcto, ya que, al perímetro disponible para bobinar, hay que restarle el espacio que nos quita la cabeza de la bobina. Este espacio le estimamos en unos 16 mm aproximadamente, luego al D_{in} , habrá que restarle los 16 mm, quedando finalmente un paso real de ranura de 3,66 mm. Este será el ancho máximo que podrá tener el hilo.

Con esto y habiendo decidido que el hilo a emplear va a ser rectangular entramos en la tabla del **anexo 2** para buscar el hilo a emplear:

TABLA DE CONDUCTORES DE SECCIÓN RECTANGULAR (Área en mm²)

Grosor (mm)	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2	2,5	2,8	3,0	3,2	3,5	3,8	4,0	4,5	5,0	5,5
Ancho (mm)																								
0,9	-	0,67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,0	-	-	0,86	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,2	-	-	-	-	1,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,4	0,98	1,12	1,26	1,40	-	-	1,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,6	1,14	1,30	1,46	1,62	1,78	1,87	-	-	2,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1,8	1,30	1,48	1,66	1,84	2,02	2,13	2,31	2,48	-	-	2,93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,0	1,46	1,66	1,86	2,06	2,19	2,39	2,59	2,79	2,99	3,19	-	-	3,69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,2	1,62	1,84	2,06	2,21	2,43	2,65	2,87	3,09	3,31	3,53	3,65	-	-	4,53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,5	1,86	2,11	2,36	2,54	2,79	3,04	3,29	3,54	3,79	4,04	4,19	4,44	4,69	-	5,94	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,8	2,10	2,38	2,66	2,87	3,15	3,43	3,71	3,99	4,17	4,45	4,75	5,01	5,29	5,85	-	7,28	-	-	-	-	-	-	-	-
3,0	2,26	2,56	2,86	3,09	3,39	3,69	3,99	4,19	4,49	4,79	5,09	5,39	5,69	6,29	7,19	-	8,44	-	-	-	-	-	-	-
3,2	2,42	2,74	3,06	3,31	3,63	3,95	4,27	4,49	4,81	5,13	5,45	5,77	6,09	6,73	7,69	8,41	-	9,68	-	-	-	-	-	-
3,5	2,66	3,01	3,36	3,64	3,99	4,34	4,69	4,94	5,29	5,64	5,99	6,34	6,69	7,39	8,20	9,25	9,95	-	11,69	-	-	-	-	-
3,8	2,90	3,28	3,66	3,97	4,35	4,73	5,11	5,39	5,77	6,15	6,53	6,91	7,29	8,05	8,95	10,10	10,90	11,60	-	13,88	-	-	-	-
4,0	3,06	3,46	3,86	4,19	4,59	4,99	5,39	5,69	6,09	6,49	6,89	7,29	7,69	8,25	9,45	10,70	11,50	12,30	13,50	-	15,44	-	-	-
4,5	3,46	3,91	4,36	4,74	5,19	5,64	6,09	6,44	6,89	7,34	7,79	8,24	8,45	9,35	10,70	12,10	13,00	13,90	15,20	-	17,10	19,39	-	-
5,0	3,86	4,36	4,86	5,29	5,79	6,29	6,79	7,19	7,69	8,19	8,69	9,10	9,45	10,50	12,00	13,50	14,50	15,50	16,60	-	19,10	21,60	24,14	-
5,5	4,26	4,81	5,36	5,84	6,39	6,94	7,49	7,94	8,49	9,04	9,59	10,10	10,50	11,60	13,20	14,90	16,00	16,70	18,40	-	21,10	23,85	26,60	29,10
6,0	4,66	5,26	5,86	6,39	6,99	7,59	8,19	8,69	9,29	9,89	10,50	11,10	11,50	12,70	14,50	16,30	17,50	18,30	20,10	-	23,10	26,10	29,10	32,10
6,5	5,06	5,71	6,36	6,94	7,59	8,24	8,89	9,44	10,10	10,70	11,40	12,00	12,50	13,80	15,70	17,70	19,00	19,90	21,90	-	25,10	28,40	31,60	34,10

Tabla 2 Tabla de conductores de sección rectangular

Fuente: Tablas, fórmulas y gráficas para el cálculo de máquinas asíncronas (Miguel Ángel Rodríguez Pozueta)

Minimizando al máximo la sección de cobre necesaria nos decantamos por un conductor de sección “cuadrada” (3 x 3 mm), que nos brindará una sección de 8,44 mm². Esta sección está obtenida teniendo en cuenta que los bordes están redondeados. Adicionalmente debido a que requerimos de aún más sección que la que nos sale, para llegar a la sección necesaria utilizaremos 2 hilos

Dividiendo la intensidad nominal (78 A) entre la sección de conductor multiplicada por los dos hilos que vamos a emplear de conductor, tenemos que la densidad de corriente es de 4,62 A/mm², suficientemente próxima a la teórica necesaria (4,5 A/mm²).

Una vez obtenidos estos valores procederemos al cálculo del factor de bobinado. “El factor de bobinado ξ_b es un coeficiente que depende de cómo está devanada la fase (depende del número de ranuras donde se alojan las

bobinas de la fase, de la separación entre estas ranuras, del paso de bobina, etc.) y siempre es menor que 1.” (F.m.m. y campo magnético en el entrehierro de máquinas eléctricas simétricas. Miguel Ángel Rodríguez Pozueta)

Como se van a emplear 2 ranuras por polo y fase y Y_t , que es el ángulo eléctrico que abarca el bobinado por polo y fase, vale 60° , obtenemos que el factor de bobinado ξ_b es 0,966.

Justificación de cálculo 2

Tras esto lo único que queda es dibujar el desarrollo del arrollamiento. Al ser 72 ranuras y tener la limitación del papel, únicamente dibujaré 24 ranuras, las siguientes serán repetición de las primeras. De igual forma el arrollamiento se encontrará en un disco que girará, pero para representarlo gráficamente de una forma más clara será dibujado de forma lineal, lo cual facilitará la interpretación del esquema.

En primer lugar, dibujaré arrollamiento imbricado. El arrollamiento imbricado será de una sola capa con paso polar reducido a 5. Cada línea dibujada serán dos hilos unidos de conductor con la sección sacada anteriormente. Cada fase irá representada con un color. Todo esto quedará representado en el **Plano 1**.

En segundo lugar, quedará dibujado el arrollamiento concéntrico. Cada línea dibujada serán dos hilos unidos de conductor con la sección sacada anteriormente. Cada fase irá representada con un color. Todo esto quedará representado en el **Plano 2**.

Analizando ambos dibujos podemos ver que mientras que en el arrollamiento imbricado nos quedan 3 niveles en las cabezas de bobina, en el arrollamiento concéntrico este número sube hasta 6, luego para mantener la compacidad de la máquina y tener un arrollamiento lo más simple posible, nos decantaremos por la opción del arrollamiento imbricado.

CONSIDERACIONES FINALES EN EL DISEÑO DEL INDUCIDO

Tras todos los cálculos realizados anteriormente y en vista de los resultados obtenidos lo único que queda por definir es el aspecto mecánico que va a tener el elemento diseñado.

Al tratarse de un elemento que va a encontrarse girando a altas revoluciones el material donde se encuentre el arrollamiento, ya dimensionado en el paso anterior, deberá tratarse de un material lo más resistente posible, a la par que liviano y con buenas propiedades de transmisividad térmica (material conductor del calor) a la par que termoestable. Este material no deberá ser conductor de la corriente eléctrica. Al encontrarse girando deberá tener su masa totalmente equilibrada y una inercia periférica constante, luego deberá tratarse de un disco.

Con todo lo anteriormente expuesto se decide emplear un disco de polímero en el cual irá embebido el arrollamiento. De esta forma se consigue que el arrollamiento quede totalmente sujeto a la matriz del material y que este disco sea lo más ligero posible para evitar generar grandes inercias al girar solidario al eje. Este disco será del mínimo espesor necesario para albergar el arrollamiento.

Los planos del diseño del inducido pueden verse con detalle en el **Plano 3**

Otro tema que queda en el aire tras todos los cálculos preliminares, es la forma que vamos a emplear para sacar la corriente generada. Este aspecto vendrá tratado en el **Anexo 3.**

Para más información acerca del material empleado consultar el **Anexo 4.**

DISEÑO DEL INDUCTOR

Una vez definidas las características eléctricas del inducido y haber definido el tipo de arrollamiento que lleva, así como la forma física del propio inducido, procederemos a hacer lo mismo con el inductor.

Está claro que una vez definidas las variables de salida del sistema, lo siguiente es calcular las variables que han de cumplirse a la entrada para conseguir el efecto esperado. En nuestro caso, tendremos que diseñar un inducido que consiga dar los valores de flujo magnético e inducción necesarios para que se cumpla todo lo calculado en el inductor.

Para ello vamos a seguir sucesivamente los siguientes pasos:

1. Diseño de los polos inductores.
2. Diseño del arrollamiento del inductor.
 - a. Opción bobinas individuales en cada polo
 - b. Opción bobina única (equivalente al de garras)
3. Cálculo de pérdidas.
4. Si procede después del anterior cálculo, reajuste de parámetros.
5. Diseño mecánico.

Dado que el inductor de la máquina se va a encontrar estático, las exigencias mecánicas a las que se va a ver sometido van a ser reducidas, por lo que podremos emplear materiales comunes empleado en máquinas eléctricas.

El diseño del inductor va a basar en un inductor del tipo polos salientes. Este diseño diferirá del tradicional en el sentido de que la máquina que se está diseñando es de flujo axial, y, por tanto, cuando sea necesario, las fórmulas serán adaptadas para esta disposición especial.

INDUCTOR A)

ARROLLAMIENTO DEL INDUCTOR

La primera opción que se plantea para el circuito de excitación del inductor, consiste en un sistema de bobinas individuales en cada uno de los polos, conectadas en serie entre ellas (Ilustración 12).

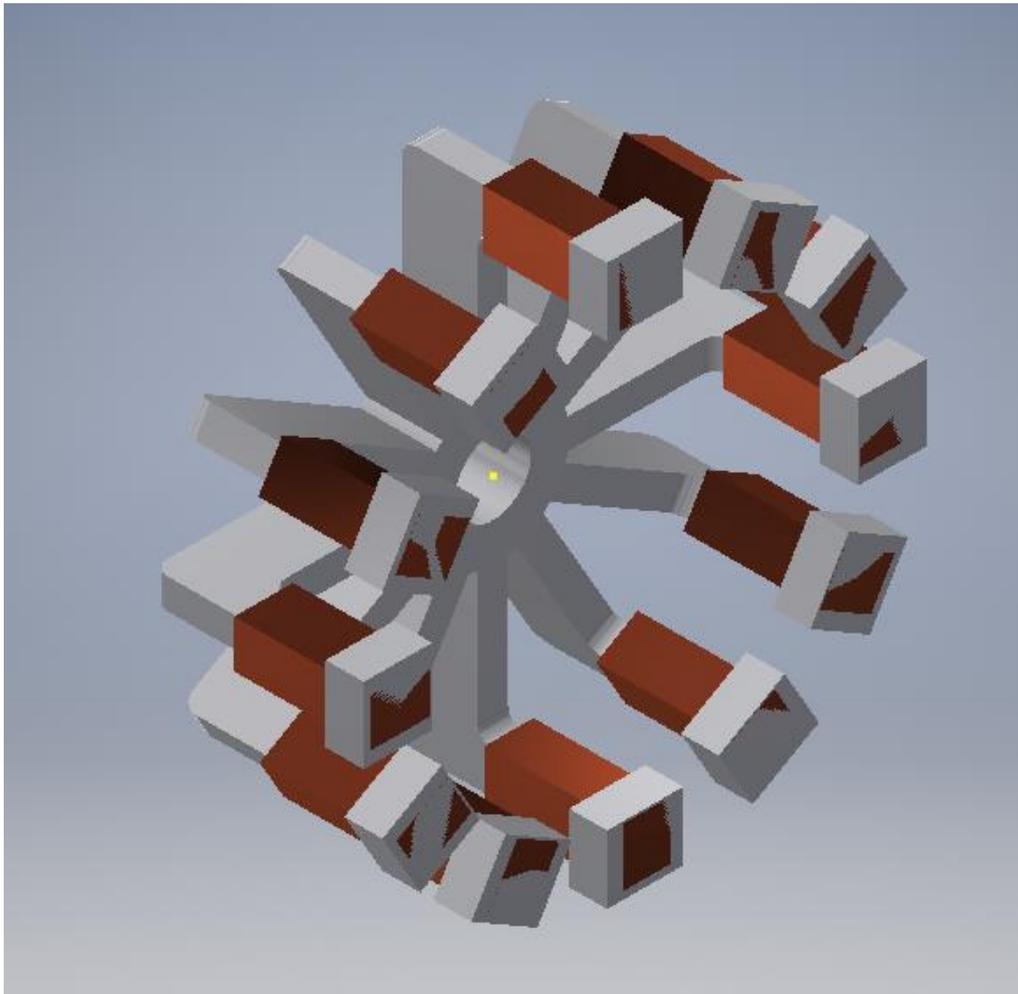


Ilustración 12 Inductor con bobina polar individual

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

Este tipo de diseño presenta una gran ventaja y una gran desventaja:

- **Ventaja:** se elimina la necesidad de tener un bobinado centralizado, por lo que la pieza puede ser mucho más ligera y el conjunto más compacto. Cada una de las bobinas de los polos presenta una gran superficie en contacto con el aire, por lo que la disipación del calor va a ser mucho mejor que si todo el arrollamiento queda concentrado.
- **Desventaja:** el espacio radial está muy limitado, por lo que cabe la posibilidad de que para las corrientes que se manejan, la sección de cobre necesaria sea tan grande que la bobina de un polo interfiera con la del polo contiguo. Llegado el caso habría que diseñar otro tipo de inductor.

Dado que no podemos estar seguros de la viabilidad o no del tipo de arrollamiento planteado, lo que vamos a hacer es proceder con el cálculo de los parámetros necesarios, hasta llegar a la sección necesaria de cable, momento en el cual sabremos si es posible o no el empleo de esta solución.

DISEÑO DE LOS POLOS INDUCTORES

Dado que la máquina diseñada se trata de una de flujo axial de polos salientes, en un primer paso vamos a diseñar éstos. Los polos deberán de cumplir una serie de condiciones básicas, en lo que a su sección se refiere, para ser capaces de transportar el flujo magnético que necesitamos en el inducido.

Habrà que tener en cuenta que el flujo necesario calculado en el diseño del inducido es el efectivo que tiene que llegar, por lo que el flujo en los polos habrá de ser mayor, ya que parte de éste será desaprovechado en forma de dispersión.

También vamos a calcular los valores de la inducción magnética que tendremos en esta parte de la máquina. Estos valores posteriormente nos definirán otras características del inductor, por lo que resulta importante tener sus valores bien establecidos.

Para ello lo primero es la definición de las magnitudes básicas de cálculo (Ilustración 14 y 15):

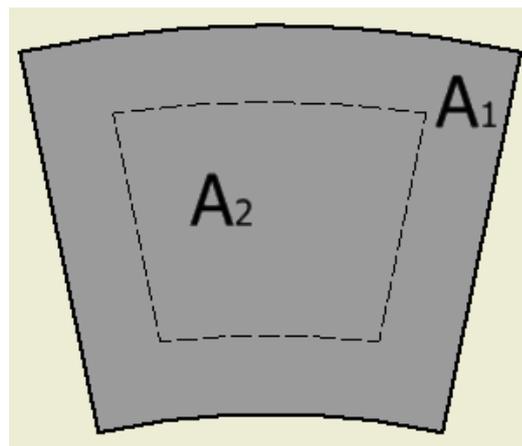


Ilustración 13 Áreas del polo

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

Cada uno de los polos se divide en 2 partes bien diferenciadas:

- Núcleo polar (Ilustración 8: A_2): parte del polo sobre la que va el arrollamiento del inductor, de sección más estrecha que la zapata polar. Adicionalmente se encarga de conducir el flujo hacia la zapata del polo.
- Zapata del polo (Ilustración 8: A_1): parte final del polo, y parte interactuante final entre el inductor e inducido. No lleva ningún tipo de elemento sobre él, y su único cometido es la transmisión del flujo magnético. Su sección es mayor que la del núcleo polar.

Para simplificar el cálculo tanto el núcleo polar, como la zapata del polo serán totalmente simétricos.

Las variables que definirán las partes anteriormente descritas serán las siguientes:

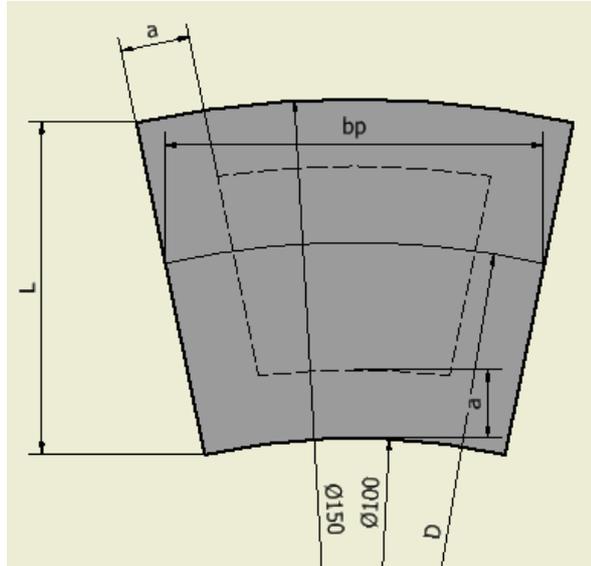


Ilustración 14: Variables del diseño del polo

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

- $b_p \rightarrow$ ancho de la zapata polar
- $L \rightarrow$ longitud de la zapata polar
- $D \rightarrow$ diámetro medio
- $a \rightarrow$ diferencia entre A_1 y A_2

Adicionalmente partiremos de datos ya conocidos y calculados en el diseño del inducido:

- $2p = 12$ polos
- $D_{int} = 100$ mm
- $D_{ext} = 150$ mm
- $\varphi_f = 0,00031222$ Wb

En primer lugar, calcularemos el diámetro medio D que será simplemente la suma entre los diámetros de la zona “activa”, D_{int} y D_{ext} del inducido dividida entre dos. Esto nos dará como resultado que la longitud de la zapata del polo

toma un valor de 25 mm. De aquí deducimos que el diámetro medio D será igual a 125 mm

Con este valor nos resultará fácilmente calculable el paso polar medio τ_p . Esta magnitud se definirá como el perímetro de la circunferencia del diámetro medio dividido entre el número de polos. El valor obtenido nos indicará el ancho máximo que puede ocupar cada polo, que en este caso será de 32,7 mm. Por motivos de inducciones entre polos y pérdidas por flujos de dispersión, no será posible que el polo ocupe todo este espacio, por lo que, tras consultar varios libros de diseño de máquinas eléctricas, se decide que b_p que es el ancho de la zapata polar, tome un valor del 60% de τ_p , obteniendo un valor de 19,6 mm.

Con estos datos ya tenemos completamente definida, en lo que a dimensiones se refiere, la zapata del polo. A continuación, vamos a calcular la sección del núcleo polar, partiendo del flujo y de la sección que ya conocemos, calcularemos el valor de la inducción y, mediante ésta, obtendremos la sección del núcleo polar.

En primer lugar, se estima el flujo necesario en el polo, para conseguir el flujo esperado en el inducido. Mediante la consulta de valores típicos en la bibliografía especializada en diseño de máquinas eléctricas, se decide aplicar un incremento de un 20% sobre el flujo del inducido. Esto nos lleva a que ϕ_p toma un valor de 1,2 veces ϕ_f , lo que vienen a ser 0,0003746 Wb.

Con todos estos datos, ya estamos en condiciones de calcular el valor de la inducción máxima en la zapata del polo. Esto lo haremos mediante el empleo de la formulación indicada en la justificación del cálculo, que nos relaciona la sección y el flujo con el valor de la inducción máxima. Adicionalmente supondremos que la inducción B_{np} se distribuye de forma perfectamente sinusoidal en el entrehierro ($L_i=2/\pi$). Operando nos queda un valor de la inducción de B_{mp} 1,2 T

Debido a la saturación que se produce en el núcleo polar, estimamos un aumento del valor de esta inducción B_{mp} , redondeándola hasta un valor de B_{mnp} 1,5 T. Este valor será el que tome la inducción en el núcleo polar.

Una vez tenemos el valor de la inducción máxima en el núcleo polar (B_{mnp}) y partiendo de que el valor del flujo magnético (ϕ_f) toma un valor constante en todo el polo, estamos en disposición de calcular la sección del núcleo polar (S_{np}) recorriendo el camino inverso. Esta sección S_{np} será igual a $392,3 \text{ mm}^2$.

Con esta sección y sabiendo que los lados de la sección del núcleo polar distan $2a$ de las dimensiones de la zapata del polo, podemos obtener que a toma el valor de $1,15 \text{ mm}$.

Interpretando estos resultados sobre el plano tendremos que:

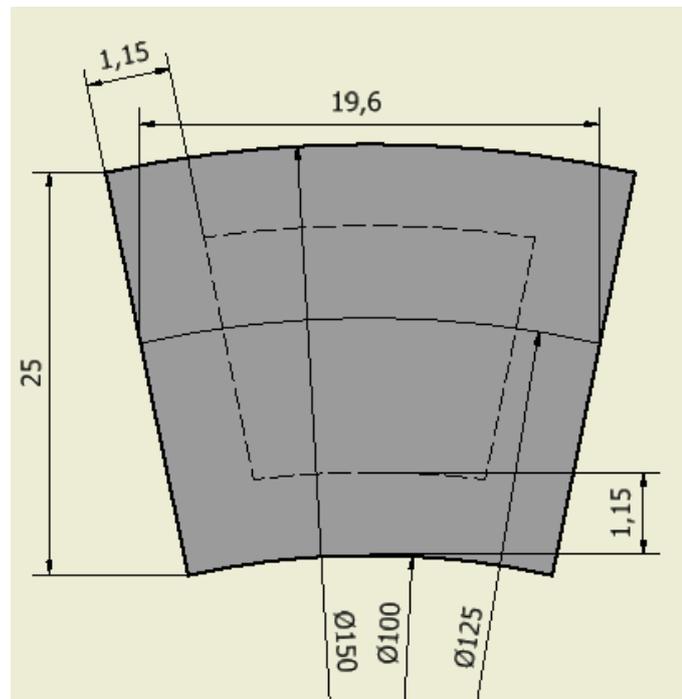


Ilustración 15 Interpretación gráfica de los resultados

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

Justificación de cálculo 3

FUERZA MAGNETOMOTRIZ POLAR

La fuerza magnetomotriz, de aquí en adelante f.m.m., es la capacidad de un devanado para producir un flujo magnético entre dos puntos de un circuito magnético. Es una de las variables usadas para describir un campo magnético." Su unidad son los Amperios x Vuelta. El cálculo de esta magnitud es la que nos permitirá calcular la sección del conductor.

Tenemos 3 componentes de la f.m.m.: la total en el entrehierro (F), la del polo (F_p) y la de reacción en el inducido (F_i). Entre ellas se relacionan por la expresión:

$$a) F^2 = (2 * F_p)^2 - F_i^2$$

Sin más dilaciones pasamos al cálculo de la f.m.m. total en el entrehierro. Para ello partimos de la suposición de que la maquina diseñada es ideal, y por tanto la permeabilidad del hierro es infinita (la reactancia es despreciable). Para corregir estas suposiciones multiplicaremos por un factor correctivo de 1,1 la fuerza real del entrehierro (F_g). Adicionalmente sabemos que la máquina es de polos salientes y de entrehierro constante (Ilustración 17).

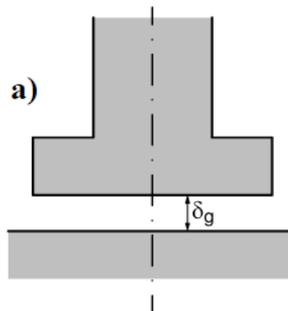


Ilustración 16 Maquina de entrehierro constante y polos salientes

Fuente: Campo electromagnético en el entrehierro de las máquinas eléctricas simétricas (Miguel Ángel Rodríguez Pozueta)

La f.m.m y los valores de la inducción tendrá la siguiente forma.

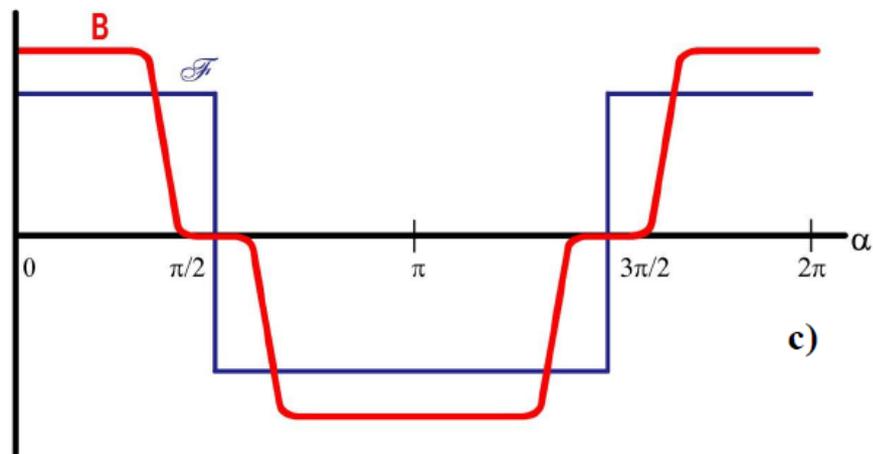


Ilustración 17 Variación de la inducción y la f.m.m. frente a la posición angular

Fuente: Campo electromagnético en el entrehierro de las máquinas eléctricas simétricas (Miguel Ángel Rodríguez Pozueta)

Partiendo de datos ya conocidos:

- Valor de la inducción en el inducido $B_{mg}= 0,6$ T
- Espiras por fase $N=24$
- Intensidad en el inducido $I_{acout}=78$ A
- Numero de polos $2p=12$

Y otros que tomamos como valores referencia de máquinas similares:

- Espesor del entrehierro $\delta= 1$ cm

Tenemos que la fuerza magnetomotriz total del entrehierro F toma un valor de 5247,39 Av.

De igual forma para la f.m.m. de reacción en el inducido F_i , obtenemos un valor de 287,78 Av.

Empleando la expresión a) obtenemos que la f.m.m. de cada uno de los polos (F_p) es de 2627,64 Av.

Justificación de cálculo 4

PERÍMETRO DEL NUCLEO POLAR

Para continuar con el dimensionamiento del inductor necesitamos empezar a conocer los espacios disponibles para colocar los arrollamientos en cada uno de los polos. Uno de estos espacios básicos es el perímetro del núcleo polar (Ilustración 19).

El perímetro del núcleo polar va a ser el que lleve a su alrededor el arrollamiento, luego al conocer este dato, conoceremos los mm de hilo que compondrán cada vuelta del mismo.

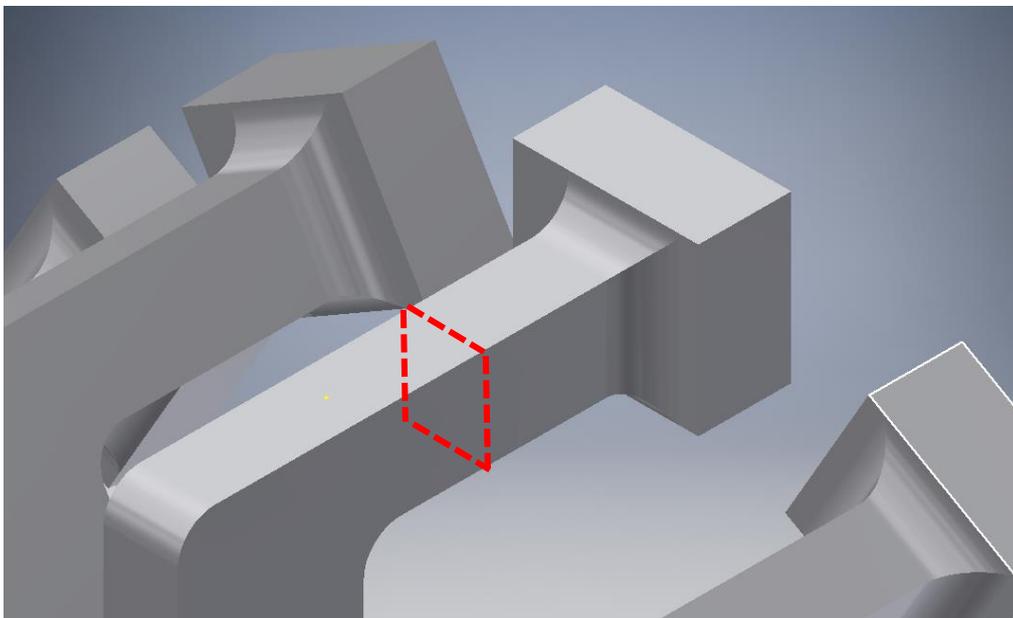


Ilustración 18 Perímetro a calcular

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

Para el cálculo de este perímetro partiremos de los datos obtenidos durante el diseño de los polos inductores. Obtenemos que este vale 80,36 mm

Justificación de cálculo 5

LONGITUD MEDIA ESPIRA

El siguiente paso de cálculo, previo a lo que es en sí el diseño del arrollamiento, es el cálculo de la longitud de media espira (l_1). Para ello seguiremos empleando los resultados obtenidos durante el diseño de los polos inductores.

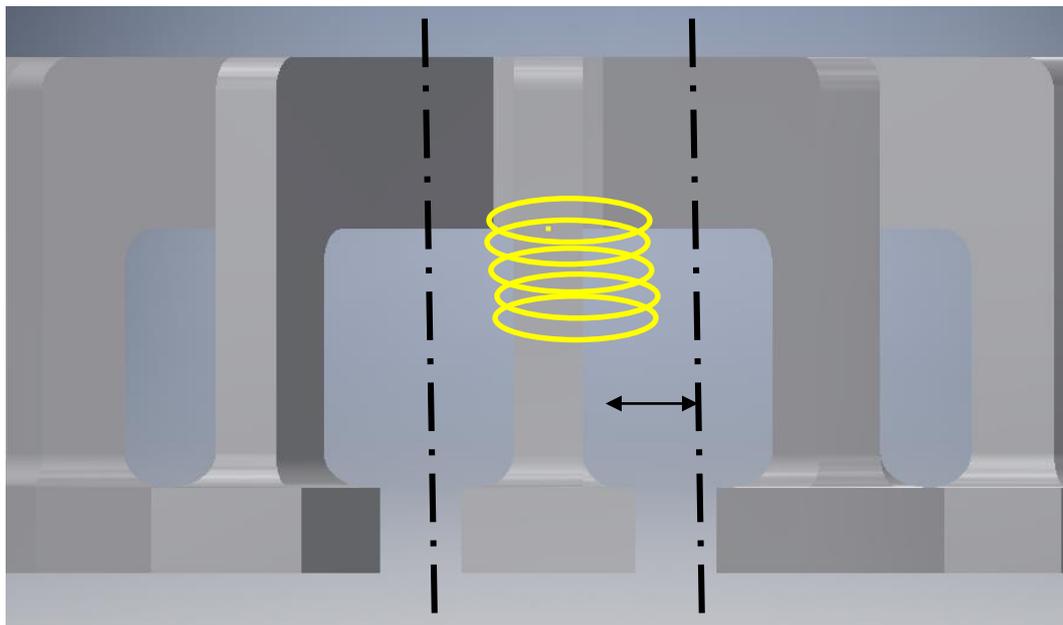


Ilustración 19 Espacio entre polos

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

Lo primero que hay que calcular es el espacio efectivo disponible entre polos (j indicado con la cota en la ilustración 15). Este espacio, será el que va desde el núcleo polar, hasta la mitad del espacio entre polo y polo. Por tanto, este espacio se calculará como diferencia entre paso polar medio τ_p y el ancho del núcleo polar. Esto nos dará un resultado de j igual a 7,69 mm.

A continuación, calcularemos directamente la longitud de media espira (l_1) por adición de distancias, obteniendo un valor de 120,33 mm.

Justificación de cálculo 6

DIMENSIONADO DEL ARROLLAMIENTO

Una vez tenemos todos los datos anteriormente calculados, ya estamos en disposición de calcular las características del arrollamiento que vamos a emplear.

El primer paso del cálculo, es la obtención de la sección del hilo conductor. Para ello nos vamos a aprovechar de la definición de f.m.m. y del valor que tenemos de la misma obtenida en pasos anteriores.

$$\text{Como sabemos la f.m.m. } F = N_p * I$$

Donde N_p es el número de espiras por polo e I la intensidad que circula por las mismas.1)

$$1) \text{ Aplicando la ley de Ohm donde } I = \frac{V}{R} \text{ llegamos a que } F = N_p * \frac{V}{R}$$

Conocemos la f.m.m. y la tensión a la que va a trabajar el inductor, sin embargo, no conocemos ni el número de espiras por polo N_p , ni la resistencia del hilo que conforma las mismas R , sin embargo, sabemos que:

$$2) \text{ La resistencia total del conjunto de los arrollamientos } R = 2p * R_p$$

En donde $2p$ es el número total de polos y R_p la resistencia del arrollamiento de un único polo

$$3) \text{ La resistencia del arrollamiento de un polo } R_p = \frac{N_p * l_1 * \rho}{S}$$

Donde N_p es el número de espiras por polo, l_1 es la longitud de media espira, ρ la resistividad del cobre y S la sección del mismo.

Despejando en la primera ecuación 1):

$$4) F = \frac{V * S}{2p * l_1 * \rho} \rightarrow \text{Sección del hilo conductor } S = \frac{2p * l_1 * \rho * F}{V}$$

El último paso antes de calcular la sección del hilo conductor es conocer la resistividad ρ a la temperatura de trabajo. Dado que no la conocemos, estimamos una temperatura de trabajo de 150 °C, obteniendo una resistividad interpolando de 0,026 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ (**Anexo 5**).

Dando valores a la ecuación 4), obtenemos que la sección necesaria de cobre es de $S= 6,78 \text{ mm}^2$.

Con este valor ya estamos en disposición de entrar en la tabla de conductores (**Anexo 6**), y seleccionar el hilo que mejor se adecue a la sección calculada

TABLA DE CONDUCTORES DE SECCIÓN CIRCULAR

Tamaño nominal del conductor		Resistencia a 20°C (Ω/m)		Diámetro total para conductores esmaltados de Cu y Al (mm)			Diámetro total para conductores de cobre (mm) aislados con:							
							Papel		Algodón				Fibra de vidrio	
		Diámetro (mm)	Área (mm²)	IS: 4800(I)		IS: 4800 (II)			IS: 3454		IS: 450		IS: 4685	
Cu	Al			Fino	Medio	Grueso	Ordinario	Fino	Ordinario	Fino	Ordinario	Fino	Simple Capa	Doble capa
0,020	0,0003142	54,88000	-	0,025	0,027	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,025	0,0004909	35,12000	-	0,031	0,034	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,032	0,0008043	21,44000	-	0,040	0,043	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,040	0,0012570	13,72000	-	0,050	0,054	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,050	0,001964	8,781000	-	0,062	0,068	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,063	0,003118	5,531000	-	0,078	0,085	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,071	0,003960	4,355000	-	0,088	0,095	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,080	0,005027	3,430000	-	0,098	0,105	0,116	-	-	-	-	-	-	-	-
0,090	0,006363	2,710000	-	0,110	0,117	0,128	-	-	-	-	-	-	-	-
0,100	0,007855	2,915000	-	0,121	0,129	0,141	-	-	-	-	-	-	-	-
0,112	0,009853	1,750000	-	0,134	0,143	0,155	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125	0,012270	1,405000	-	0,149	0,159	0,171	-	-	-	-	-	-	-	-
0,140	0,01540	1,120000	-	0,166	0,176	0,189	-	-	0,244	0,229	0,371	0,295	-	-
0,160	0,02011	0,857500	-	0,187	0,199	0,213	-	-	0,264	0,249	0,391	0,315	-	-
0,180	0,02545	0,677500	-	0,209	0,222	0,237	-	-	0,284	0,269	0,411	0,335	-	-
0,200	0,03142	0,548800	0,89130	0,230	0,245	0,261	-	-	0,304	0,289	0,431	0,355	-	-
0,224	0,03941	0,437500	0,71050	0,256	0,272	0,290	-	-	0,354	0,326	0,481	0,404	-	-
0,250	0,04909	0,351200	0,57040	0,284	0,301	0,320	0,500	0,425	0,380	0,352	0,507	0,430	0,380	0,456
0,280	0,06158	0,280000	0,45470	0,315	0,334	0,353	0,530	0,455	0,410	0,382	0,537	0,461	0,410	0,486
0,315	0,07794	0,221200	0,35930	0,352	0,371	0,391	0,565	0,490	0,445	0,417	0,572	0,496	0,445	0,521
0,355	0,09899	0,17420	0,28290	0,395	0,414	0,435	0,605	0,530	0,486	0,458	0,613	0,531	0,486	0,562
0,400	0,12570	0,13720	0,22280	0,442	0,462	0,483	0,650	0,575	0,531	0,503	0,658	0,582	0,531	0,607
0,450	0,15910	0,10840	0,17610	0,495	0,516	0,538	0,700	0,625	0,582	0,554	0,709	0,632	0,582	0,658
0,500	0,19640	0,08781	0,14260	0,548	0,569	0,591	0,750	0,675	0,632	0,604	0,759	0,683	0,632	0,708
0,560	0,24630	0,07000	0,11370	0,611	0,632	0,658	0,810	0,735	0,693	0,665	0,820	0,744	0,693	0,769
0,630	0,3118	0,05531	0,08982	0,684	0,706	0,730	0,880	0,805	0,763	0,736	0,891	0,814	0,763	0,839
0,710	0,3960	0,04355	0,07072	0,757	0,790	0,815	0,985	0,885	0,869	0,842	0,997	0,895	0,844	0,920
0,750	0,4418	0,03903	0,06338	0,809	0,832	0,858	1,025	0,925	0,910	0,882	1,037	0,935	0,885	0,961
0,800	0,5027	0,03430	0,05570	0,861	0,885	0,911	1,075	0,975	0,960	0,933	1,087	0,986	0,935	1,011
0,850	0,5675	0,03038	0,04934	0,918	0,937	0,964	1,125	1,025	1,011	0,983	1,138	1,036	0,986	1,062
0,900	0,6363	0,02710	0,04401	0,965	0,990	1,017	1,175	1,075	1,081	1,034	1,188	1,087	1,036	1,112
0,950	0,7089	0,02432	0,03950	1,017	1,041	1,070	1,225	1,125	1,112	1,084	1,239	1,137	1,087	1,163
1,000	0,7855	0,02195	0,03565	1,068	1,093	1,123	1,275	1,200	1,162	1,135	1,290	1,215	1,135	1,215
1,060	0,8826	0,01954	0,03173	1,130	1,155	1,184	1,335	1,260	1,225	1,195	1,350	1,275	1,200	1,275
1,120	0,9853	0,01750	0,02842	1,192	1,217	1,246	1,395	1,320	1,285	1,255	1,310	1,335	1,260	1,335
1,180	1,0937	0,015770	0,025600	1,254	1,279	1,308	1,455	1,380	1,345	1,315	1,470	1,395	1,320	1,395
1,250	1,2273	0,014050	0,022820	1,325	1,351	1,381	1,525	1,450	1,415	1,385	1,540	1,465	1,390	1,465
1,320	1,3687	0,012600	0,020460	1,397	1,423	1,453	1,595	1,520	1,485	1,460	1,615	1,535	1,460	1,535
1,400	1,5396	0,011200	0,018190	1,479	1,506	1,535	1,700	1,575	1,590	1,565	1,720	1,645	1,540	1,615
1,500	1,7674	0,009757	0,015840	1,581	1,608	1,638	1,800	1,675	1,695	1,665	1,820	1,745	1,640	1,720
1,600	2,0109	0,008575	0,013930	1,683	1,711	1,741	1,900	1,775	1,795	1,765	1,920	1,845	1,745	1,820
1,700	2,2701	0,007596	0,012340	1,785	1,813	1,844	2,000	1,875	1,895	1,865	2,020	1,945	1,845	1,920
1,800	2,5450	0,006775	0,011000	1,888	1,916	1,947	2,100	1,975	1,995	1,970	2,125	2,045	1,945	2,020
1,900	2,8357	0,006081	0,009876	1,990	2,018	2,049	2,200	2,075	2,095	2,070	2,225	2,150	2,045	2,120
2,000	3,1420	0,005488	0,008913	2,092	2,120	2,152	2,350	2,250	2,225	2,195	2,375	2,275	2,145	2,225
2,120	3,5304	0,004884	0,007932	2,214	2,243	2,275	2,470	2,370	2,345	2,315	2,495	2,395	-	2,395
2,240	3,9413	0,004375	0,007105	2,336	2,366	2,398	2,590	2,490	2,465	2,440	2,620	2,515	-	2,515
2,360	4,3749	0,003941	0,006401	2,459	2,488	2,522	2,710	2,610	2,585	2,560	2,740	2,635	-	2,640
2,500	4,9093	0,003512	0,005704	2,601	2,631	2,665	2,850	2,725	2,730	2,700	2,880	2,780	-	2,780
2,650	5,5162	0,003126	0,005077	2,754	2,784	2,819	3,000	2,875	2,830	2,850	3,035	2,930	-	2,930
2,800	6,1583	0,002800	0,004547	2,907	2,938	2,972	3,150	3,025	3,030	3,005	3,185	3,080	-	3,080
3,000	7,0695	0,002439	0,003961	3,110	3,142	3,176	3,350	3,225	3,235	3,205	3,385	3,285	-	3,285
3,150	7,7941	0,002212	0,003593	3,263	3,284	3,300	3,500	3,375	3,385	3,355	3,540	3,435	-	3,435
3,350	8,8153	0,001956	0,003177	3,466	3,498	3,534	3,700	3,575	3,585	3,560	3,740	3,635	-	3,690
3,550	9,8993	0,001742	0,002829	3,670	3,702	3,738	3,900	3,775	3,790	3,760	3,940	3,840	-	3,890
3,750	11,0461	0,001561	0,002535	3,873	3,905	3,942	4,100	3,975	3,990	3,965	4,145	4,040	-	4,095
4,000	12,5680	0,001372	0,002228	4,127	4,160	4,196	4,350	4,300	4,245	4,125	4,395	4,295	-	4,345
4,250	14,1881	0,001215	0,001974	4,380	4,414	4,451	4,600	4,550	4,495	4,470	4,650	4,545	-	-
4,500	15,9064	0,001084	0,001761	4,634	4,668	4,705	4,850	4,800	4,750	4,720	4,900	4,800	-	-
4,750	17,7209	0,000973	0,001580	4,889	4,923	4,961	5,100	5,050	5,000	4,975	5,155	5,050	-	-
5,000	19,6370	0,0008781	0,001426	5,142	5,177	5,215	5,350	5,300	5,225	5,225	5,405	5,305	-	-

Tabla 3 Tabla de conductores de sección circular

Fuente: Tablas, fórmulas y gráficas para el cálculo de máquinas asíncronas (Miguel Ángel Rodríguez Pozueta)

Tenemos que para una sección mínima necesaria (S) de $6,78 \text{ mm}^2$, la sección más cercana será de $7,0695 \text{ mm}^2$. Para esta, tenemos que el tamaño nominal del conductor, tiene un diámetro de 3 mm y que si le añadimos un esmaltado fino este diámetro pasa a $3,11 \text{ mm}$.

Para continuar con los cálculos, tomamos la decisión de limitar la corriente máxima del inductor I a 20 A , para así limitar lo máximo posible las pérdidas del cobre, sin salir penalizados en la cantidad de cobre a emplear.

Para la intensidad máxima fijada y la sección de hilo seleccionada, tenemos que la densidad de corriente es de $2,83 \text{ A/mm}^2$.

Así mismo mediante el empleo de la ecuación 1) llegamos a que las espiras necesarias por polo (N_p) para generar la f.m.m. calculada son $131,8$. Como este valor tiene que ser exacto redondeamos a 132 .

Ahora ya estamos en disposición de calcular mediante la expresión 2) la resistencia total de los arrollamientos de todos los polos (R), que tendrá un valor de $0,67 \Omega$.

La intensidad máxima (I_{\max}), empleando la Ley de Ohm, será de $20,83 \text{ A}$.

Con la nueva intensidad máxima calculada (I_{\max}) y después de haber redondeado el número de espiras por polo (N_p), calculamos a f.m.m. máxima (F_{\max}) que seremos capaces de generar. Esta f.m.m. máxima será igual a $2749,1 \text{ Av}$.

Por último, contabilizar las pérdidas en el cobre por efecto Joule que tendrán un valor medio, P_{cu} , de 268 W y un valor de pico de, P_{cumax} , 291 W

Finalmente, para cerrar el diseño del devanado del inductor, calcularemos el número de capas de conductor que es posible apilar, y la longitud axial de la bobina.

Para calcular el número de capas que es posible apilar, basta con dividir el espacio disponible entre polo y polo (j) entre el diámetro del conductor con

esmalte fino. Esto nos da como resultado que es posible apilar un máximo de 2 capas.

Para calcular la longitud axial de la bobina, basta con multiplicar el número de espiras necesarias por polo (N_p) por el diámetro del conductor con esmalte fino, y dividirlo entre el número de capas. De esta operación obtendremos que necesitamos 198 mm de espacio axial disponible.

Justificación de cálculo 7

CONSIDERACIONES FINALES EN EL DISEÑO DEL INDUCTOR A

Tras todos los cálculos efectuados en este apartado, ya se está en disposición de plasmar sobre el plano todos los resultados obtenidos (**Plano 4**).

Dado que esta aparte de la máquina no se va a encontrar girando no resulta excesivamente relevante el material del que esté compuesto, salvo que este cumpla con el cometido, que es, transportar el flujo magnético (**Anexo 7**).

Otra de las características de esta pieza, es que deberá carecer de movimiento con respecto al eje. Para ello se empleará un rodamiento, o cualquier dispositivo similar, para conseguir un movimiento libre del eje y a su vez poder apoyar el inductor sin que este gire.

Analizando los resultados obtenidos y los planos generados, a priori está máquina no es muy compacta, ya que nos exige una longitud axial del núcleo polar de 206 mm. Esto plantea un problema, ya que la máquina resultante presenta unas dimensiones bastante exageradas, para estar albergado en el interior del capó de un coche. Es por esto que este diseño queda descartado, y se trabajará en la búsqueda de otro modelo más compacto y funcional.

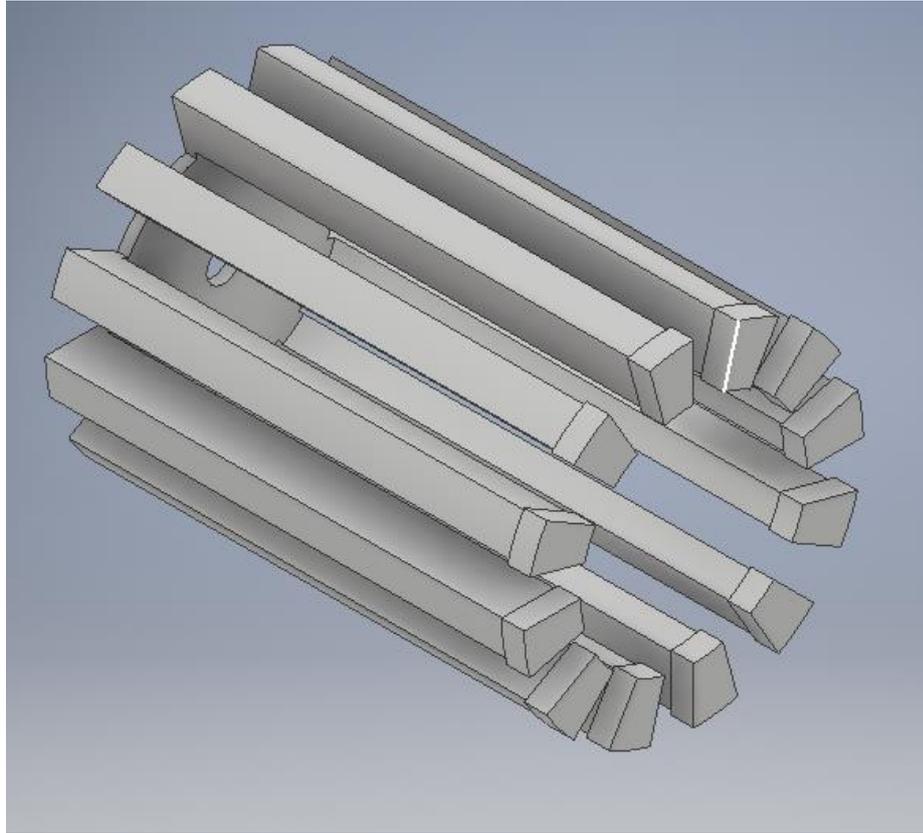


Ilustración 20 Diseño del inductor

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

INDUCTOR B)

ARROLLAMIENTO DEL INDUCTOR

Como segunda alternativa ante el fallo de la anterior se propone, el diseño de un inductor similar al de garras, en el cual tenemos un único bobinado concentrado, por el que pasa todo el flujo generado (Ilustración 22).

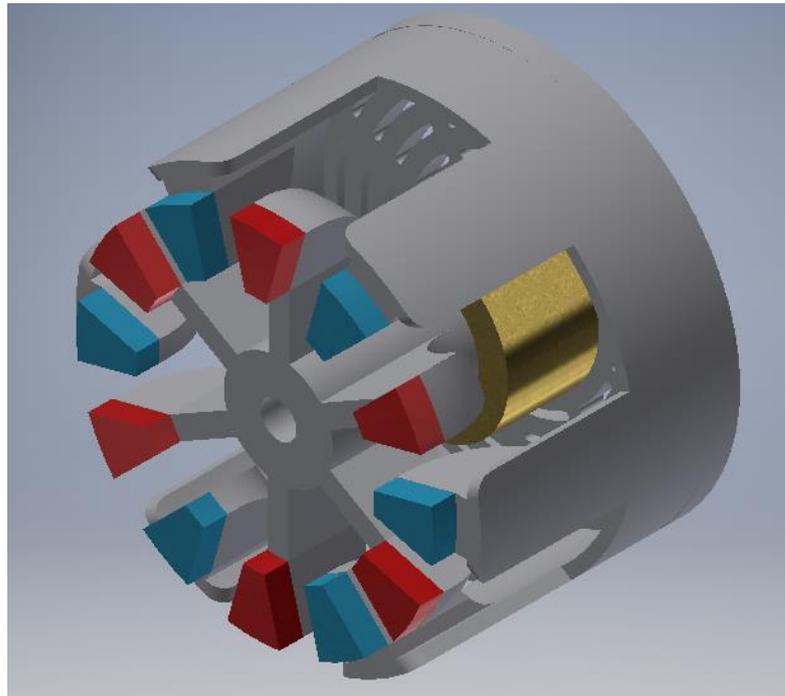


Ilustración 21 Inductor con bobina concentrada

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

Ventaja: A diferencia de en el caso anterior tenemos un gran espacio radial y axial disponible para la colocación del arrollamiento inductor. Esto hace, que aunque ahora el flujo que circula por la bobina sea más grande, el espacio disponible sea más que suficiente para albergar el arrollamiento.

Desventaja: La colocación del bobinado en muchas capas, hará que tengamos una gran concentración de calor en el eje sobre el que va el arrollamiento. Otra desventaja, es que debido a la complejidad de las superficies generadas, los flujos de dispersión serán muy altos

La ilustración anteriormente mostrada, es un esbozo de lo que esperamos diseñar en los siguientes pasos.

Dado que no podemos estar seguros de la viabilidad o no del tipo de arrollamiento planteado, lo que vamos a hacer es proceder con el cálculo de los parámetros necesarios, hasta llegar a la sección necesaria de cable, momento en el cual sabremos si es posible o no el empleo de esta solución.

DISEÑO DEL CILINDRO INTERIOR: LONGITUD DE MEDIA ESPIRA

Para obtener la longitud de la espira lo primero que necesitamos, es conocer los espacios útiles, para la colocación del arrollamiento. Previo a todo esto se nos plantea una incógnita, que es conocer la sección del núcleo polar. En este caso el núcleo polar no se encontrará en cada uno de los polos, sino que se encontrará debajo del arrollamiento, en la zona axial del inductor que vamos a diseñar.

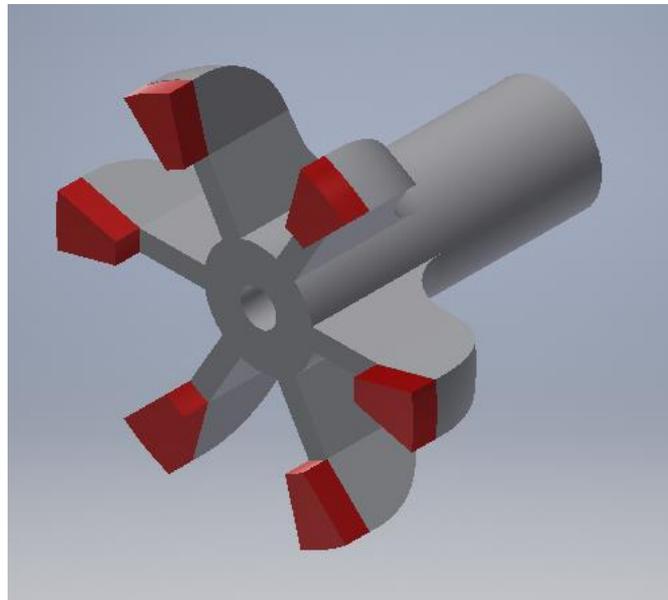


Ilustración 22 Diseño del cilindro interior del inductor junto a sus polos

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

En este núcleo polar, tendremos como incógnita dos cotas (Ilustración 24). Una será el diámetro del eje (d_{eje}) que va a pasar por el interior del inductor y sobre el cual va a estar girando el inducido. La otra incógnita, será el diámetro externo del núcleo polar (d_{en}). La sección contenida en estas cotas deberá ser tal, que sea capaz de conducir el flujo de los polos del inductor.

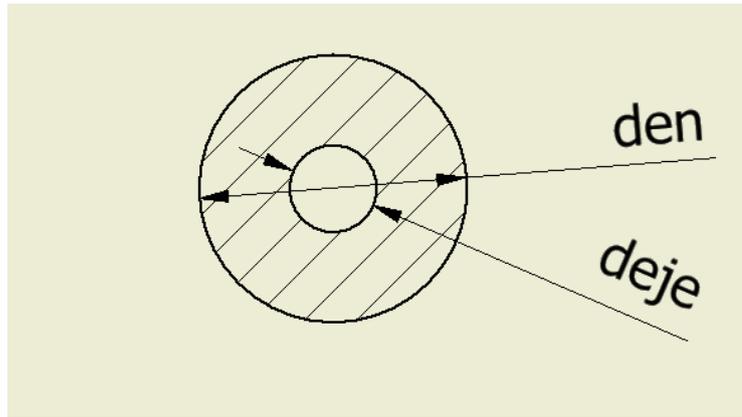


Ilustración 23 Diámetros incógnita

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

La primera incógnita, que es el tamaño del eje, la resolveremos adoptando el tamaño de eje que porta el actual alternador de garras. En concreto empleamos uno facilitado por Robert Bosch, que se trataría de un alternador de vehículo utilitario común. Este tiene un diámetro de 15 mm, por lo que decidimos adoptar este tamaño como diámetro del eje (d_{eje}).

El siguiente paso, es saber cuál es el flujo total que va a circular por el interior de la bobina (ϕ_{bob}). En el inductor A) calculamos el flujo que necesitábamos para cada polo (ϕ_p), que era consecuencia de multiplicar el flujo del inducido por un factor corrector de las dispersiones (ϕ_f). En este caso el flujo que pasará por el arrollamiento no será el de un único polo sino que será el de p polos, por lo que tendremos que el flujo total que atraviesa la bobina, será de 6 veces el de un polo. Es por esto que tendremos un flujo total de 0,002248 Wb.

Del anterior inductor, también conocemos que el valor de la inducción máxima en el hierro (B_{mnp}) es de 1,5 T. Este valor se mantendrá para este segundo diseño de inducido.

Con estos datos ya estaremos en condiciones de calcular la sección del núcleo polar (S_{np}) que será el resultado de dividir, el flujo de la bobina (ϕ_{bob}) entre el valor de la inducción máxima (B_{mnp}). Esto nos arrojará un resultado 1498,65 mm².

Como ya tenemos el diámetro del eje (d_{eje}), y la sección del núcleo polar (S_{np}), el cálculo del diámetro del núcleo polar (d_{en}), será directo. Este diámetro será de 46 mm.

Todo esto quedará reflejado en la Ilustración 25:

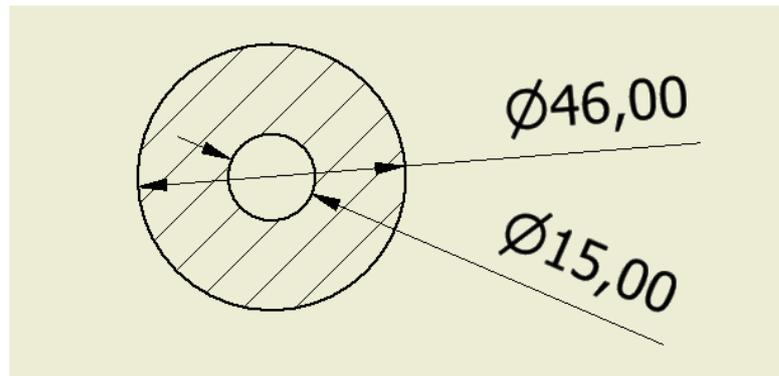


Ilustración 24 Solución de diámetros

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

Para calcular la longitud de media espira (l_1), únicamente nos queda conocer un último dato, que es la máxima dimensión radial que puede tener esta (d_{ebob}). Estimamos, que dado que la zona de los polos se encuentra entre los diámetros 100 mm y 150 mm, lo mejor es que la bobina tenga como diámetro máximo 80 mm. Con estos datos calcularemos la longitud de media espira como la longitud de espira que se puede conseguir entre los diámetros anteriormente citados. Nos queda una longitud de media espira de 197,92 mm.

Justificación de cálculo 8

DIMENSIONADO DEL ARROLLAMIENTO

Para el dimensionado del arrollamiento seguiremos los mismos pasos que durante el diseño del arrollamiento. En este caso nos saltaremos el paso del cálculo de la f.m.m. polar, ya que en este caso, la f.m.m. polar (F_p) del Inductor A), coincidirá con la f.m.m del bobinado (F_{bob}) en el inductor B. Está tomará un valor de 2627,64 Av.

A continuación, vamos a calcular la sección de hilo conductor. Para ello nos vamos a aprovechar de la definición de f.m.m.

Como sabemos la f.m.m. $F = N_p \cdot I$

Donde N_p es el número de espiras e I la intensidad que circula por las mismas.1)

$$1) \text{ Aplicando la ley de Ohm donde } I = \frac{V}{R} \text{ llegamos a que } F = N_p \cdot \frac{V}{R}$$

Conocemos la f.m.m. y la tensión a la que va a trabajar el inductor, sin embargo, no conocemos la resistencia del bobinado:

$$2) \text{ La resistencia del bobinado } R = \frac{N_p \cdot l_1 \cdot \rho}{S}$$

Donde N_p es el número de espiras por polo, l_1 es la longitud de media espira, ρ la resistividad del cobre y S la sección del mismo.

Despejando en la primera ecuación 1):

$$3) F = \frac{V \cdot S}{l_1 \cdot \rho} \rightarrow \text{Sección del hilo conductor } S = \frac{l_1 \cdot \rho \cdot F}{V}$$

El último paso antes de calcular la sección del hilo conductor es conocer la resistividad ρ a la temperatura de trabajo. Dado que no la conocemos, estimamos una temperatura de trabajo de 150 °C, obteniendo una resistividad interpolando de 0,026 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ (**Anexo 5**).

Dando valores a la ecuación 4), obtenemos que la sección necesaria de cobre es de $S = 0,97 \text{ mm}^2$.

Con este valor ya estamos en disposición de entrar en la tabla de conductores (Anexo 6), y seleccionar el hilo que mejor se adecue a la sección calculada

TABLA DE CONDUCTORES DE SECCIÓN CIRCULAR

Tamaño nominal del conductor		Resistencia a 20°C (Ω/m)		Diámetro total para conductores esmaltados de Cu y Al (mm)			Diámetro total para conductores de cobre (mm) aislados con:								
							Papel		Algodón		Fibra de vidrio				
		Diámetro (mm)	Área (mm²)	IS: 4800(I)		IS: 4800 (II)			IS: 3454		IS: 450		IS: 4605		
Cu	Al			Fino	Medio	Grueso	Ordinario	Fino	Ordinario	Fino	Ordinario	Fino	Simple Capa	Doble capa	
0,020	0,0003142	54,88000	-	0,025	0,027	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,025	0,0004909	35,12000	-	0,031	0,034	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,032	0,0008043	21,44000	-	0,040	0,043	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,040	0,0012570	13,72000	-	0,050	0,054	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,050	0,001964	8,781000	-	0,062	0,068	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,063	0,003118	5,531000	-	0,078	0,085	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,071	0,003960	4,355000	-	0,088	0,095	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,080	0,005027	3,430000	-	0,098	0,105	0,116	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,090	0,006363	2,710000	-	0,110	0,117	0,128	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,100	0,007855	2,915000	-	0,121	0,129	0,141	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,112	0,009853	1,750000	-	0,134	0,143	0,155	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125	0,012270	1,405000	-	0,149	0,159	0,171	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,140	0,01540	1,120000	-	0,166	0,176	0,189	-	-	0,244	0,229	0,371	0,295	-	-	-
0,160	0,02011	0,857500	-	0,187	0,199	0,213	-	-	0,264	0,249	0,391	0,315	-	-	-
0,180	0,02545	0,677500	-	0,209	0,222	0,237	-	-	0,284	0,269	0,411	0,335	-	-	-
0,200	0,03142	0,548800	0,89130	0,230	0,245	0,261	-	-	0,304	0,289	0,431	0,355	-	-	-
0,224	0,03941	0,437500	0,71050	0,256	0,272	0,290	-	-	0,354	0,326	0,481	0,404	-	-	-
0,250	0,04909	0,351200	0,57040	0,284	0,301	0,320	0,500	0,425	0,380	0,352	0,507	0,430	0,380	0,456	-
0,280	0,06158	0,280000	0,45470	0,315	0,334	0,353	0,530	0,455	0,410	0,382	0,537	0,461	0,410	0,486	-
0,315	0,07794	0,221200	0,35930	0,352	0,371	0,391	0,565	0,490	0,445	0,417	0,572	0,496	0,445	0,521	-
0,355	0,09899	0,17420	0,28290	0,395	0,414	0,435	0,605	0,530	0,486	0,458	0,613	0,531	0,486	0,562	-
0,400	0,12570	0,13720	0,22280	0,442	0,462	0,483	0,650	0,575	0,531	0,503	0,658	0,582	0,531	0,607	-
0,450	0,15910	0,10840	0,17610	0,495	0,516	0,538	0,700	0,625	0,582	0,554	0,709	0,632	0,582	0,658	-
0,500	0,19640	0,08781	0,14260	0,548	0,569	0,591	0,750	0,675	0,632	0,604	0,759	0,683	0,632	0,708	-
0,560	0,24630	0,07000	0,11370	0,611	0,632	0,658	0,810	0,735	0,693	0,665	0,820	0,744	0,693	0,769	-
0,630	0,3118	0,05531	0,08982	0,684	0,706	0,730	0,880	0,805	0,763	0,736	0,891	0,814	0,763	0,839	-
0,710	0,3960	0,04355	0,07072	0,757	0,790	0,815	0,985	0,885	0,869	0,842	0,997	0,895	0,844	0,920	-
0,750	0,4418	0,03903	0,06338	0,809	0,832	0,858	1,025	0,925	0,910	0,882	1,037	0,935	0,885	0,961	-
0,800	0,5027	0,03430	0,05570	0,861	0,885	0,911	1,075	0,975	0,960	0,933	1,087	0,986	0,935	1,011	-
0,850	0,5675	0,03038	0,04934	0,918	0,937	0,964	1,125	1,025	1,011	0,983	1,138	1,036	0,986	1,062	-
0,900	0,6363	0,02710	0,04401	0,965	0,990	1,017	1,175	1,075	1,081	1,034	1,188	1,087	1,036	1,112	-
0,950	0,7089	0,02432	0,03950	1,017	1,041	1,070	1,225	1,125	1,112	1,084	1,239	1,137	1,087	1,163	-
1,000	0,7855	0,02195	0,03565	1,068	1,093	1,123	1,275	1,200	1,162	1,135	1,290	1,215	1,135	1,215	-
1,060	0,8826	0,01954	0,03173	1,130	1,155	1,184	1,335	1,260	1,225	1,195	1,350	1,275	1,200	1,275	-
1,120	0,9853	0,01750	0,02842	1,192	1,217	1,246	1,395	1,320	1,285	1,255	1,310	1,335	1,260	1,335	-
1,180	1,0937	0,015770	0,025600	1,254	1,279	1,308	1,455	1,380	1,345	1,315	1,470	1,395	1,320	1,395	-
1,250	1,2273	0,014050	0,022820	1,325	1,351	1,381	1,525	1,450	1,415	1,385	1,540	1,465	1,390	1,465	-
1,320	1,3687	0,012600	0,020460	1,397	1,423	1,453	1,595	1,520	1,485	1,460	1,615	1,535	1,460	1,535	-
1,400	1,5396	0,011200	0,018190	1,479	1,506	1,535	1,700	1,575	1,590	1,565	1,720	1,645	1,540	1,615	-
1,500	1,7674	0,009757	0,015840	1,581	1,608	1,638	1,800	1,675	1,695	1,665	1,820	1,745	1,640	1,720	-
1,600	2,0109	0,008575	0,013930	1,683	1,711	1,741	1,900	1,775	1,795	1,765	1,920	1,845	1,745	1,820	-
1,700	2,2701	0,007596	0,012340	1,785	1,813	1,844	2,000	1,875	1,895	1,865	2,020	1,945	1,845	1,920	-
1,800	2,5450	0,006775	0,011000	1,888	1,916	1,947	2,100	1,975	1,995	1,970	2,125	2,045	1,945	2,020	-
1,900	2,8357	0,006081	0,009876	1,990	2,018	2,049	2,200	2,075	2,095	2,070	2,225	2,150	2,045	2,120	-
2,000	3,1420	0,005488	0,008913	2,092	2,120	2,152	2,350	2,250	2,225	2,195	2,375	2,275	2,145	2,225	-
2,120	3,5304	0,004884	0,007932	2,214	2,243	2,275	2,470	2,370	2,345	2,315	2,495	2,395	-	2,395	-
2,240	3,9413	0,004375	0,007105	2,336	2,366	2,398	2,590	2,490	2,465	2,440	2,620	2,515	-	2,515	-
2,360	4,3749	0,003941	0,006401	2,459	2,488	2,522	2,710	2,610	2,585	2,560	2,740	2,635	-	2,640	-
2,500	4,9093	0,003512	0,005704	2,601	2,631	2,665	2,850	2,725	2,730	2,700	2,880	2,780	-	2,780	-
2,650	5,5162	0,003126	0,005077	2,754	2,784	2,819	3,000	2,875	2,830	2,850	3,035	2,930	-	2,930	-
2,800	6,1583	0,002800	0,004547	2,907	2,938	2,972	3,150	3,025	3,030	3,005	3,185	3,080	-	3,080	-
3,000	7,0695	0,002439	0,003961	3,110	3,142	3,176	3,350	3,225	3,235	3,205	3,385	3,285	-	3,285	-
3,150	7,7941	0,002212	0,003593	3,263	3,284	3,330	3,500	3,375	3,385	3,355	3,540	3,435	-	3,435	-
3,350	8,8153	0,001956	0,003177	3,466	3,498	3,534	3,700	3,575	3,585	3,560	3,740	3,635	-	3,690	-
3,550	9,8993	0,001742	0,002829	3,670	3,702	3,738	3,900	3,775	3,790	3,760	3,940	3,840	-	3,890	-
3,750	11,0461	0,001561	0,002535	3,873	3,905	3,942	4,100	3,975	3,990	3,965	4,145	4,040	-	4,095	-
4,000	12,5680	0,001372	0,002228	4,127	4,160	4,196	4,350	4,300	4,245	4,125	4,395	4,295	-	4,345	-
4,250	14,1881	0,001215	0,001974	4,380	4,414	4,451	4,600	4,550	4,495	4,470	4,650	4,545	-	-	-
4,500	15,9064	0,001084	0,001761	4,634	4,668	4,705	4,850	4,800	4,750	4,720	4,900	4,800	-	-	-
4,750	17,7209	0,000973	0,001580	4,889	4,923	4,961	5,100	5,050	5,000	4,975	5,155	5,050	-	-	-
5,000	19,6370	0,0008781	0,001426	5,142	5,177	5,215	5,350	5,300	5,225	5,225	5,405	5,305	-	-	-

Tabla 4 Tabla de conductores de sección circular

Fuente: Tablas, fórmulas y gráficas para el cálculo de máquinas asíncronas (Miguel Ángel Rodríguez Pozueta)

Tenemos que para una sección mínima necesaria (S) de $0,97 \text{ mm}^2$, la sección más cercana será de $0,9853 \text{ mm}^2$. Para esta, tenemos que el tamaño nominal del conductor, tiene un diámetro de $1,120 \text{ mm}$ y que si le añadimos un esmaltado fino este diámetro pasa a $1,192 \text{ mm}$.

Si fijamos la densidad de corriente máxima en un valor estimado de 3 A/mm^2 tendremos que multiplicándolo por la sección de conductor obtenida (S) la intensidad (I) circulando por la bobina, será de $2,96 \text{ A}$.

Mediante el empleo de la ecuación 1) llegamos a que las espiras necesarias (N) para generar la f.m.m. calculada son $889,74$. Como este valor tiene que ser exacto redondeamos a 900 espiras.

Ahora ya estamos en disposición de calcular mediante la expresión 2) la resistencia total del bobinado (R), que tendrá un valor de $4,7 \Omega$.

La intensidad máxima (I_{max}), empleando el Ley de Ohm, será de $2,98 \text{ A}$.

Por último, contabilizar las pérdidas en el cobre por efecto Joule. Estas pérdidas tendrán un valor medio, P_{cu} , de $41,07 \text{ W}$ y unos valores de pico de, P_{cumax} , $41,69 \text{ W}$.

Finalmente, para cerrar el diseño del devanado del inductor, calcularemos el número de capas de conductor que es posible apilar, y la longitud axial de la bobina.

Para calcular el número de capas que es posible apilar basta con dividir el espacio radial disponible (j_{radial}) entre el diámetro del conductor con esmalte fino. Para calcular el espacio radial disponible restaremos el diámetro exterior del bobinado (d_{eb}), estimado anteriormente, del diámetro externo del núcleo polar (d_{en}). Todos estos cálculos nos darán como resultado, que es posible apilar un máximo de 14 capas de conductor.

Para calcular la longitud axial de la bobina, basta con multiplicar el número de espiras (N) por el diámetro del conductor con esmalte fino, y dividirlo entre el

número de capas. De esta operación obtendremos que necesitamos 76,6 mm de espacio axial disponible.

Justificación de cálculo 9

DISEÑO DE LOS POLOS INDUCTORES

Para el diseño de los polos inductores en el inductor B), seguiremos el mismo criterio que el empleado para el diseño de los polos del inductor A). El único punto que cambiará, será que en este caso no tendremos un cambio de sección que hará de núcleo polar y portará el bobinado, sino que tendremos una sección constante.

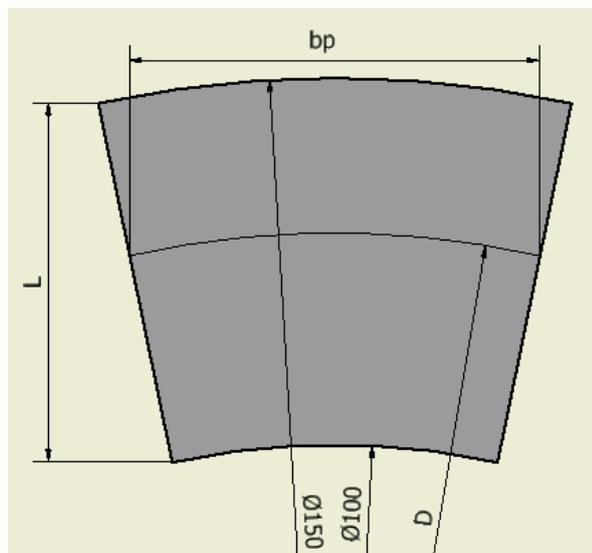


Ilustración 25 Diseño del polo inductor

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

Definiendo las variables tenemos que:

- $b_p \rightarrow$ ancho de la zapata polar
- $L \rightarrow$ longitud de la zapata polar
- $D \rightarrow$ diámetro medio

Adicionalmente partiremos de datos ya conocidos y calculados en el diseño del inducido:

- $2p = 12$ polos
- $D_{int} = 100$ mm
- $D_{ext} = 150$ mm

- $\varphi_f = 0,00031222 \text{ Wb}$

En primer lugar, calcularemos el diámetro medio D que será simplemente suma entre los diámetros de la zona “activa”, D_{int} y D_{ext} del inducido divididos entre dos. Esto nos dará como resultado que la longitud de la zapata del polo (L) toma un valor de 25 mm. De aquí deducimos que el diámetro medio D será igual a 125 mm

Con este valor nos resultará fácilmente calculable el paso polar medio τ_p . Esta magnitud se definirá como el perímetro de la circunferencia del diámetro medio dividido entre el número de polos. El valor obtenido nos indicará el ancho máximo que puede ocupar cada polo, que en este caso será de 32,7 mm.

Empleando la expresión que utilizamos para calcular el valor de la máxima inducción en un polo y sabiendo el valor de esta ($B_{mp}=1,5 \text{ T}$ según calculado en inductor A), estamos en disposición de calcular el ancho de la zapata polar:

$$B_{mp} = \frac{\Phi_p}{L_i * b_p * L}$$

Despejando, el ancho de la zapata polar (b_p) valdrá 15,7 mm.

En la siguiente ilustración, se podrá ver gráficamente los resultados representados, para una mejor comprensión de los mismos.

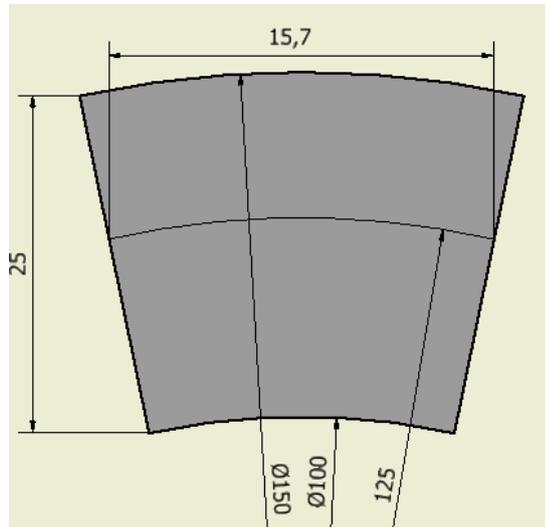


Ilustración 26 Representación gráfica de los resultados

Autor: Rodrigo Díez Fernández

Justificación de cálculo 10

DISEÑO DEL CILINDRO EXTERIOR

Para diseñar el cilindro exterior (Ilustración 28), emplearemos una metodología de cálculo idéntica a la empleada durante el diseño del “eje” del inductor. La apariencia que presentará este cilindro será más o menos similar a la de la siguiente imagen.

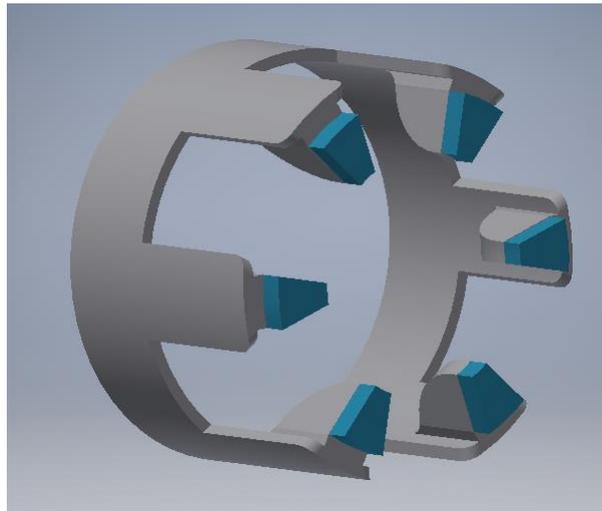


Ilustración 27 Diseño del cilindro exterior del inductor junto a sus polos

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

El flujo circulante por su sección (φ_{bob}) será el mismo que el de la bobina, que a su vez será 6 veces el de un polo (φ_p). Este flujo tomará un valor de 0,002248 Wb.

Del anterior inductor, también conocemos que el valor de la inducción máxima en el hierro (B_{mnp}) es de 1,5 T. Este valor se mantendrá para este cálculo también.

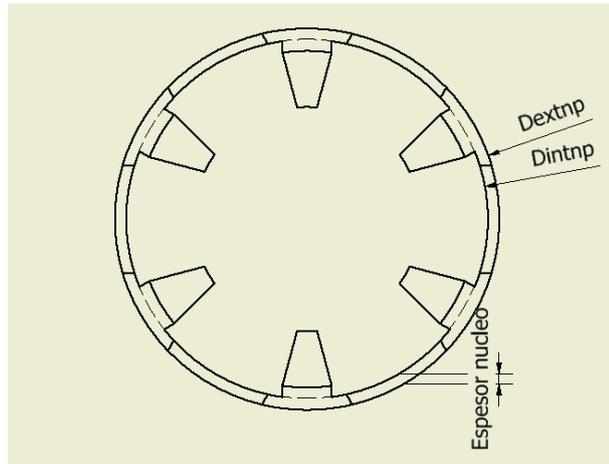


Ilustración 28 Variables cilindro exterior

Con estos datos ya estaremos en condiciones de calcular la sección del núcleo polar (S'_{np}) que será el resultado de dividir el flujo de la bobina (ϕ_{bob}) entre el valor de la inducción máxima (B_{mnp}). Esto nos arrojará un resultado $1498,65 \text{ mm}^2$.

A continuación, toca estimar el diámetro de la parte interna del cilindro exterior (D'_{intnp}). Decidimos que este sea 14 mm más que el diámetro externo de la zona activa de la máquina (D_{ext}). Esto nos da un valor de 164 mm.

Una vez tenemos la sección (S'_{np}) y el diámetro de la parte interna del cilindro exterior (D'_{intnp}) se calcula el diámetro de la parte externa del cilindro exterior (D_{extnp}), que toma un valor de 170 mm. Luego el espesor del cilindro exterior será de 3 mm.

Todos estos resultados quedarán plasmados en la ilustración 30.

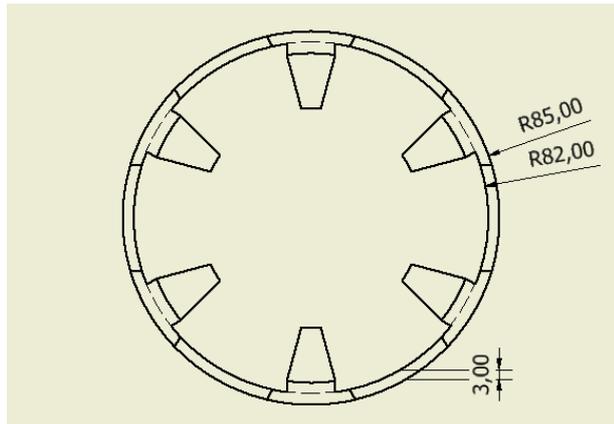


Ilustración 29 Representación gráfica de los resultados

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

Justificación de cálculo 11

DISEÑO DE LA TAPA LATERAL DEL INDUCTOR

La tapa del inductor (Ilustración 31), tendrá un diseño simple de disco, al cual añadiremos ranurados para una posible refrigeración del inductor por medio de algún ventilador solidario al eje.

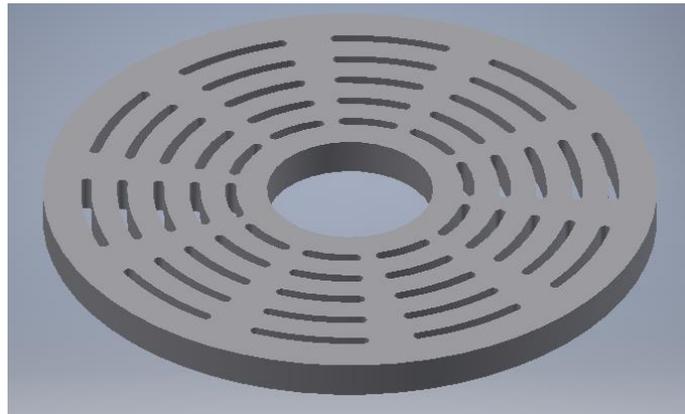


Ilustración 30 Diseño de la tapa del inductor

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

Emplearemos la misma sistemática de cálculo que en el diseño del cilindro exterior y el interior. Este cálculo tendrá una particularidad: la sección de paso del flujo (φ_b) va disminuyendo con el diámetro. Es por esto que calcularemos la anchura del disco (k) para la localización más crítica, que será la de menos diámetro y coincidirá con el diámetro exterior del núcleo polar (d_{en}). (Ilustración 32)

Tendremos que el flujo circulante por su sección (φ_{bob}) será el mismo que el de la bobina, que a su vez será 6 veces el de un polo (φ_p). Este flujo tomará un valor de 0,002248 Wb.

Del anterior inductor, también conocemos que el valor de la inducción máxima en el hierro (B_{mnp}) es de 1,5 T. Este valor se mantendrá para este cálculo también.

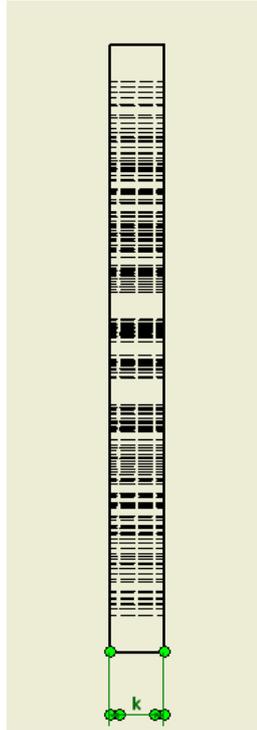


Ilustración 31 Variables de la tapa del inductor

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

Con estos datos ya estaremos en condiciones de calcular la sección del núcleo polar (S'_{np}) que será el resultado de dividir, el flujo de la bobina (ϕ_{bob}) entre el valor de la inducción máxima (B_{mnp}). Esto nos arrojará un resultado $1498,65 \text{ mm}^2$.

Con esto tendremos que la anchura del disco (k) será de 10 mm.

Dado que realizamos un ranurado de refrigeración y disminuimos la sección considerablemente, decidimos aplicar un margen de seguridad a la anchura del disco de 1,5, quedando una anchura final (k') de este de 15 mm. (Ilustración 33)

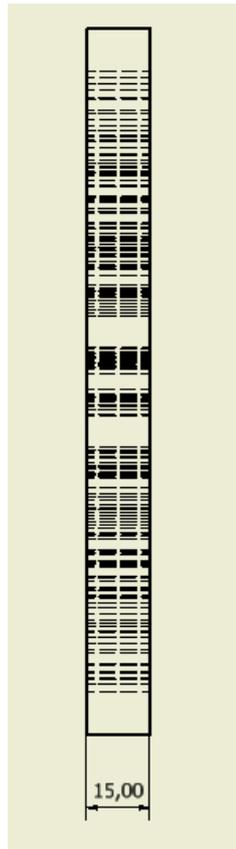


Ilustración 32 Representación gráfica de los resultados

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

Justificación de cálculo 12

CONSIDERACIONES FINALES EN EL DISEÑO DEL INDUCTOR B

Una vez terminados los cálculos anteriores, podemos comprobar que estamos en condiciones de ensamblar el conjunto y comprobar, si las variables determinadas se “sostienen” sobre el papel. El conjunto se compondrá, por un lado, del cilindro interior, por otro del cilindro exterior y finalmente cerrando el conjunto, la tapa de cierre.

- Cilindro interior: **Plano 5**
- Cilindro exterior: **Plano 6**
- Tapa de cierre: **Plano 7**

Una vez tenemos cada una de las piezas, diseñadas procedemos al montaje del conjunto, para comprobar que efectivamente todas las medidas son válidas:

Ensamblaje del conjunto: **Plano 8**

Como podemos ver todos los parámetros han sido correctamente calculados, y en todo momento se ha mantenido la integridad dimensional. El ajuste de las piezas es bueno y no es necesario modificar ninguna de las dimensiones calculadas.

En lo que al material empleado para fabricar el conjunto se refiere, haremos alusión a lo que ya se explicó en las consideraciones finales en el diseño del inductor A. Dado que el conjunto va a permanecer estático, este no va a estar sometido a grandes esfuerzos. Es por esto que se decide emplear acero común con alta permeabilidad magnética como componente principal del conjunto (más datos sobre el acero en el **Anexo 7**).

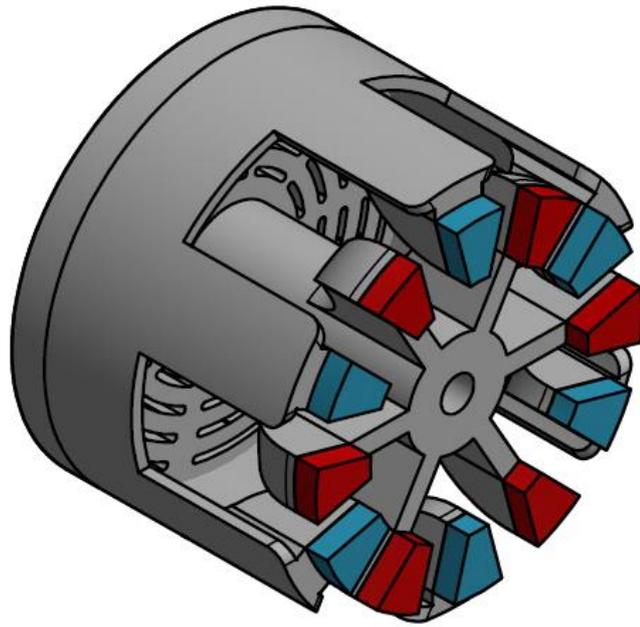


Ilustración 33 Inductor B ensamblado

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

Tras este resultado es fácil pensar que ya está totalmente cerrado el diseño, pero aún nos queda un último paso que es el cálculo del flujo de dispersión. Se decide esperar a este momento, por la simple razón de que necesitamos superficies comunes entre polos, y hasta que no tenemos el ensamblaje del conjunto, resulta difícil conocer estas.

FLUJOS DE DISPERSIÓN

Como en todas las máquinas eléctricas, la nuestra presentará flujos de dispersión. Los flujos de dispersión son flujos que saltan de un polo del inductor a otro.

Los flujos de dispersión no reducen el flujo principal. Se suma al flujo principal y esto hace que el flujo total sea mayor. Esto provoca que la inducción magnética aumente o, que si queremos mantener el valor de la inducción, debemos aumentar la superficie del núcleo magnético y de los polos.

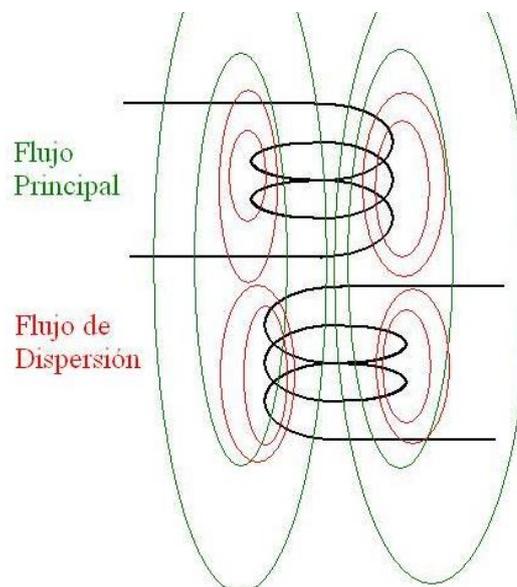


Ilustración 34 Flujos de dispersión

Fuente: Taringa.net

Para el cálculo de los flujos de dispersión emplearemos como literatura de referencia el libro “Design of Electrical Machines, escrito por K.G. Upadhyay. Emplearemos como referencia el cálculo de flujos de dispersión en el inductor de una máquina de polos saliente de flujo radial, y adaptaremos la formulación a nuestra máquina de polos salientes de flujo axial.

Según el libro consultado, el flujo de dispersión total, será resultado de la suma de 5 flujos. Estos 5 flujos serán:

1) Flujo de dispersión entre zapatas de polos contiguos (ϕ_i): este flujo de dispersión será consecuencia de la derivación de una parte del flujo principal, de la zapata de un polo al siguiente de signo contrario a través de las superficies laterales.

El flujo de dispersión entre polos contiguos (ϕ_i), quedará definido como:

$$\phi_i = 2 * F * \frac{\mu_o * A_c}{a_{ps}}$$

Donde:

- F es la f.m.m total generada = 900x2,98
- A_c es el área común entre los polos (Ilustración 36) = 20,25x9,785 mm²
- A_{ps} es la distancia entre polos contiguos (Ilustración 37) = 17,284 mm

Sacando gráficamente los datos del área común (A_c) y la separación entre polos (A_{ps}), obtenidos del diseño 3D, y sabiendo la f.m.m. de los cálculos anteriores, tendremos que el flujo de dispersión entre polos contiguos (ϕ_i) es de $7,76 \cdot 10^{-5}$ Wb.

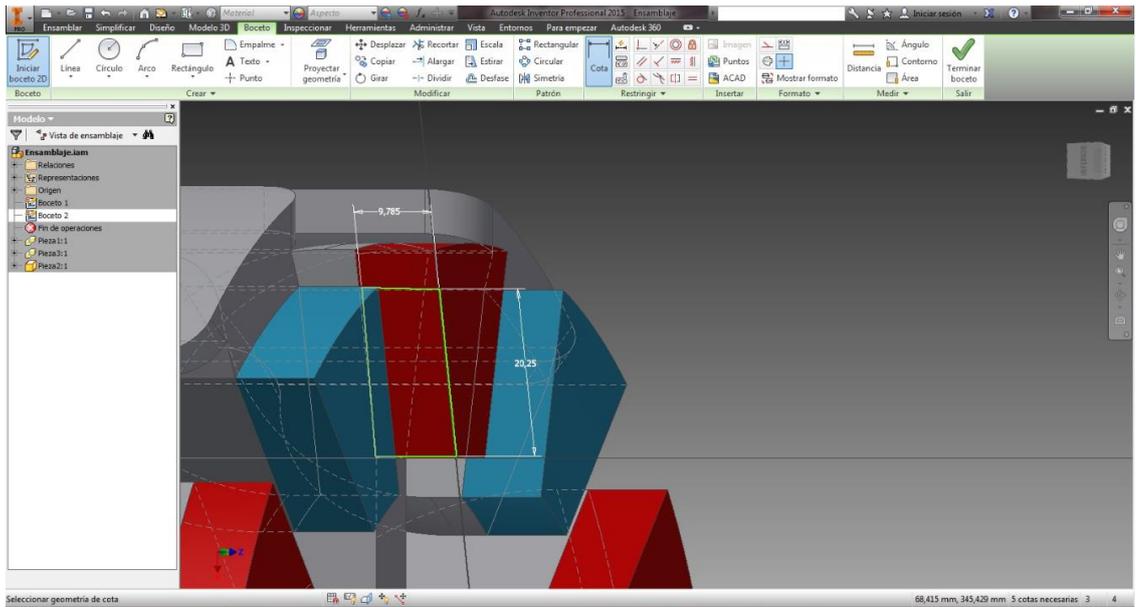


Ilustración 35 Área común entre polos Ac

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

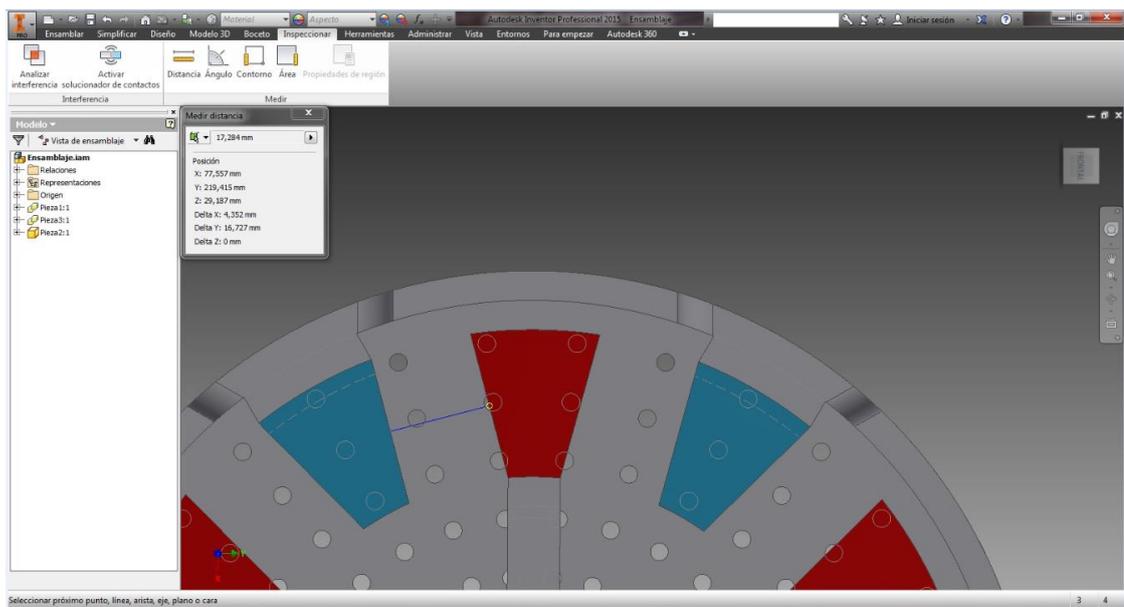


Ilustración 36 Distancia entre polos contiguos ap

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

2) Flujo de dispersión entre la parte superior de las zapatas polares (ϕ_{ii}): este flujo de dispersión, es el que se produce entre la parte superior de los polos, debido a un “salto” de las líneas de campo magnético entre las superficies axiales superiores de la zapata del polo.

El flujo de dispersión entre polos contiguos (ϕ_{ii}), quedará definido como:

$$\phi_{ii} = F * \frac{\mu_o}{\pi} * b * \left[\ln\left(1 + \frac{b_p * \pi}{2 * a_{ps}}\right) \right]$$

Donde:

- F es la f.m.m total generada = 900x2,98
- b es el espesor de la zapata polar (Ilustración 38) = 10 mm
- b_p la longitud de arco exterior del polo (Ilustración 39) = 2x10,964
- a_{ps} la distancia entre polos en la circunferencia exterior (Ilustración 40) = 2x8,656

Al igual que antes la f.m.m. ya la tenemos y el resto de variables las calcularemos gráficamente de donde obtendremos que el flujo de dispersión entre la parte superior de los polos (ϕ_{ii}), será igual a $1,175 \cdot 10^{-5}$ Wb.

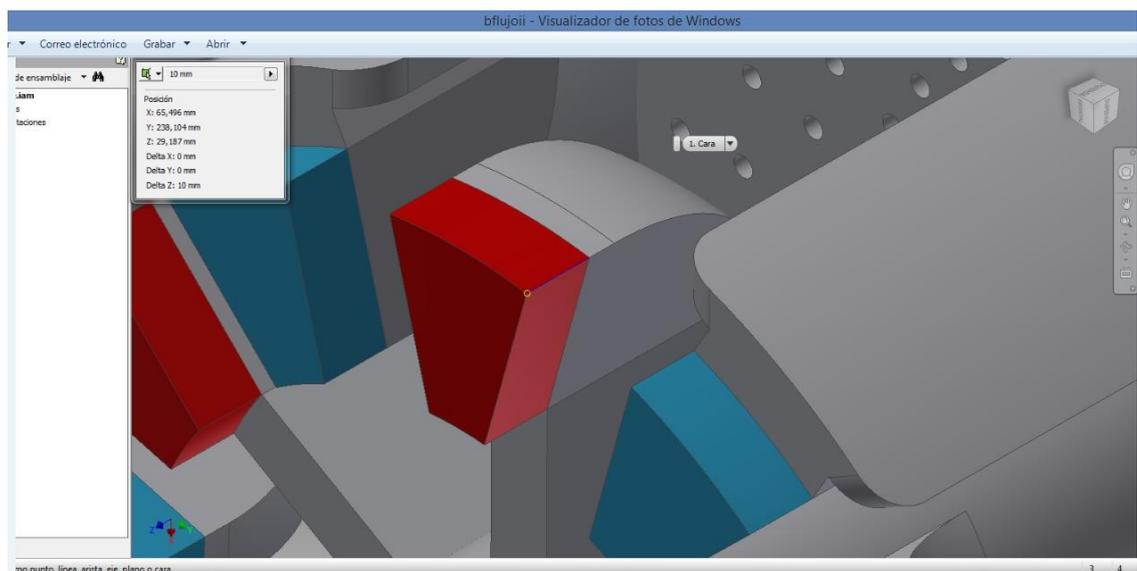


Ilustración 37 Espesor de la zapata polar b

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

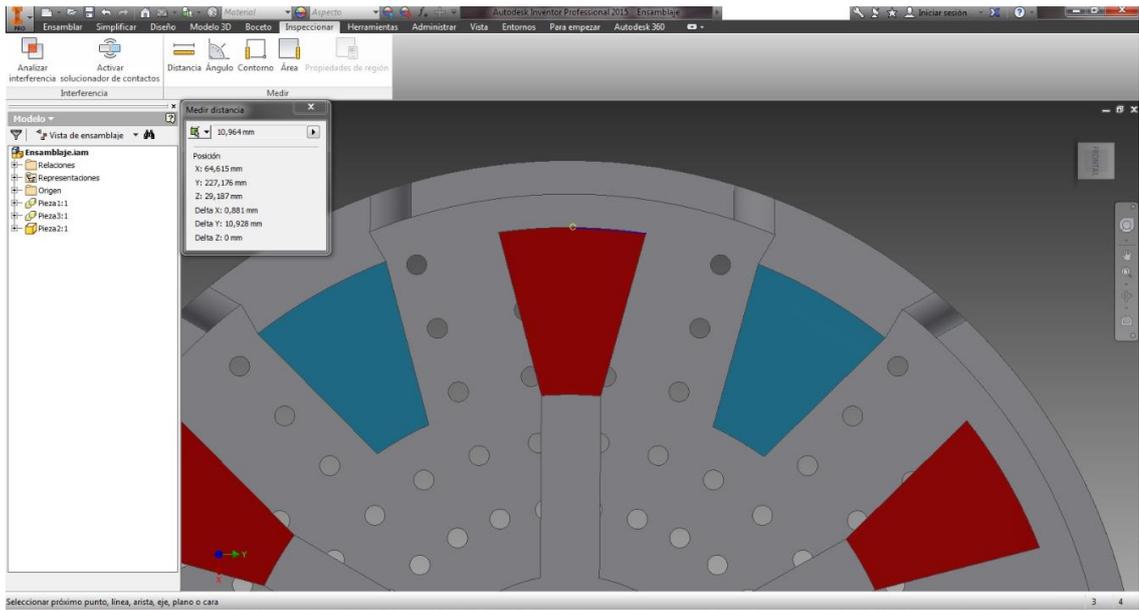


Ilustración 38 Mitad de la longitud del arco exterior del polo bp/2

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

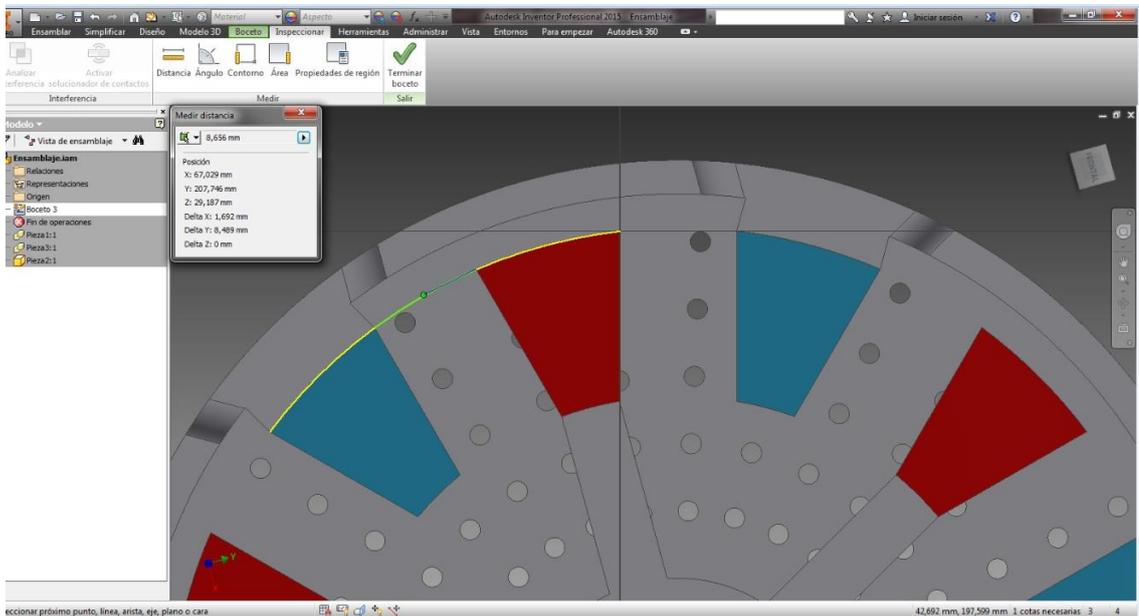


Ilustración 39 Mitad de la distancia entre polos en la circunf ext aps/2

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

3) Flujo de dispersión entre la parte inferior de los polos (ϕ_{iii}): Igual que ϕ_{ii} solo que esta vez calculado para la parte inferior de la zapata polar.

El flujo de dispersión entre polos contiguos (ϕ_{iii}), quedará definido como:

$$\phi_{ii} = F * \frac{\mu_o}{\pi} * b * \left[\ln\left(1 + \frac{b'_p * \pi}{2 * a_{ps}}\right) \right]$$

Donde:

- F es la f.m.m total generada = 900x2,98
- b es el espesor de la zapata polar (Ilustración 41) = 10 mm
- b'_p la longitud de arco interior del polo (Ilustración 42) = 22,263 mm
- a_{ps} la distancia entre polos en la circunferencia interior (Ilustración 43) = 2x8,656 mm

Al igual que antes la f.m.m. ya la tenemos y el resto de variables las calcularemos gráficamente de donde obtendremos que el flujo de dispersión entre la parte superior de los polos (ϕ_{ii}), será igual a $6,300 \cdot 10^{-6}$ Wb.

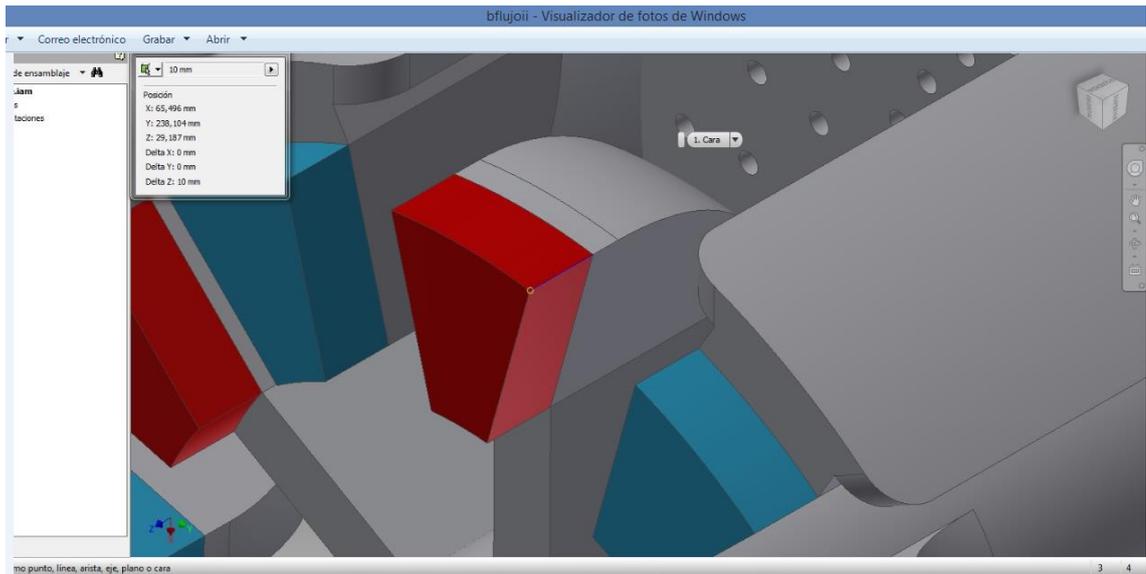


Ilustración 40 Espesor de la zapata polar b

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

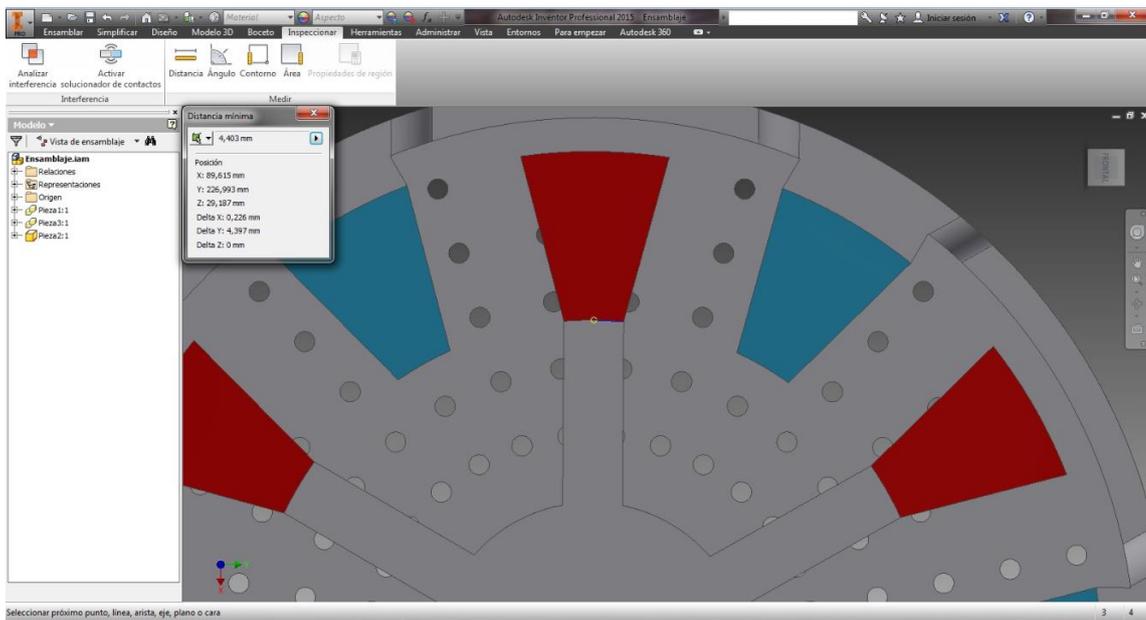


Ilustración 41 Longitud de arco interior del polo $b'/p/2$

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

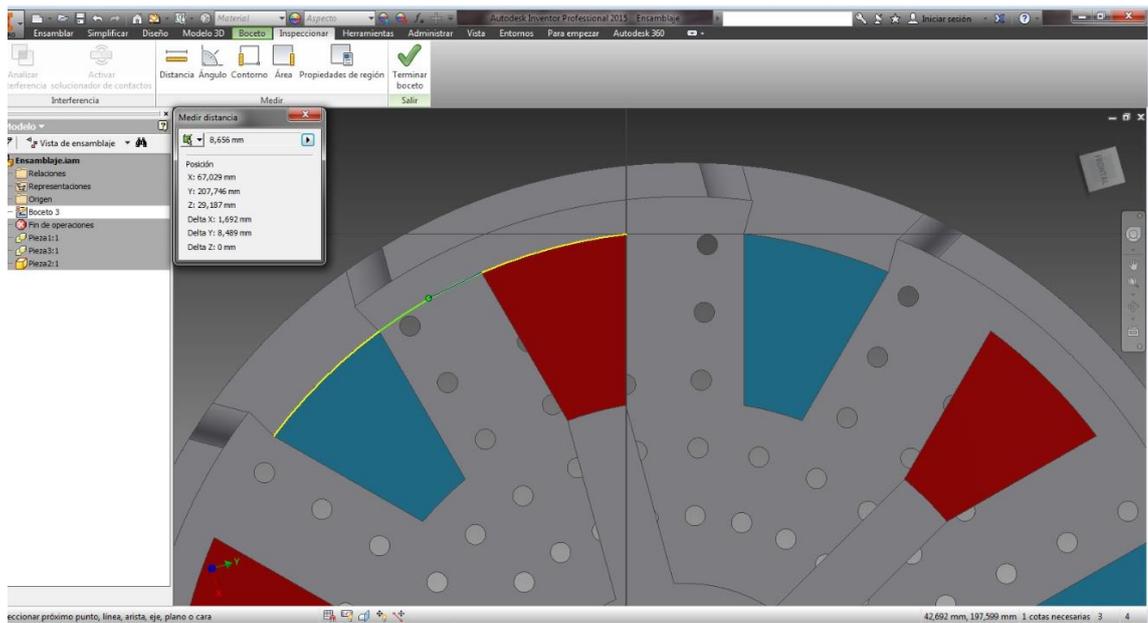


Ilustración 42 Mitad de la distancia entre polos en la circunf ext aps/2

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

4) Flujo de dispersión entre una zapata polar y la base de la zapata del siguiente por la parte superior (ϕ_{iv}): flujo de dispersión producida entre la zapata de un polo y la base de la zapata del siguiente. Resultará análogo al calculado entre superficies laterales de zapatas polares

Este flujo ϕ_{iv} quedará definido como:

$$\phi_{iv} = 4 * F * \mu_o * \frac{b}{\pi} * [\ln(1 + b_p * \frac{\pi}{4 * a_{ps}})]$$

Donde:

- $b = 36$ mm
- b_p ancho del polo (variable, lo tomamos por la sección media) (Ilustración 44) = 22,263 mm
- a_{ps} Separación entre polos (Ilustración 44) = 2x8,659 mm

De aquí obtendremos que ϕ_{iv} tendrá un valor de $1,078 \times 10^{-4}$ Wb

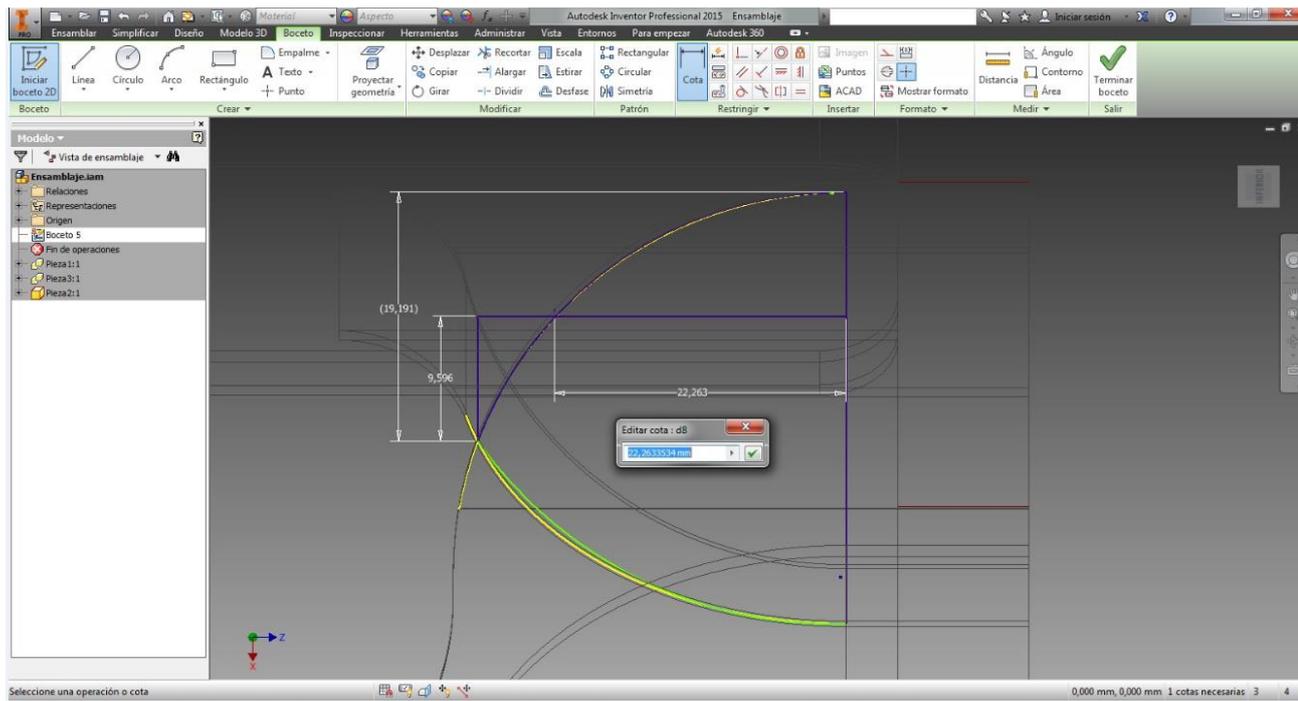


Ilustración 43 Variables para el cálculo

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

5) Flujo de dispersión entre una zapata polar y la base de la zapata del siguiente por la parte inferior (ϕ_v): flujo de dispersión producida entre la zapata de un polo y la base de la zapata del siguiente. Resultará análogo al calculado en el caso anterior.

Este flujo ϕ_v quedará definido como:

$$\phi_{iv} = 4 * F * \mu_o * \frac{b}{\pi} * \left[\ln\left(1 + b'_p * \frac{\pi}{4 * a_{ps}}\right) \right]$$

Donde:

- $b = 36 \text{ mm}$
- b'_p ancho del polo parte inferior (variable, lo tomamos por la sección media) (Ilustración 45) = 22,205 mm
- a_{ps} Separación entre polos (Ilustración 45) = 2x8,659 mm

De aquí obtendremos que ϕ_v tendrá un valor de $1,076 \times 10^{-4} \text{ Wb}$

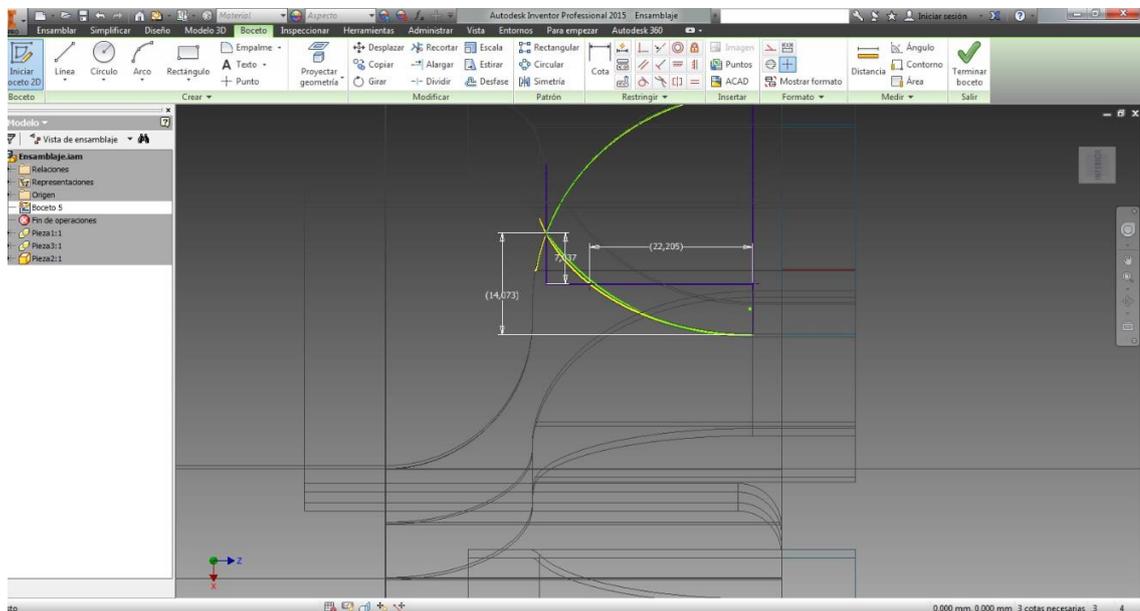


Ilustración 44 Variables para el cálculo

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

Como dijimos al principio, una vez calculadas todas las componentes del flujo de dispersión, bastará sumarlas, para obtener el valor total del mismo en el inductor de la máquina diseñada.

$$\Phi_{\text{disp}}=0,000311 \text{ Wb}$$

El valor de inducción total en un polo (ϕ_p) es de 0,0003746 Wb. Se deduce, pues, que el flujo de dispersión es prácticamente iguala al flujo útil, duplicando casi el flujo magnético que circula por los polos. Esto obligaría a aumentar la sección de estos polos, lo que modificaría todo el tamaño de la máquina. Este aumento de tamaño puede ser algo menor si se incrementa la inducción magnética en el hierro. Por lo tanto, el diseño de la máquina no vale finalmente a efectos electromagnéticos.

CONCLUSIÓN

Una vez realizados todos los cálculos pertinentes toca analizar todos los resultados obtenidos. Como se indicaba al principio del proyecto la finalidad inmediata de este era la búsqueda de una alternativa ante el tradicional alternador de garras. Esta alternativa debía presentar unas características al actual modelo, y en la medida de lo posible mejorar el diseño existente. Es por esto que:

- Como se indicó anteriormente, en el caso del inductor A (Ilustración 46), su diseño queda descartado, por presentar una longitud axial muy elevada. Esto incumple la premisa de diseño inicial, en la que se exige que la máquina sea compacta. Dado que se descarta desde un principio no se llega a calcular el flujo de dispersión del inductor, pero en vista de los resultados obtenidos en el inductor B, cabe esperar que este flujo sea similar. Esto haría que sus dimensiones aún creciesen más, lo cual harían del inductor A una opción aún menos viable.

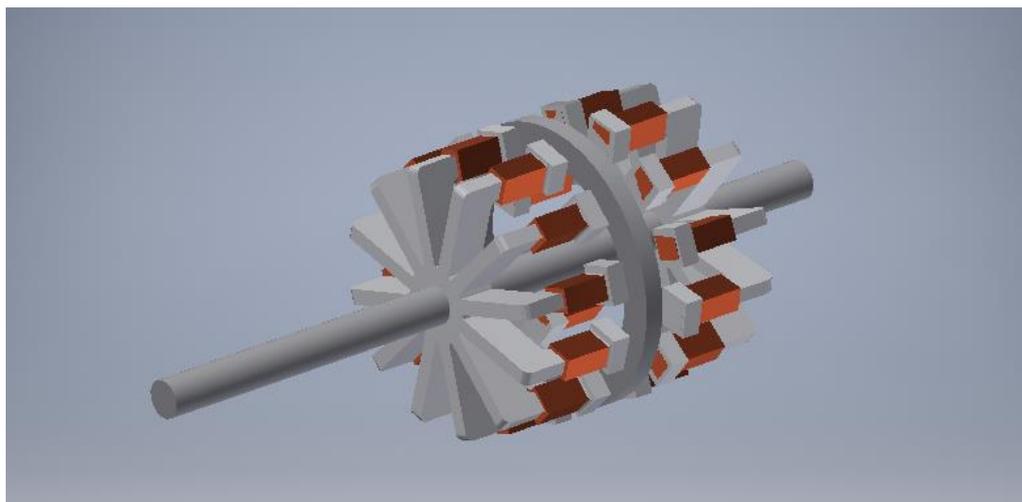


Ilustración 45 Diseño conceptual del inductor A

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

- Analizando los resultados obtenidos en el inductor B (Ilustración 47), podemos comprobar que en un principio las dimensiones de la máquina son similares a las del actual modelo, por lo que el diseño mecánico parece válido. Todo esto cambia a la hora de realizar el análisis electromagnético, dado que pese a que los resultados en un principio parecen válidos, una vez calculados los flujos de dispersión pierden esta validez. Esto es debido a que el flujo total que circula por la máquina se multiplica prácticamente por dos. Ante esto se pueden hacer dos cosas, o bien asumir este flujo, haciendo que el hierro se sature más y los conductores se sobrecalienten, o bien redimensionar el inductor.

La primera opción queda descartada, dado que el flujo prácticamente se dobla, por lo que no es asumible que los componentes del inductor queden expuestos a los sobreesfuerzos que esto conlleva.

La segunda opción conlleva un recálculo de las dimensiones del inductor, es decir, volveríamos a obtener todos los valores, asumiendo que el flujo circulante por el inductor sería el doble que el inicialmente calculado. Esto nos llevaría a un absurdo, que sería que tendríamos los polos cada vez más cerca (el ancho polar aumentaría), luego los flujos de dispersión aumentarían. Finalmente, esta segunda opción también resultaría inviable.

De aquí deducimos que el inductor B también resulta inviable.

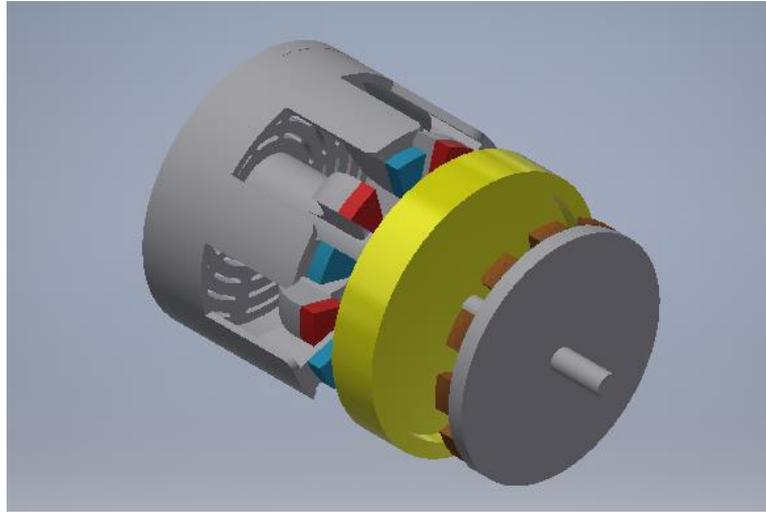


Ilustración 46 Diseño conceptual del inductor B

Autor: Rodrigo Diez Fernandez

Como resultado final podemos decir, que mediante los diseños empleados y los cálculos realizados, resulta inviable la sustitución del actual alternador de garras por los modelos propuestos.

JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS

DIMENSIONADO DEL INDUCIDO

JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS 1

Datos de partida:

N=1800 rpm
2p= 12
V_{CCout}=14 V
I_{CCout}=100 A
P_{out}= 1430 W aprox.

Cálculos:

$$f = n * \frac{p}{60} = 180 \text{ Hz}$$

$$V_{ACOUT} = \frac{V_{CCOUT}}{1,35} = \frac{14}{1,35} = 10,6 \text{ V}$$

$$V_{ACOUTFASE} = \frac{V_{ACOUT}}{\sqrt{3}} = \frac{10,6}{\sqrt{3}} = 6,12 \text{ V}$$

$$I_{ACOUT} = \frac{I_{CCOUT}}{1,35} = \frac{100}{1,35} = 78 \text{ A}$$

Datos supuestos (valores típicos):

A= 40000 A/m
B≈ 0,6 T
K_d= 2/3
Cos φ= 1

P= 0,85
K_e= 0,95
ξ= 0,94
K_{w1}= 0,96

M= 3 fases
N= 24
α_i= 2/π
J_a= 4,5 A/mm²

Cálculos (tabulado en Excel):

$$K_D = \frac{1}{8} * (1 + K_d) * (1 - K_d^2)$$

$$D_{in} = D_{out} * \frac{2}{3}$$

$$\phi_f = \frac{\xi * V_{ACOUTFASE}}{\pi * \sqrt{2} * f * K_W * N}$$

$$B_{mg} = \frac{\phi_f}{\alpha_i * \frac{\pi}{8 * p} * D_{out}^2 * (1 - K_d)}$$

$$A = \frac{4 * \sqrt{2} * m * I_{ACOUT} * N}{\pi * 2 * D_{out}}$$

Empleando los valores fijados y tabulando en función del diámetro obtenemos los siguientes valores:

Dout (m)	Din (m)	ϕ_f (Wb)	Bmg(T)	A(A/m)
0,1	0,06666667	0,00031222	1,34878638	50561,7643
0,101	0,06733333	0,00031222	1,32220996	50061,1528
0,102	0,068	0,00031222	1,29641136	49570,3572
0,103	0,06866667	0,00031222	1,27136053	49089,0916
0,104	0,06933333	0,00031222	1,24702883	48617,0811
0,105	0,07	0,00031222	1,22338901	48154,0613
0,106	0,07066667	0,00031222	1,20041508	47699,7777
0,107	0,07133333	0,00031222	1,17808226	47253,9853
0,108	0,072	0,00031222	1,15636692	46816,4484
0,109	0,07266667	0,00031222	1,13524651	46386,9397
0,11	0,07333333	0,00031222	1,11469949	45965,2403
0,111	0,074	0,00031222	1,09470528	45551,139
0,112	0,07466667	0,00031222	1,07524425	45144,4324
0,113	0,07533333	0,00031222	1,05629758	44744,9242
0,114	0,076	0,00031222	1,03784732	44352,4248
0,115	0,07666667	0,00031222	1,01987628	43966,7516
0,116	0,07733333	0,00031222	1,002368	43587,7279
0,117	0,078	0,00031222	0,98530673	43215,1832
0,118	0,07866667	0,00031222	0,96867738	42848,9528
0,119	0,07933333	0,00031222	0,95246549	42488,8776
0,12	0,08	0,00031222	0,93665721	42134,8036
0,121	0,08066667	0,00031222	0,92123925	41786,5821
0,122	0,08133333	0,00031222	0,90619886	41444,0691
0,123	0,082	0,00031222	0,89152382	41107,1255
0,124	0,08266667	0,00031222	0,87720238	40775,6164
0,125	0,08333333	0,00031222	0,86322328	40449,4115
0,126	0,084	0,00031222	0,8495757	40128,3844
0,127	0,08466667	0,00031222	0,83624923	39812,4128
0,128	0,08533333	0,00031222	0,82323388	39501,3784
0,129	0,086	0,00031222	0,81052003	39195,1661
0,13	0,08666667	0,00031222	0,79809845	38893,6649
0,131	0,08733333	0,00031222	0,78596025	38596,7667
0,132	0,088	0,00031222	0,77409687	38304,3669
0,133	0,08866667	0,00031222	0,76250007	38016,3641

0,134	0,08933333	0,00031222	0,75116194	37732,6599
0,135	0,09	0,00031222	0,74007483	37453,1588
0,136	0,09066667	0,00031222	0,72923139	37177,7679
0,137	0,09133333	0,00031222	0,71862453	36906,3973
0,138	0,092	0,00031222	0,70824742	36638,9596
0,139	0,09266667	0,00031222	0,69809346	36375,37
0,14	0,09333333	0,00031222	0,68815632	36115,5459
0,141	0,094	0,00031222	0,67842985	35859,4073
0,142	0,09466667	0,00031222	0,66890814	35606,8763
0,143	0,09533333	0,00031222	0,6595855	35357,8771
0,144	0,096	0,00031222	0,6504564	35112,3363
0,145	0,09666667	0,00031222	0,64151552	34870,1823
0,146	0,09733333	0,00031222	0,63275773	34631,3454
0,147	0,098	0,00031222	0,62417807	34395,758
0,148	0,09866667	0,00031222	0,61577172	34163,3543
0,149	0,09933333	0,00031222	0,60753407	33934,07
0,15	0,1	0,00031222	0,59946061	33707,8429
0,151	0,10066667	0,00031222	0,59154703	33484,6121
0,152	0,10133333	0,00031222	0,58378912	33264,3186
0,153	0,102	0,00031222	0,57618283	33046,9048
0,154	0,10266667	0,00031222	0,56872423	32832,3145
0,155	0,10333333	0,00031222	0,56140952	32620,4931
0,156	0,104	0,00031222	0,55423503	32411,3874
0,157	0,10466667	0,00031222	0,5471972	32204,9454
0,158	0,10533333	0,00031222	0,54029257	32001,1167
0,159	0,106	0,00031222	0,53351781	31799,8518
0,16	0,10666667	0,00031222	0,52686968	31601,1027
0,161	0,10733333	0,00031222	0,52034504	31404,8226
0,162	0,108	0,00031222	0,51394086	31210,9656
0,163	0,10866667	0,00031222	0,50765418	31019,4873
0,164	0,10933333	0,00031222	0,50148215	30830,3441
0,165	0,11	0,00031222	0,49542199	30643,4935
0,166	0,11066667	0,00031222	0,48947103	30458,8942
0,167	0,11133333	0,00031222	0,48362666	30276,5056
0,168	0,112	0,00031222	0,47788633	30096,2883
0,169	0,11266667	0,00031222	0,4722476	29918,2037
0,17	0,11333333	0,00031222	0,46670809	29742,2143
0,171	0,114	0,00031222	0,46126548	29568,2832
0,172	0,11466667	0,00031222	0,45591752	29396,3746
0,173	0,11533333	0,00031222	0,45066203	29226,4534
0,174	0,116	0,00031222	0,44549689	29058,4852
0,175	0,11666667	0,00031222	0,44042004	28892,4368
0,176	0,11733333	0,00031222	0,43542949	28728,2752
0,177	0,118	0,00031222	0,43052328	28565,9685
0,178	0,11866667	0,00031222	0,42569953	28405,4856
0,179	0,11933333	0,00031222	0,42095639	28246,7957

0,18	0,12	0,00031222	0,41629209	28089,8691
0,181	0,12066667	0,00031222	0,41170489	27934,6764
0,182	0,12133333	0,00031222	0,40719309	27781,1892
0,183	0,122	0,00031222	0,40275505	27629,3794
0,184	0,12266667	0,00031222	0,39838917	27479,2197
0,185	0,12333333	0,00031222	0,3940939	27330,6834
0,186	0,124	0,00031222	0,38986772	27183,7443
0,187	0,12466667	0,00031222	0,38570917	27038,3766
0,188	0,12533333	0,00031222	0,38161679	26894,5555
0,189	0,126	0,00031222	0,3775892	26752,2563
0,19	0,12666667	0,00031222	0,37362504	26611,4549
0,191	0,12733333	0,00031222	0,36972297	26472,1279
0,192	0,128	0,00031222	0,36588172	26334,2522
0,193	0,12866667	0,00031222	0,36210002	26197,8053
0,194	0,12933333	0,00031222	0,35837666	26062,7651
0,195	0,13	0,00031222	0,35471042	25929,1099
0,196	0,13066667	0,00031222	0,35110016	25796,8185
0,197	0,13133333	0,00031222	0,34754474	25665,8702
0,198	0,132	0,00031222	0,34404305	25536,2446
0,199	0,13266667	0,00031222	0,34059402	25407,9218
0,2	0,13333333	0,00031222	0,3371966	25280,8822

$$\text{Sección de conductor} = \frac{I_{ACOUT}}{J_a} = \frac{78}{4,5} = 17,33 \text{ mm}^2$$

*Formulación y valores típicos obtenidos del libro "Axial flux permanent magnet brushless machines" Ed. Springer

JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS 2

Datos de partida:

2p= 12 polos
m= 3 fases
N=Nf= 24 esp/ fase

Din= 100 mm
Dout= 150 mm
Sección de cond= 17,33 mm²

Datos supuestos (valores típicos):

q= 2 ranuras/ polo y fase
a'= 1 rama en paralelo

Cada bobina= 1 espira
Perdida de espacio por cabeza de bobina= 16 mm

Y_t= 60° eléctricos

Cálculos:

$$k = 2p * q * m = 12 * 2 * 3 = 72 \text{ ranuras}$$

$$t_{Rint} = \pi * \frac{Dint}{k} = \pi * \frac{100}{72} = 4,36 \text{ mm}$$

$$D'int = Dint - 16 = 100 - 16 = 84 \text{ mm}$$

$$t'_{Rint} = \pi * \frac{D'int}{k} = \pi * \frac{84}{72} = 3,66 \text{ mm}$$

Como se ha explicado en la memoria y empleando la tabla del **Anexo 2** seleccionamos el hilo a emplear:

2xhilo de 3x3 mm de sección = 8,44 mm²

$$S_{total} = 8,44 * 2 = 16,88 \text{ mm}^2$$

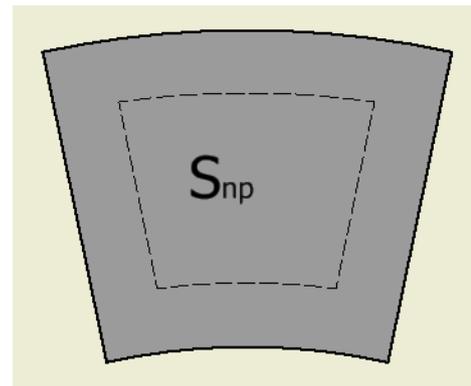
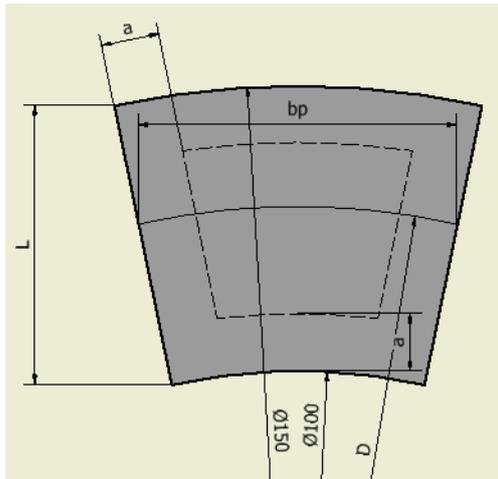
$$J = \frac{I_{ACOUT}}{S_{total}} = \frac{78}{16,88} = 4,62 \frac{A}{\text{mm}^2}$$

$$\delta_b = \frac{\sin\left(\frac{Y_t}{2}\right)}{q * \sin\left(\frac{Y_t}{2q}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{60}{2}\right)}{2 * \sin\left(\frac{60}{2 * 2}\right)} = 0,9659$$

DIMENSIONADO DEL INDUCTOR A

JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS 3

Dibujos explicativos:



- $b_p \rightarrow$ ancho de la zapata polar
- $L \rightarrow$ longitud de la zapata polar
- $D \rightarrow$ diámetro medio
- $a \rightarrow$ diferencia entre zapata del polo y núcleo polar

Datos de partida:

Diámetro interior $D_{int} = 100$ mm Flujo en el inducido $\phi_f = 0,00031222$ Wb
Diámetro exterior $D_{ext} = 150$ mm Número de polos $2p = 12$

Datos supuestos:

Ajuste ancho polar $K_{bp} = 0,6$

Ajuste del flujo en inductor $K_\phi = 1,2$

Cálculos:

$$\text{Diámetro medio } D = D_{int} + \frac{D_{ext} - D_{int}}{2} = 100 + \frac{150 - 100}{2} = 125 \text{ mm}$$

$$\text{Longitud de la zapata del polo } L = \frac{D_{ext} - D_{int}}{2} = \frac{150 - 100}{2} = 25 \text{ mm}$$

$$\text{Paso polar medio } \tau_p = \frac{\pi * D}{2p} = \frac{\pi * 125}{12} = 32,72 \text{ mm}$$

$$\text{Ancho de la zapata polar } b_p = K_{bp} * \tau_p = 0,6 * 32,7 = 19,64 \text{ mm}$$

$$\text{Flujo en el polo } \Phi_p = K_\phi * \Phi_f = 1,2 * 0,0003122 = 0,0003746 \text{ Wb}$$

$$\text{Inducción máxima en el polo } B_{mp} = \frac{\Phi_p}{L_i * b_p * L} = \frac{0,0003746}{\frac{2}{\pi} * 0,0196 * 0,025} = 1,199 \text{ T}$$

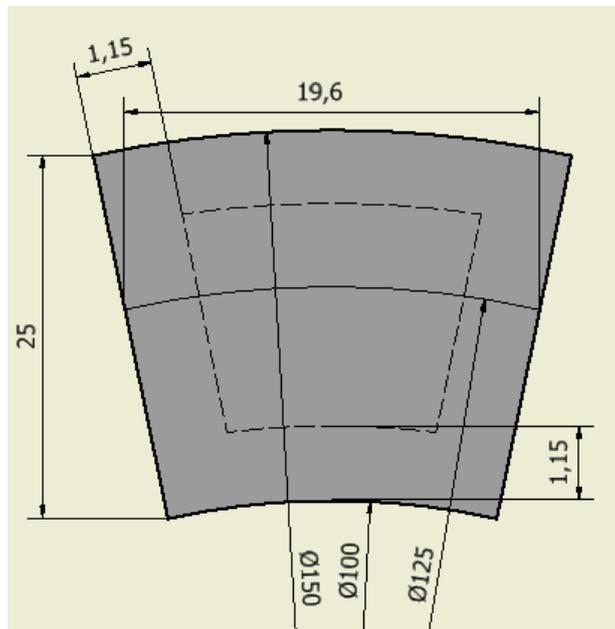
$$\text{Inducción máxima en el núcleo polar } B_{mnp} \cong 1,5 \text{ T}$$

$$\text{Sección del núcleo polar } S_{np} = \frac{\Phi_p}{L_i * B_{mnp}} = \frac{0,0003746}{\frac{2}{\pi} * 1,5} = 0,0003924 \text{ m}^2$$

$$\left[\begin{array}{l} = 392,4 \text{ mm}^2 \\ \text{Ancho del núcleo polar } b_{np} = b_p - 2a \\ \text{Longitud del núcleo polar } L_{np} = L - 2a \\ \text{Sección del núcleo polar } S_{np} = b_{np} * L_{np} \end{array} \right.$$

$$a = 1,15 \text{ mm}$$

Representación gráfica de los resultados:



JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS 4

Datos de partida:

Valor de la inducción en el inducido $B_{mg}=0,6$ T	Numero de polos $2p= 12$
Número de espiras por fase $N= 24$ esp/fase	Intensidad del inducido $I_{acout}= 78$ A
Factor de bobinado arr induc $\delta_b=0,966$	

Datos supuestos:

Entrehierro $\delta= 0,01$ m

Cálculos:

$$\begin{aligned} \text{Fuerza magnetomotriz total del entrehierro } F &= 1,1 * F_g = \frac{1,1}{\mu_0} * B_{mg} * \delta \\ &= 1,1 * \frac{0,6}{4 * \pi * 10^{-7}} * 0,6 * 10^{-2} = 5247,39 \text{ Av} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Fuerza magnetomotriz de reacción en el inducido } F_i &= \frac{3}{2} * \frac{4}{\pi} * \delta_b * N * \frac{I_{acout}}{2p} \\ &= \frac{3}{2} * \frac{4}{\pi} * 0,966 * 24 * \frac{78}{12} = 287,78 \text{ Av} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Fuerza magnetomotriz polar } F_p \rightarrow F^2 &= (2 * F_p)^2 - F_i^2 \rightarrow F_p = \frac{\sqrt{F^2 + F_i^2}}{2} \\ &= \frac{\sqrt{5247,39^2 + 287,78^2}}{2} = 2627,64 \text{ Av} \end{aligned}$$

JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS 5

Datos de partida:

Longitud de la zapata del polo $L = 25$ mm Diferencia de secciones $a = 1,15$ mm
Ancho de la zapata polar $b_p = 19,64$ mm

Cálculos:

$$\begin{aligned} \text{Perímetro del núcleo polar } P_{np} &= 2 * [(L - 2a) + (b_p - 2a)] \\ &= 2 * [(25 - 2 * 1,15) + (19,6 - 2 * 1,15)] = 80,35 \text{ mm} \end{aligned}$$

JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS 6

Datos de partida:

Paso polar medio $\tau_p = 32,72$ mm

Ancho de la zapata polar $b_p = 19,64$ mm

Cálculos:

$$\text{Espacio radial disponible } j = \frac{\tau_p - b_p}{2} = \frac{32,72 - 19,64}{2} = 6,54 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{Longitud media espira } l_1 &= 2 * \left[\left(b_p + \frac{2j}{2} \right) + \left(L + \frac{2j}{2} \right) \right] = 2 * (b_p + L + 2j) \\ &= 2 * (25 + 19,6 + 2 * 6,54) = 115,73 \text{ mm} \end{aligned}$$

JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS 7

Datos de partida:

Tensión de alimentación $V=14V$	Longitud media espira $l_1=0,1157$ m
f.m.m. polo $F_p=2627,64$ A/v	Espacio entre polos $j=6,55$ mm
Resist. cobre a $150^\circ C$ $\rho_{Cu150^\circ}=0,026$	

Datos supuestos:

Intensidad máxima a la que vamos a limitar el arrollamiento del inductor $I=20A$

Cálculos:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{f. m. m. generada por un polo } F = N_p * \frac{V}{R} \\ \text{La resistencia total del conjunto de los arrollamientos } R = 2p * R_p \\ \text{La resistencia del arrollamiento de un polo } R_p = \frac{N_p * l_1 * \rho}{S} \end{array} \right.$$

Despejando las ecuaciones anteriores obtenemos que:

$$F = \frac{V * S}{2p * l_1 * \rho} \rightarrow \text{Sección del hilo conductor } S = \frac{2p * l_1 * \rho * F}{V} \\ = \frac{2627,64 * 0,1157 * 0,026 * 12}{14} = 6,786 \text{ mm}^2$$

Con la sección obtenida vamos a la tabla de cables y seleccionamos el más adecuado:

Sección $S=7,07$ mm ²	Diámetro con esmalte fino $D'=3,11$ mm
Diámetro nominal $D=3,00$ mm	

$$\text{Densidad de corriente } J = \frac{I}{S} = \frac{20}{7,07} = 2,83 \frac{A}{\text{mm}^2}$$

$$\text{Número de espiras por polo } N_p = \frac{F}{I} = \frac{2627,64}{20} = 131,38 \text{ espiras} \\ \approx 132 \text{ espiras}$$

$$\begin{aligned} \text{Resistencia total del arrollamiento } R &= \frac{2p * N_p * l_1 * \rho_{Cu150^\circ}}{S} \\ &= \frac{12 * 132 * 0,1157 * 0,026}{7,07} = 0,67 \Omega \end{aligned}$$

$$\text{Intensidad máxima } I_{max} = \frac{V}{R} = \frac{14}{0,67} = 20,83 \text{ A}$$

$$\text{Pérdidas en el cobre } P_{Cu} = R * I^2 = 0,67 * 20^2 = 268 \text{ W}$$

$$\text{Pérdidas máximas en el cobre } P_{Cumax} = R * I_{max}^2 = 0,67 * 20,83^2 = 291 \text{ W}$$

$$\text{Nº de capas de arrollamiento} = \frac{j}{\text{diámetro esmalte}} = \frac{6,55}{3,11} \approx 2 \text{ capas}$$

$$\begin{aligned} \text{Longitud axial de la bobina} &= N_p * \frac{\text{diámetro esmalte}}{n^\circ \text{ de capas}} = 132 * \frac{3,11}{2} \\ &= 198 \text{ mm} \end{aligned}$$

DIMENSIONADO DEL INDUCTOR B

JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS 8

Datos de partida:

Flujo en un polo $\phi_p = 0,0003746 \text{ Wb}$ Inducción máxima en el hierro
 $B_{mnp} = 1,5 \text{ T}$

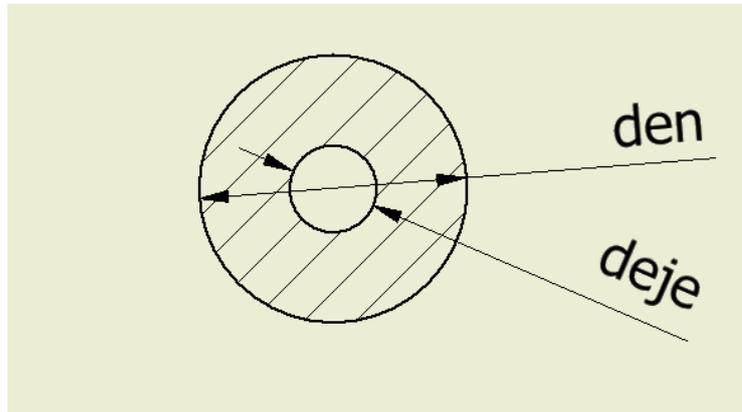
Datos supuestos:

Diámetro del eje $d_{eje} = 15 \text{ mm}$ Diámetro ext de la bobina $d_{bob} = 80 \text{ mm}$

Cálculos:

Flujo total circulando por el interior de la bobina $\phi_{bob} = p * \phi_p$
 $= 6 * 0,0003746 = 0,002248 \text{ Wb}$

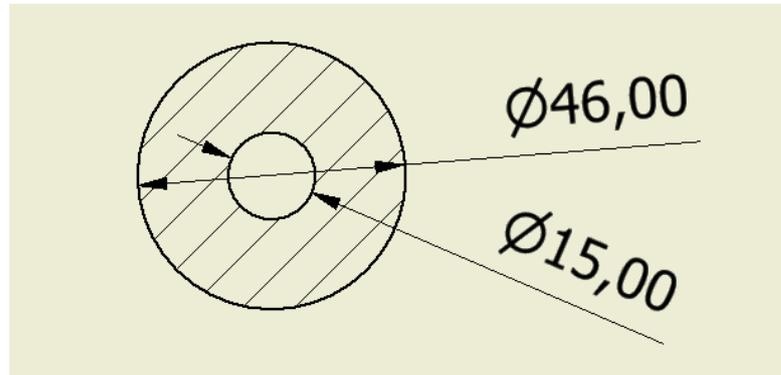
Sección del nucleo polar $S_{np} = \frac{\phi_{bob}}{B_{mnp}} = \frac{0,002248}{1,5} = 1498,65 \text{ mm}^2$



$$S_{np} = \frac{\pi}{4} * (d_{en}^2 - d_{eje}^2) \rightarrow 1492,65 = \frac{\pi}{4} * (d_{en}^2 - 15^2) \rightarrow d_{en} = 46 \text{ mm}$$

$$\text{Longitud media espira } l_1 = \pi * \frac{d_{en} + d_{bob}}{2} = \pi * \frac{57 + 80}{2} = 197,92 \text{ mm}$$

Representación gráfica de los resultados:



JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS 9

Datos de partida:

Tensión de alimentación $V=14V$

Longitud media espira $l_1=197,92$
mm

f.m.m. $F=2627,64$ A/v

Resist. cobre a $150^\circ C$ $\rho_{cu150^\circ} = 0,026$

Datos supuestos:

Densidad de corriente máxima a la que vamos a limitar el arrollamiento del inductor $J=3$ A/mm²

Cálculos:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{f.m.m. generada } F = N * \frac{V}{R} \\ \text{La resistencia del arrollamiento } R = \frac{N_p * l_1 * \rho}{S} \end{array} \right.$$

Despejando las ecuaciones anteriores obtenemos que:

$$F = \frac{V * S}{l_1 * \rho} \rightarrow \text{Sección del hilo conductor } S = \frac{l_1 * \rho * F}{V} \\ = \frac{2627,64 * 0,19792 * 0,026}{14} = 0,97 \text{ mm}^2$$

Con la sección obtenida vamos a la tabla de cables y seleccionamos el más adecuado:

Sección $S = 0,9853 \text{ mm}^2$

Diámetro con esmalte fino $D'=1,192$
mm

Diámetro nominal $D= 1,15$ mm

$$\text{Densidad de corriente } J = \frac{I}{S} \rightarrow I = s * J = 0,9853 * 3 = 2,96 \text{ A}$$

$$\text{Número de espiras } N = \frac{F}{I} = \frac{2627,64}{2,96} = 887,71 \text{ espiras} \approx 900 \text{ espiras}$$

$$\begin{aligned} \text{Resistencia total del arrollamiento } R &= \frac{N * l_1 * \rho_{Cu150^\circ}}{S} \\ &= \frac{900 * 0,19792 * 0,026}{0,9853} = 4,74 \Omega \end{aligned}$$

$$\text{Intensidad máxima } I_{max} = \frac{V}{R} = \frac{14}{4,74} = 2,98 \text{ A}$$

$$\text{Pérdidas en el cobre } P_{Cu} = R * I^2 = 4,74 * 2,96^2 = 41,06 \text{ W}$$

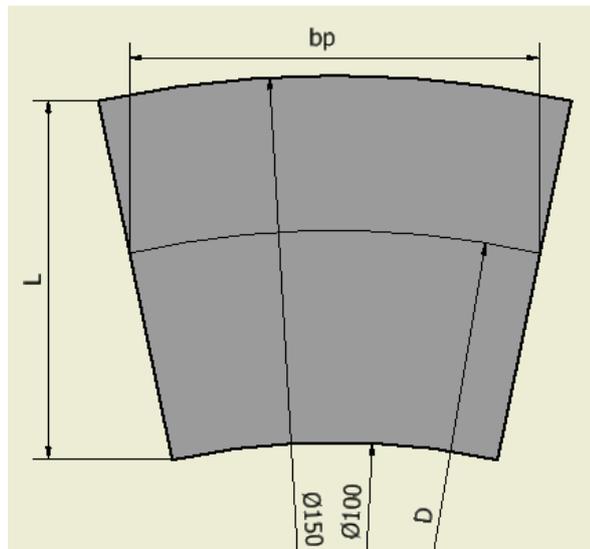
$$\text{Pérdidas máximas en el cobre } P_{Cumax} = R * I_{max}^2 = 4,74 * 2,98^2 = 41,69 \text{ W}$$

$$\begin{aligned} \text{Nº de capas de arrollamiento} &= \frac{j}{\text{diámetro esmalte}} = \frac{\frac{d_{ebob} - d_{en}}{2}}{1,192} \\ &\approx 14 \text{ capas} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Longitud axial de la bobina} &= N * \frac{\text{diámetro esmalte}}{n^\circ \text{ de capas}} = 900 * \frac{1,192}{14} \\ &= 77 \text{ mm} \end{aligned}$$

JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS 10

Dibujos explicativos:



Definiendo las variables tenemos que:

- $b_p \rightarrow$ ancho de la zapata polar
- $L \rightarrow$ longitud de la zapata polar
- $D \rightarrow$ diámetro medio

Datos de partida:

Diámetro interior $D_{int} = 100$ mm Flujo en el inducido $\phi_P = 0,0003746$ Wb
Diámetro exterior $D_{ext} = 150$ mm Número de polos $2p = 12$
Inducción máx en el hierro
 $B_{mp} = 1,5$ T

Cálculos:

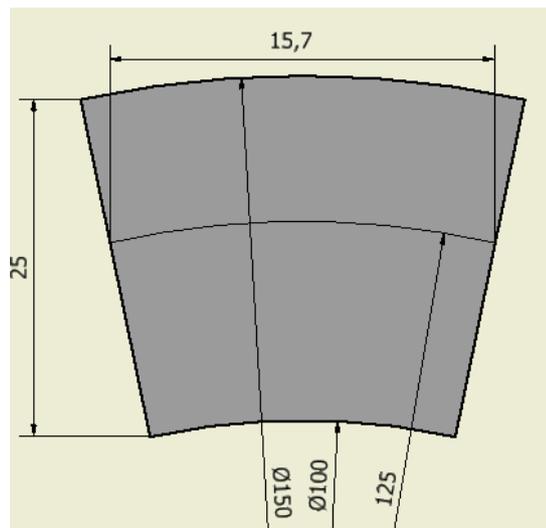
$$\text{Diámetro medio } D = D_{int} + \frac{D_{ext} - D_{int}}{2} = 100 + \frac{150 - 100}{2} = 125 \text{ mm}$$

$$\text{Longitud de la zapata del polo } L = \frac{D_{ext} - D_{int}}{2} = \frac{150 - 100}{2} = 25 \text{ mm}$$

$$\text{Paso polar medio } \tau_p = \frac{\pi * D}{2p} = \frac{\pi * 125}{12} = 32,72 \text{ mm}$$

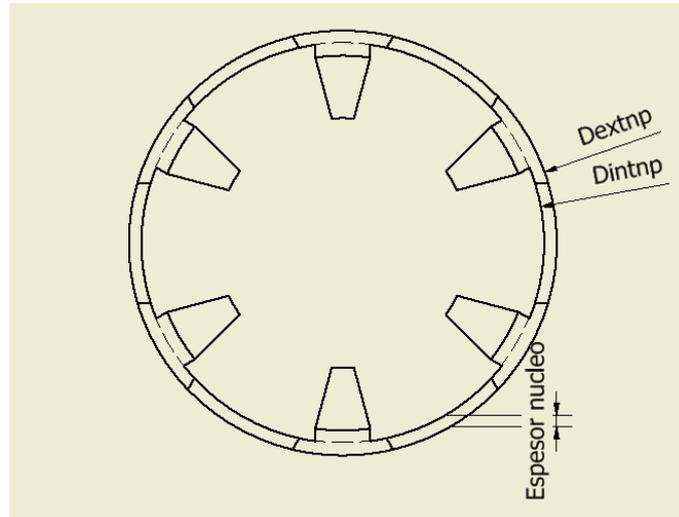
$$\begin{aligned} \text{Inducción máxima en el polo } B_{mp} &= \frac{\Phi_p}{L_i * b_p * L} \rightarrow b_p = \frac{\Phi_p}{L_i * B_{mnp} * L} \\ &= \frac{0,0003746}{\frac{2}{\pi} * 0,025 * 1,5} = 0,0157 \text{ m} = 15,7 \text{ mm} \end{aligned}$$

Representación gráfica de los resultados:



JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS 11

Dibujo explicativo:



Datos de partida:

Flujo en un polo $\phi_{bob} = 0,002248$ Wb Inducción máxima en el hierro
 $B_{mnp} = 1,5$ T

Diámetro ext zona activa $D_{ext} = 150$
mm

Cálculos:

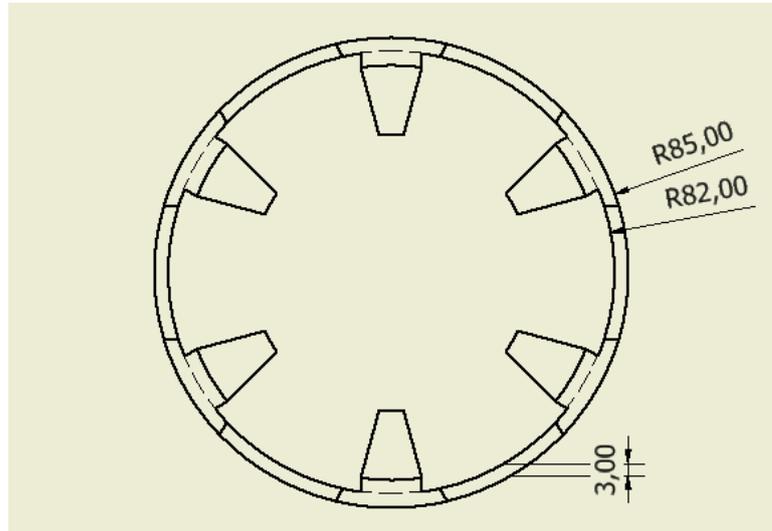
$$\text{Sección del núcleo polar } S'_{np} = \frac{\phi_{bob}}{B_{mnp}} = \frac{0,002248}{1,5} = 1498,65 \text{ mm}^2$$

$$\text{Diámetro interior del cilindro exterior } D'_{intnp} = D_{ext} + 14 = 150 + 14 \\ = 164 \text{ mm}$$

$$S_{np} = \frac{\pi}{4} * (D'^2_{extnp} - D'^2_{intnp}) \rightarrow 1492,65 = \frac{\pi}{4} * (D'^2_{extnp} - 164^2) \rightarrow D'_{extnp} \\ \approx 170 \text{ mm}$$

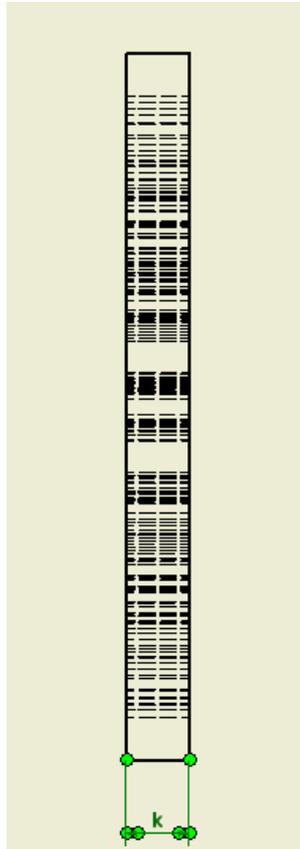
$$\text{Espesor del núcleo polar} = \frac{D'_{extnp} - D'_{intnp}}{2} = \frac{170 - 164}{2} = 3 \text{ mm}$$

Representación gráfica de los resultados:



JUSTIFICACIÓN DE CÁLCULOS 12

Dibujo explicativo:



Datos de partida:

Flujo en un polo $\phi_{bob} = 0,002248$ Wb Inducción máxima en el hierro
 $B_{mnp} = 1,5$ T

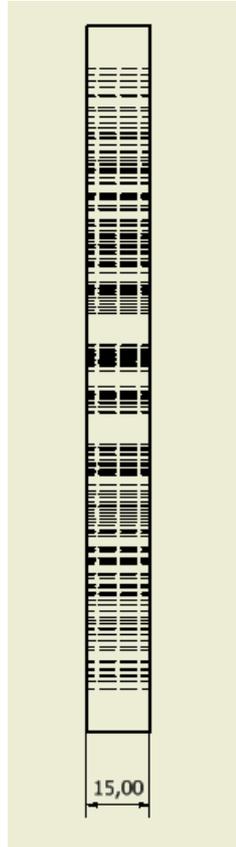
Diámetro ext del cilindro interior $d_{en} =$
46 mm

Cálculos:

$$\begin{aligned} \text{Sección del núcleo polar } S'_{np} &= \frac{\phi_{bob}}{B_{mnp}} = \frac{0,002248}{1,5} = 1498,65 \text{ mm}^2 \\ &= \pi * d_{en} * k = \pi * 46 * k \rightarrow \text{Anchura de la pieza } k = 10 \text{ mm} \end{aligned}$$

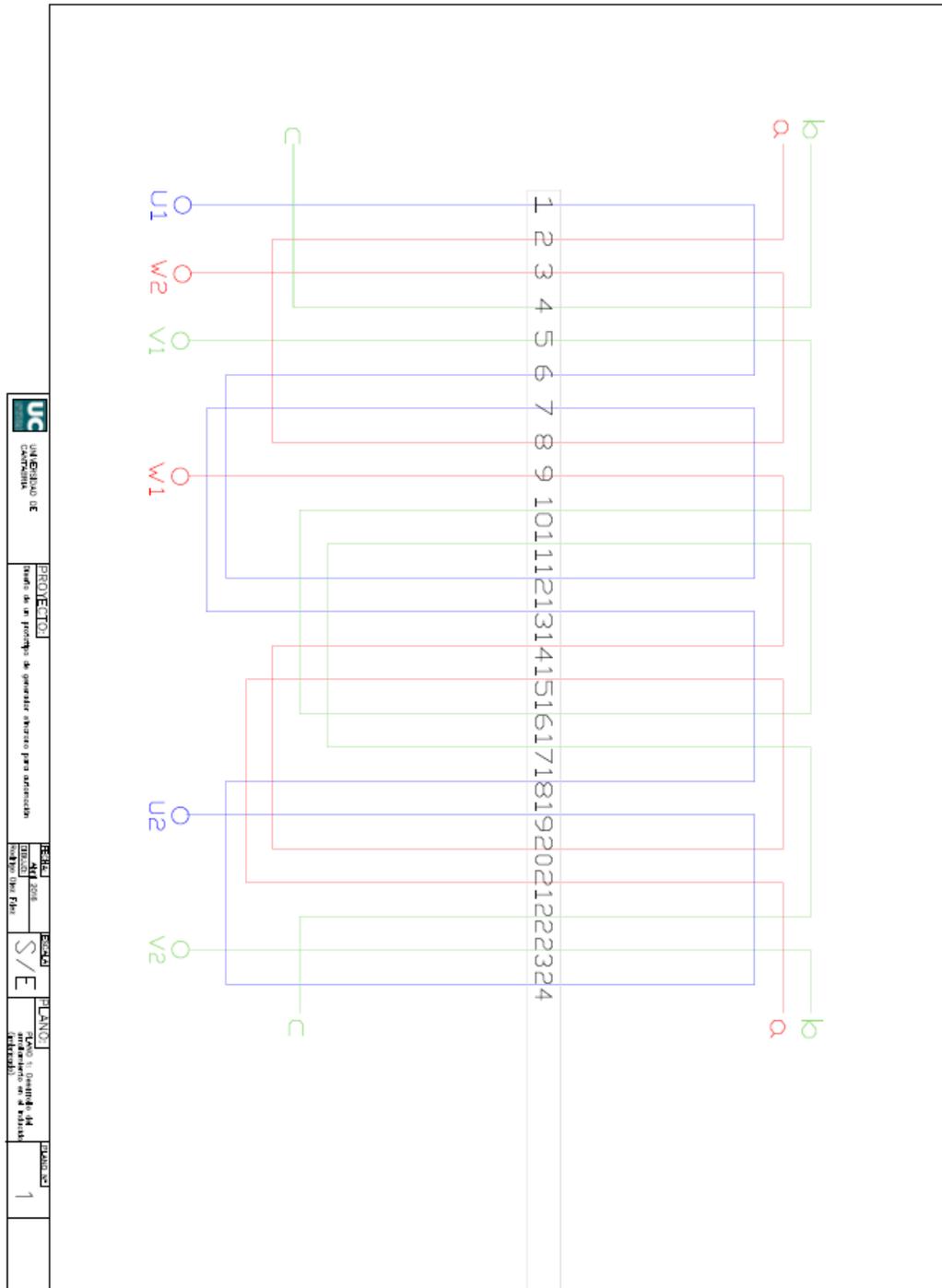
*Anchura corregida para realizar ranurado $k' = 1,5 * k = 1,5 * 10 = 15 \text{ mm}$*

Representación gráfica de los resultados:

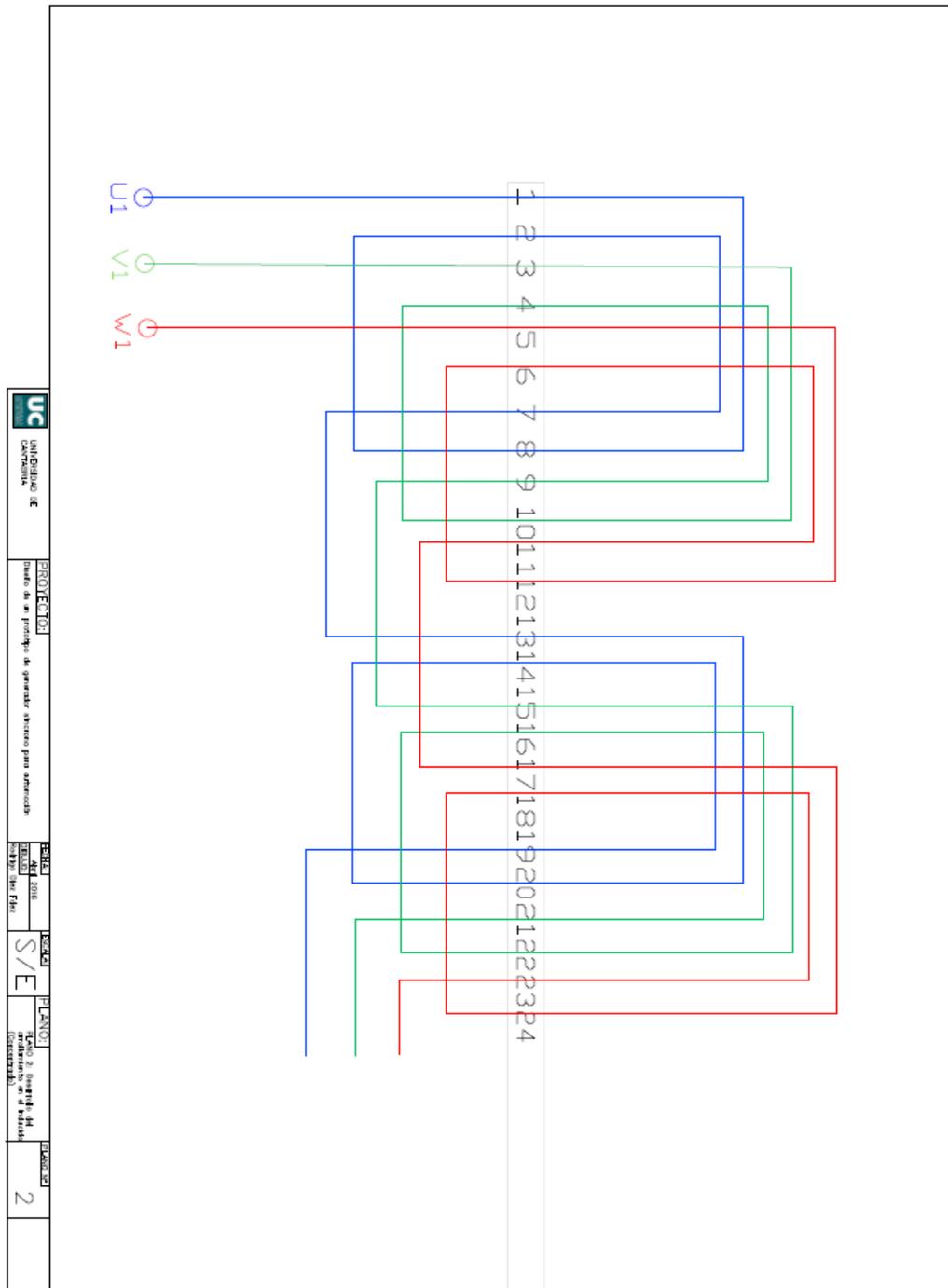


PLANOS

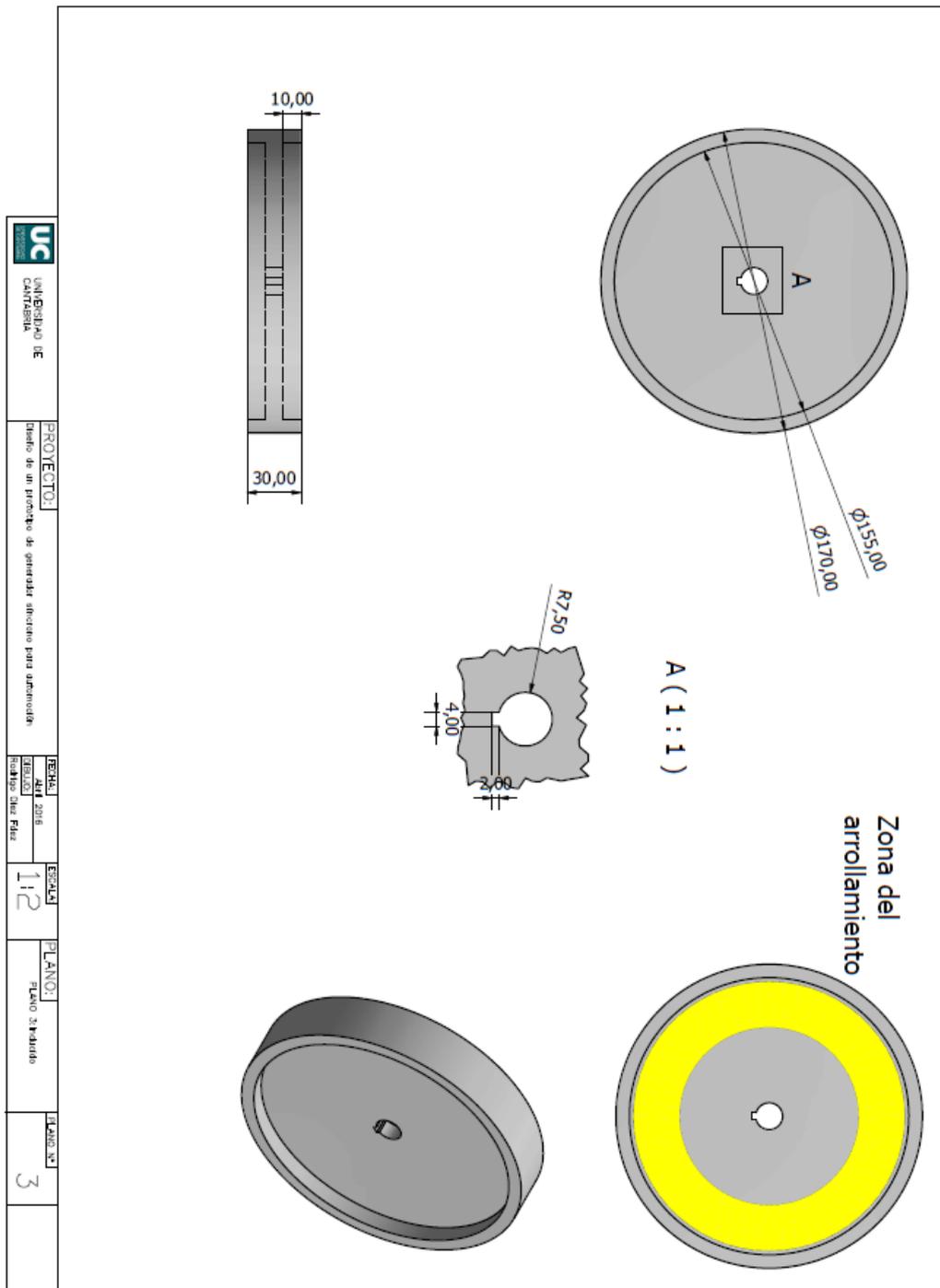
PLANO 1: Desarrollo del arrollamiento en el inducido (imbricado)



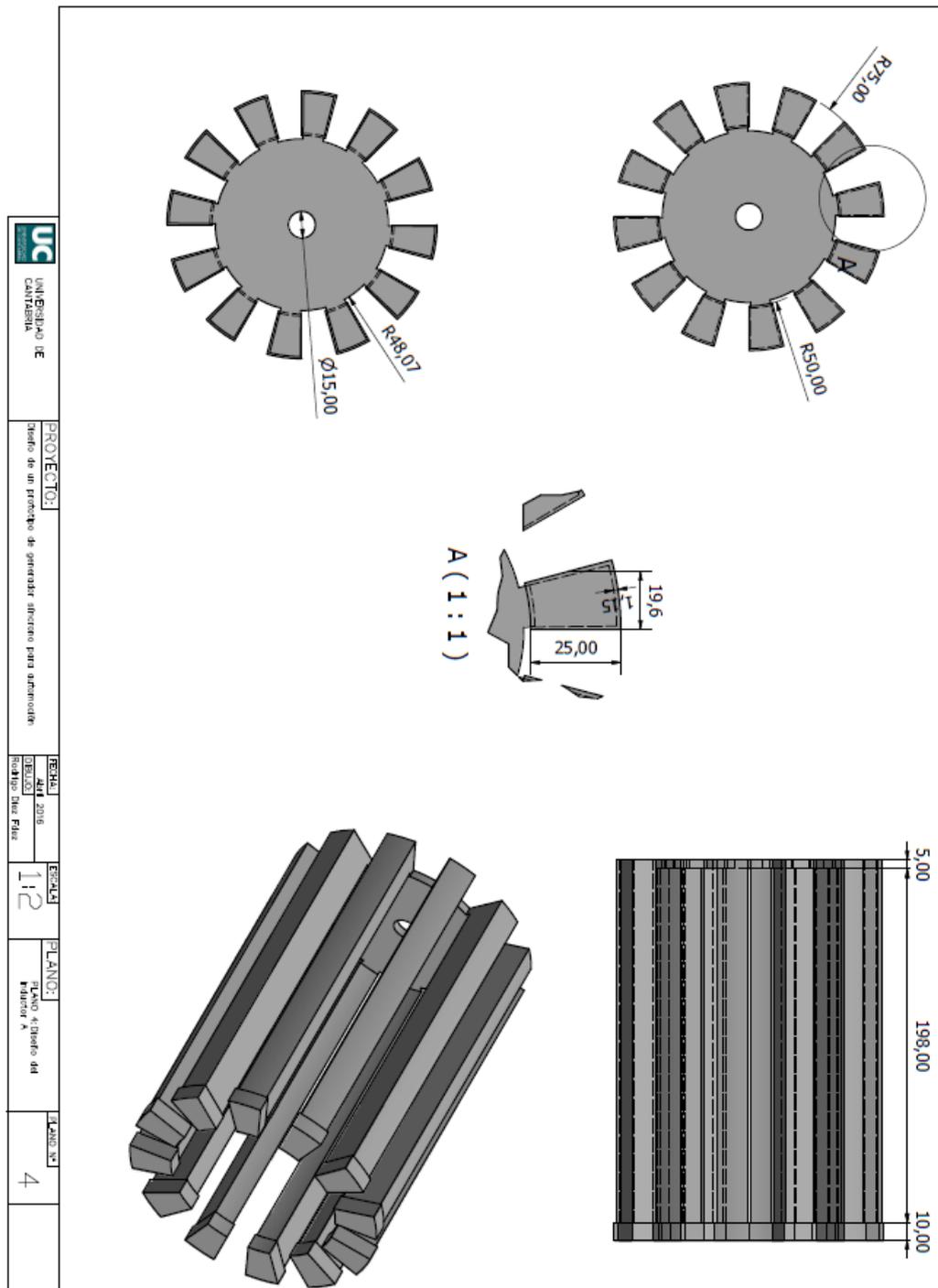
PLANO 2: Desarrollo del arrollamiento en el inducido (concentrado)



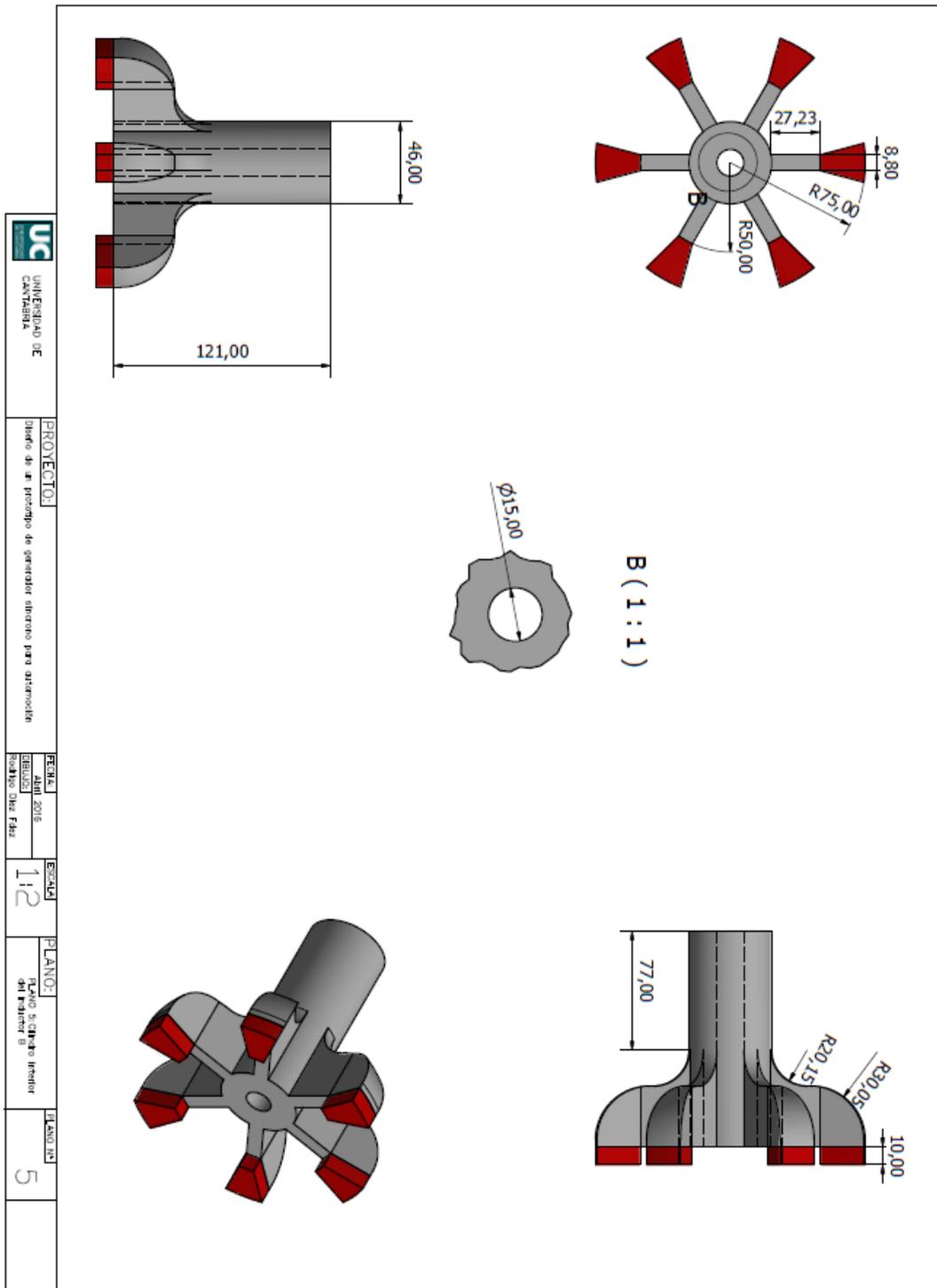
PLANO 3: Inducido



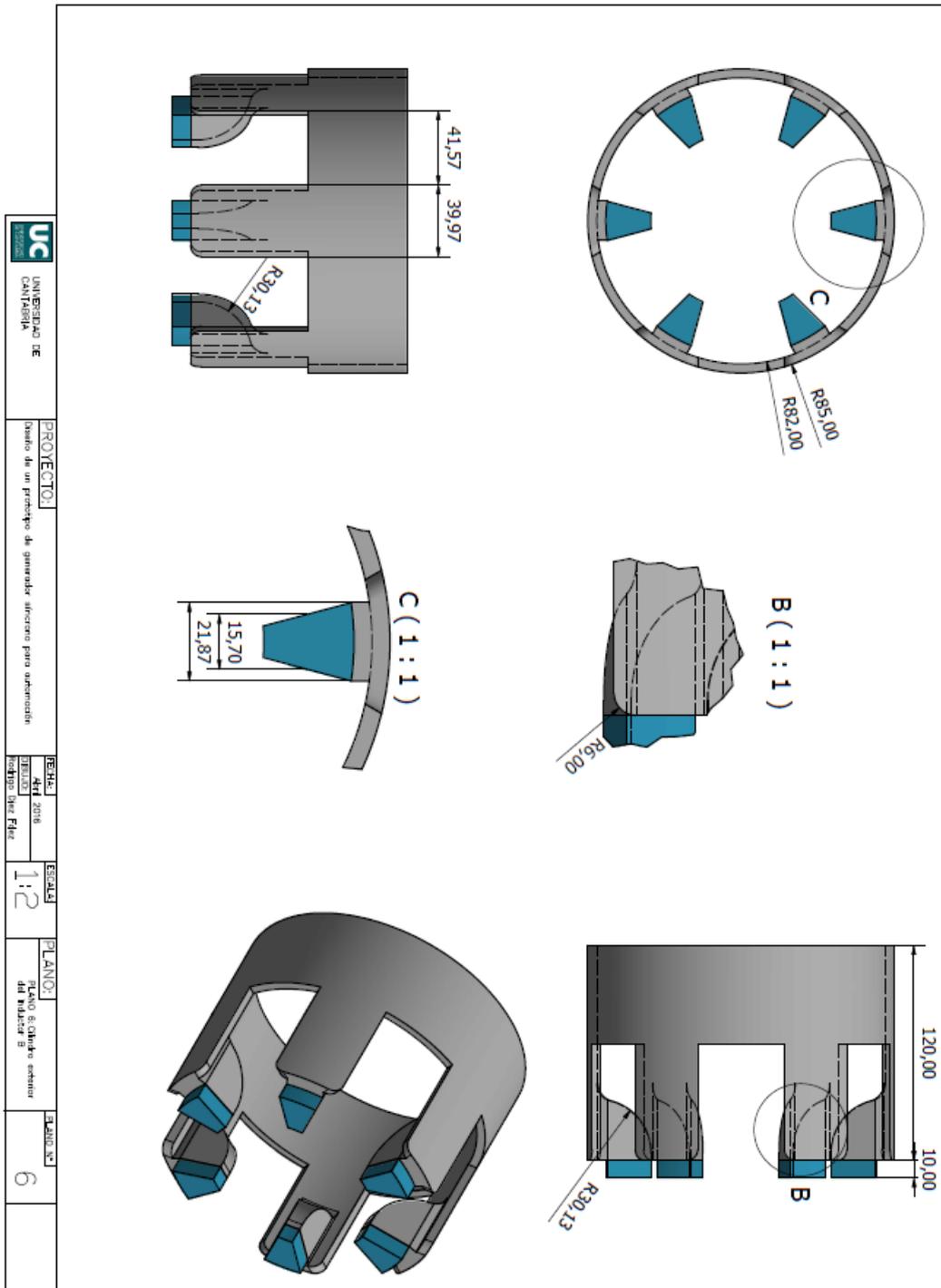
PLANO 4: Diseño del inductor A



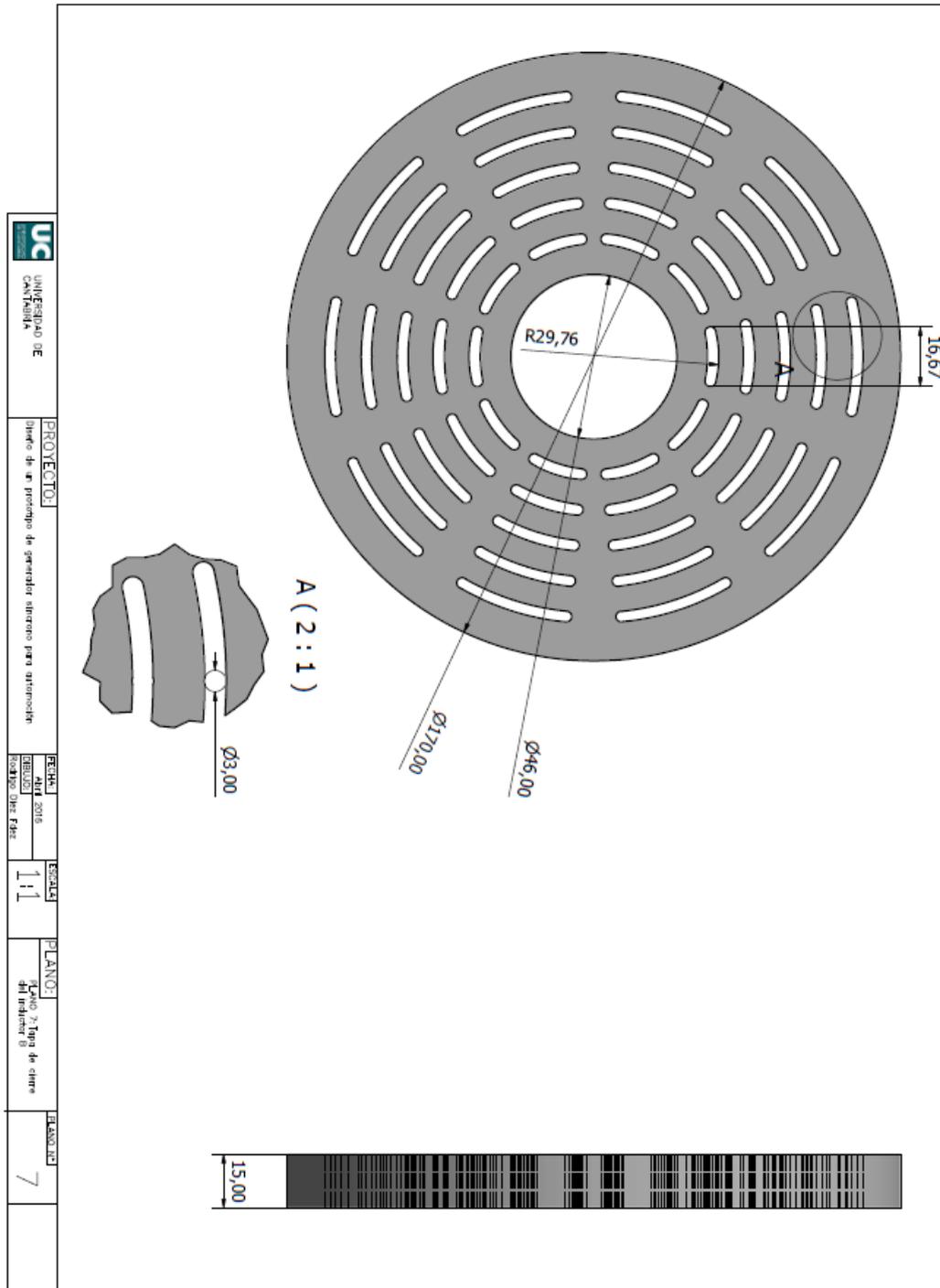
PLANO 5: Cilindro interior del inductor B



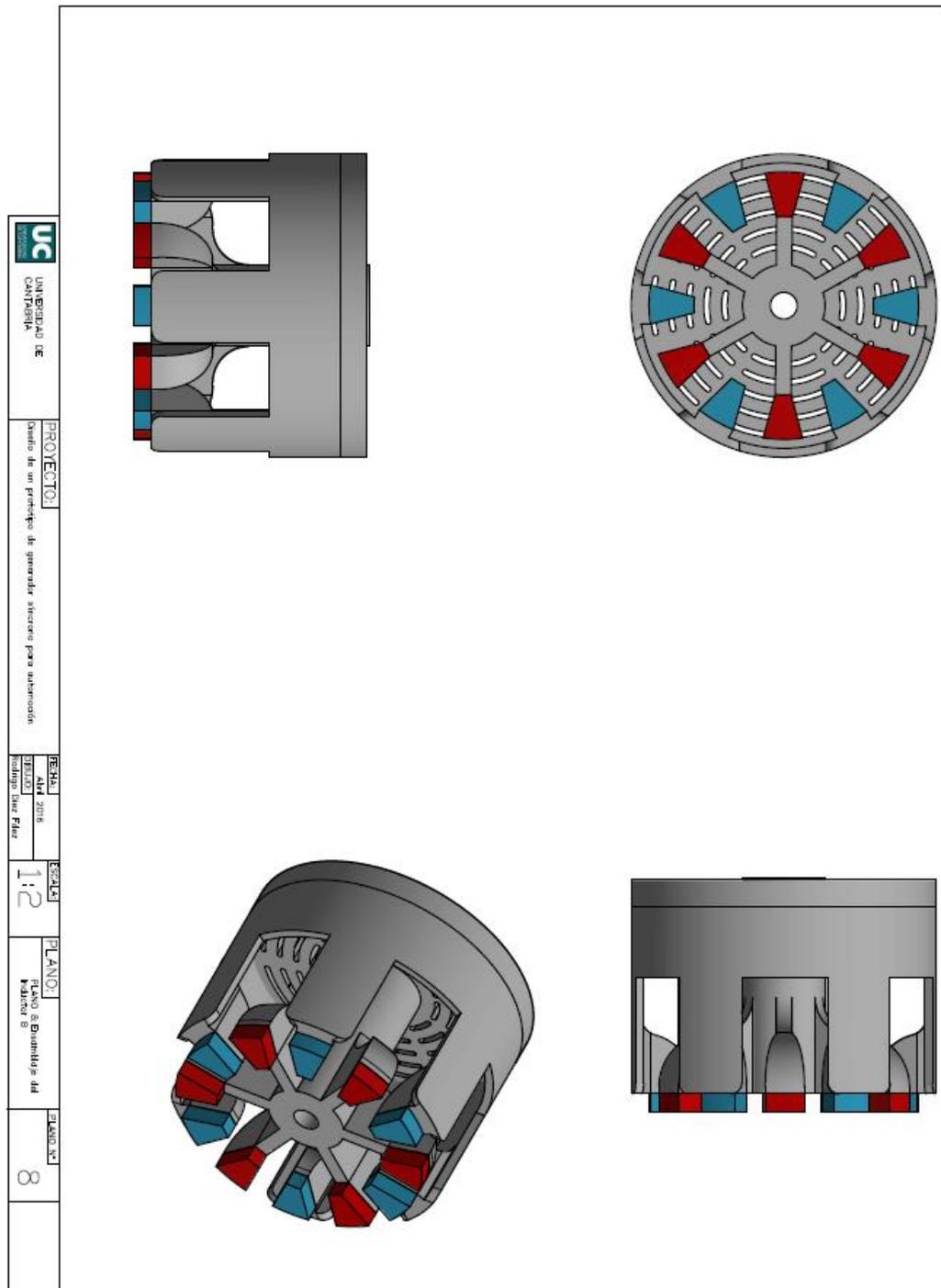
PLANO 6: Cilindro exterior del inductor B



PLANO 7: Tapa de cierre del inductor B

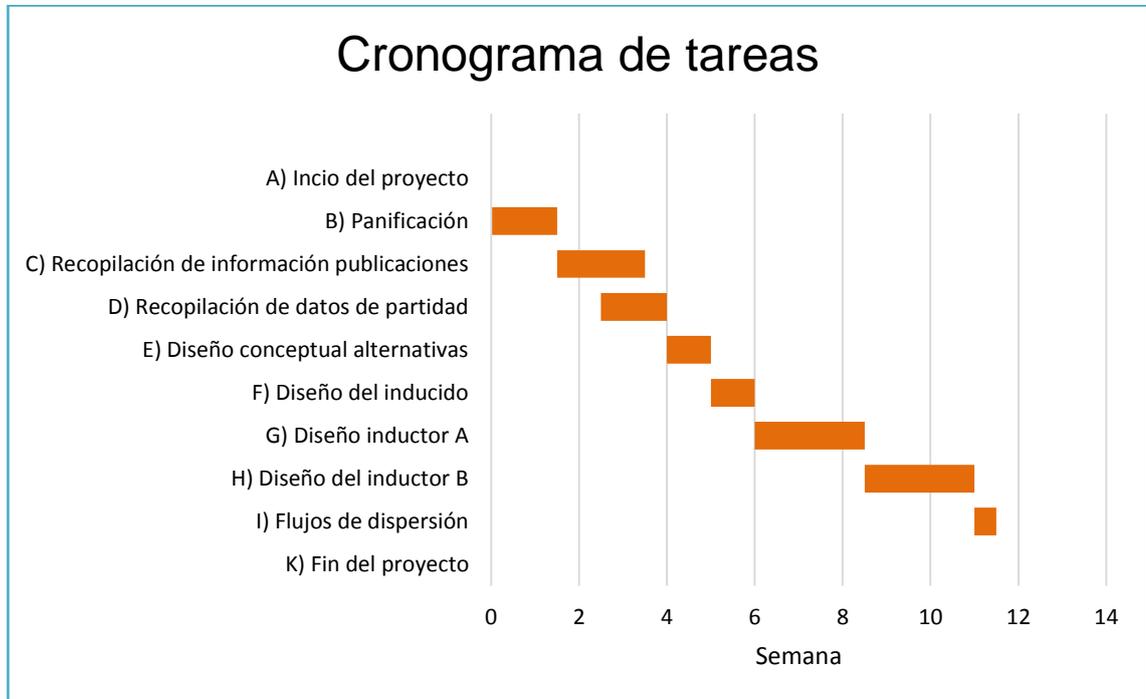


PLANO 8: Ensamblaje del inductor B



ANEXOS

ANEXO 1: Cronograma de tareas



ANEXO 3: Extracción de la corriente generada

Para la extracción de la corriente eléctrica generada emplearemos un colector de anillos, el cual consistirá en unos anillos de bronce solidarios al eje, que irán conectados al arrollamiento del inducido a través de un cableado interno en el mismo y que a su vez estarán unidos por medio de las escobillas, a la etapa de potencia de la máquina diseñada.

Serán obviadas en principio en el diseño mecánico por ser una parte final del proyecto de generación de una máquina de este tipo.



Ilustración 47 Colector típico de anillos

ANEXO 4: Materiales empleados para la construcción del inducido

Tras valorar el empleo de materiales poliméricos de altas prestaciones, como por ejemplo el polyester reforzado con fibra de carbono o de vidrio, se decide optar por componentes más básicos y de menor coste, para intentar abaratar al máximo el coste del producto.

La bakelita a emplear será la C que presenta las siguientes características físico-químicas:

- Tiene buena resistencia al calor hasta los 150 °C
- Resistencia máxima: 50 MPa (7.2 KSI)
- Módulo de elasticidad: 7000 MPa (1015 KSI)
- Resistencia a la flexión: 100 MPa (23.2 KSI)
- Coeficiente de fricción: 0.22

Aunque se sale del ámbito del presente trabajo, sería conveniente la realización de un estudio térmico mediante el empleo de modelización por elementos finitos, para confirmar la viabilidad del empleo de este material en esta aplicación.

ANEXO 5: Propiedades físicas del cobre, resistividad

Propiedades físicas del cobre y del aluminio

Características	Cobre (Cu)	Aluminio (Al)
Resistividad a 20°C ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)	(1/58) = 0,017241	(1/35,7) = 0,028
T_0 (°C)	235	225
Densidad a 20°C (kg/m^3)	8890	2703
Punto de fusión (°C)	1083	660

Tabla 6 Propiedades físicas del cobre y del aluminio

Necesitamos conocer la resistividad del cobre a la temperatura de trabajo de la máquina, que en este caso va a andar rondando los 150°C, para ello interpolaremos para obtener el valor deseado:

$$\rho_{\text{Cu}201} = 1/58 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$$

$$\Theta' = 150^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 235^\circ\text{C}$$

$$\Theta'' = 20^\circ\text{C}$$

$$\frac{\rho_{\theta'}}{\rho_{\theta''}} = \frac{T_0 + \theta'}{T_0 + \theta''} \rightarrow \frac{\rho_{\theta'}}{\frac{1}{58}} = \frac{235 + 150}{235 + 20} \rightarrow \rho_{\theta'} = 0,026 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$$

ANEXO 6: Tabla de conductores de sección circular

TABLA DE CONDUCTORES DE SECCIÓN CIRCULAR

Tamaño nominal del conductor		Resistencia a 20°C		Diámetro total para conductores esmaltados de Cu y Al (mm)			Diámetro total para conductores de cobre (mm) aislados con:							
		[Ω/m]		IS: 4000 (II)			Papel		Algodón				Fibra de vidrio	
		IS: 4000 (I)		IS: 4000 (II)			IS: 3454		IS: 450				IS: 4685	
Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Cu	Al	Fino	Medio	Grosso	Ordinario	Fino	Simple		Doble		Simple Capa	Doble capa
									Ordinario	Fino	Ordinario	Fino		
0,020	0,0003142	54,88000	-	0,025	0,027	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,025	0,0004909	35,12000	-	0,031	0,034	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,032	0,0008043	21,44000	-	0,040	0,043	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,040	0,0012570	13,72000	-	0,050	0,054	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,050	0,001964	8,781000	-	0,062	0,068	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,063	0,003118	5,531000	-	0,078	0,085	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,071	0,003960	4,355000	-	0,088	0,095	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,080	0,005027	3,430000	-	0,098	0,105	0,116	-	-	-	-	-	-	-	-
0,090	0,006363	2,710000	-	0,110	0,117	0,128	-	-	-	-	-	-	-	-
0,100	0,007855	2,915000	-	0,121	0,129	0,141	-	-	-	-	-	-	-	-
0,112	0,009853	1,750000	-	0,134	0,143	0,155	-	-	-	-	-	-	-	-
0,125	0,012270	1,405000	-	0,149	0,159	0,171	-	-	-	-	-	-	-	-
0,140	0,01540	1,120000	-	0,166	0,176	0,189	-	-	0,244	0,229	0,371	0,295	-	-
0,160	0,02011	0,857500	-	0,187	0,199	0,213	-	-	0,264	0,249	0,391	0,315	-	-
0,180	0,02545	0,677500	-	0,209	0,222	0,237	-	-	0,284	0,269	0,411	0,335	-	-
0,200	0,03142	0,548800	0,89130	0,230	0,245	0,261	-	-	0,304	0,289	0,431	0,355	-	-
0,224	0,03941	0,437500	0,71050	0,256	0,272	0,290	-	-	0,354	0,326	0,481	0,404	-	-
0,250	0,04909	0,351200	0,57040	0,284	0,301	0,320	0,500	0,425	0,380	0,352	0,507	0,430	0,380	0,456
0,280	0,06158	0,280000	0,45470	0,315	0,334	0,353	0,530	0,455	0,410	0,382	0,537	0,461	0,410	0,486
0,315	0,07794	0,221200	0,35930	0,352	0,371	0,391	0,565	0,490	0,445	0,417	0,572	0,496	0,445	0,521
0,355	0,09899	0,17420	0,28290	0,395	0,414	0,435	0,605	0,530	0,486	0,458	0,613	0,531	0,486	0,562
0,400	0,12570	0,13720	0,22280	0,442	0,462	0,483	0,650	0,575	0,531	0,503	0,658	0,582	0,531	0,607
0,450	0,15910	0,10840	0,17610	0,495	0,516	0,538	0,700	0,625	0,582	0,554	0,709	0,632	0,582	0,658
0,500	0,19640	0,08781	0,14260	0,548	0,569	0,591	0,750	0,675	0,632	0,604	0,759	0,683	0,632	0,708
0,560	0,24630	0,07000	0,11370	0,611	0,632	0,658	0,810	0,735	0,693	0,665	0,820	0,744	0,693	0,769
0,630	0,3118	0,05531	0,08982	0,684	0,706	0,730	0,880	0,805	0,763	0,736	0,891	0,814	0,763	0,839
0,710	0,3960	0,04355	0,07072	0,757	0,790	0,815	0,985	0,885	0,869	0,842	0,997	0,895	0,844	0,920
0,750	0,4418	0,03903	0,06338	0,809	0,832	0,858	1,025	0,925	0,910	0,882	1,037	0,935	0,885	0,961
0,800	0,5027	0,03430	0,05570	0,861	0,885	0,911	1,075	0,975	0,960	0,933	1,087	0,986	0,935	1,011
0,850	0,5675	0,03038	0,04934	0,918	0,937	0,964	1,125	1,025	1,011	0,983	1,138	1,036	0,986	1,062
0,900	0,6363	0,02710	0,04401	0,965	0,990	1,017	1,175	1,075	1,081	1,034	1,188	1,087	1,036	1,112
0,950	0,7089	0,02432	0,03950	1,017	1,041	1,070	1,225	1,125	1,112	1,084	1,239	1,137	1,087	1,163
1,000	0,7855	0,02195	0,03565	1,068	1,093	1,123	1,275	1,200	1,162	1,135	1,290	1,215	1,135	1,215
1,060	0,8826	0,01954	0,03173	1,130	1,155	1,184	1,335	1,260	1,225	1,195	1,350	1,275	1,200	1,275
1,120	0,9853	0,01750	0,02842	1,192	1,217	1,246	1,395	1,320	1,285	1,255	1,310	1,335	1,260	1,335
1,180	1,0937	0,015770	0,025600	1,254	1,279	1,308	1,455	1,380	1,345	1,315	1,470	1,395	1,320	1,395
1,250	1,2273	0,014050	0,022820	1,325	1,351	1,381	1,525	1,450	1,415	1,385	1,540	1,465	1,390	1,465
1,320	1,3687	0,012600	0,020460	1,397	1,423	1,453	1,595	1,520	1,485	1,460	1,615	1,535	1,460	1,535
1,400	1,5396	0,011200	0,018190	1,479	1,506	1,535	1,700	1,575	1,590	1,565	1,720	1,645	1,540	1,615
1,500	1,7674	0,009757	0,015840	1,581	1,608	1,638	1,800	1,675	1,695	1,665	1,820	1,745	1,640	1,720
1,600	2,0109	0,008575	0,013930	1,683	1,711	1,741	1,900	1,775	1,795	1,765	1,920	1,845	1,745	1,820
1,700	2,2701	0,007596	0,012340	1,785	1,813	1,844	2,000	1,875	1,895	1,865	2,020	1,945	1,845	1,920
1,800	2,5450	0,006775	0,011000	1,888	1,916	1,947	2,100	1,975	1,995	1,970	2,125	2,045	1,945	2,020
1,900	2,8357	0,006081	0,009876	1,990	2,018	2,049	2,200	2,075	2,095	2,070	2,225	2,150	2,045	2,120
2,000	3,1420	0,005488	0,008913	2,092	2,120	2,152	2,350	2,250	2,225	2,195	2,375	2,275	2,145	2,225
2,120	3,5304	0,004884	0,007932	2,214	2,243	2,275	2,470	2,370	2,345	2,315	2,495	2,395	-	2,395
2,240	3,9413	0,004375	0,007105	2,336	2,366	2,398	2,590	2,490	2,465	2,440	2,620	2,515	-	2,515
2,360	4,3749	0,003941	0,006401	2,459	2,488	2,522	2,710	2,610	2,585	2,560	2,740	2,635	-	2,640
2,500	4,9093	0,003512	0,005704	2,601	2,631	2,665	2,850	2,725	2,730	2,700	2,880	2,780	-	2,780
2,650	5,5162	0,003126	0,005077	2,754	2,784	2,819	3,000	2,875	2,830	2,850	3,035	2,930	-	2,930
2,800	6,1583	0,002800	0,004547	2,907	2,938	2,972	3,150	3,025	3,030	3,005	3,185	3,080	-	3,080
3,000	7,0695	0,002439	0,003961	3,110	3,142	3,176	3,350	3,225	3,235	3,205	3,385	3,285	-	3,285
3,150	7,7941	0,002212	0,003593	3,263	3,284	3,330	3,500	3,375	3,385	3,355	3,540	3,435	-	3,435
3,350	8,8153	0,001956	0,003177	3,466	3,498	3,534	3,700	3,575	3,585	3,560	3,740	3,635	-	3,690
3,550	9,8993	0,001742	0,002829	3,670	3,702	3,738	3,900	3,775	3,790	3,760	3,940	3,840	-	3,890
3,750	11,0461	0,001561	0,002535	3,873	3,905	3,942	4,100	3,975	3,990	3,965	4,145	4,040	-	4,095
4,000	12,5680	0,001372	0,002228	4,127	4,160	4,196	4,350	4,300	4,245	4,125	4,395	4,295	-	4,345
4,250	14,1881	0,001215	0,001974	4,380	4,414	4,451	4,600	4,550	4,495	4,470	4,650	4,545	-	-
4,500	15,9064	0,001084	0,001761	4,634	4,668	4,705	4,850	4,800	4,750	4,720	4,900	4,800	-	-
4,750	17,7209	0,000973	0,001580	4,889	4,923	4,961	5,100	5,050	5,000	4,975	5,155	5,050	-	-
5,000	19,6370	0,0008781	0,001426	5,142	5,177	5,215	5,350	5,300	5,225	5,225	5,405	5,305	-	-

Tabla 7 Tabla de conductores de sección circular

Fuente: Tablas, fórmulas y gráficas para el cálculo de máquinas asíncronas (Miguel Ángel Rodríguez Pozueta)

ANEXO 7: Material empleado en la construcción del inductor

Dado que el inductor se trata del estator de la máquina que hemos diseñado, no es necesario que presenta características mecánicas especialmente exigentes. Esto cambia en cuanto hablamos de sus características eléctricas, punto en el cual sí que necesitamos un material con alta permeabilidad magnética.

“El acero eléctrico, también llamado acero magnético, acero al silicio, o acero para transformadores, es un acero especial fabricado para poseer determinadas propiedades magnéticas, tales como una zona de histéresis pequeña (poca disipación de energía por ciclo), que equivale a bajas pérdidas en el núcleo y una alta permeabilidad magnética.”

Propiedades físicas:

(valores típicos para un contenido de silicio ~3.1%)

- Punto de fusión: ~ 1500 °C¹
- Densidad: 7650 kg/m³
- Resistividad: $47.2 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$

Propiedades magnéticas:

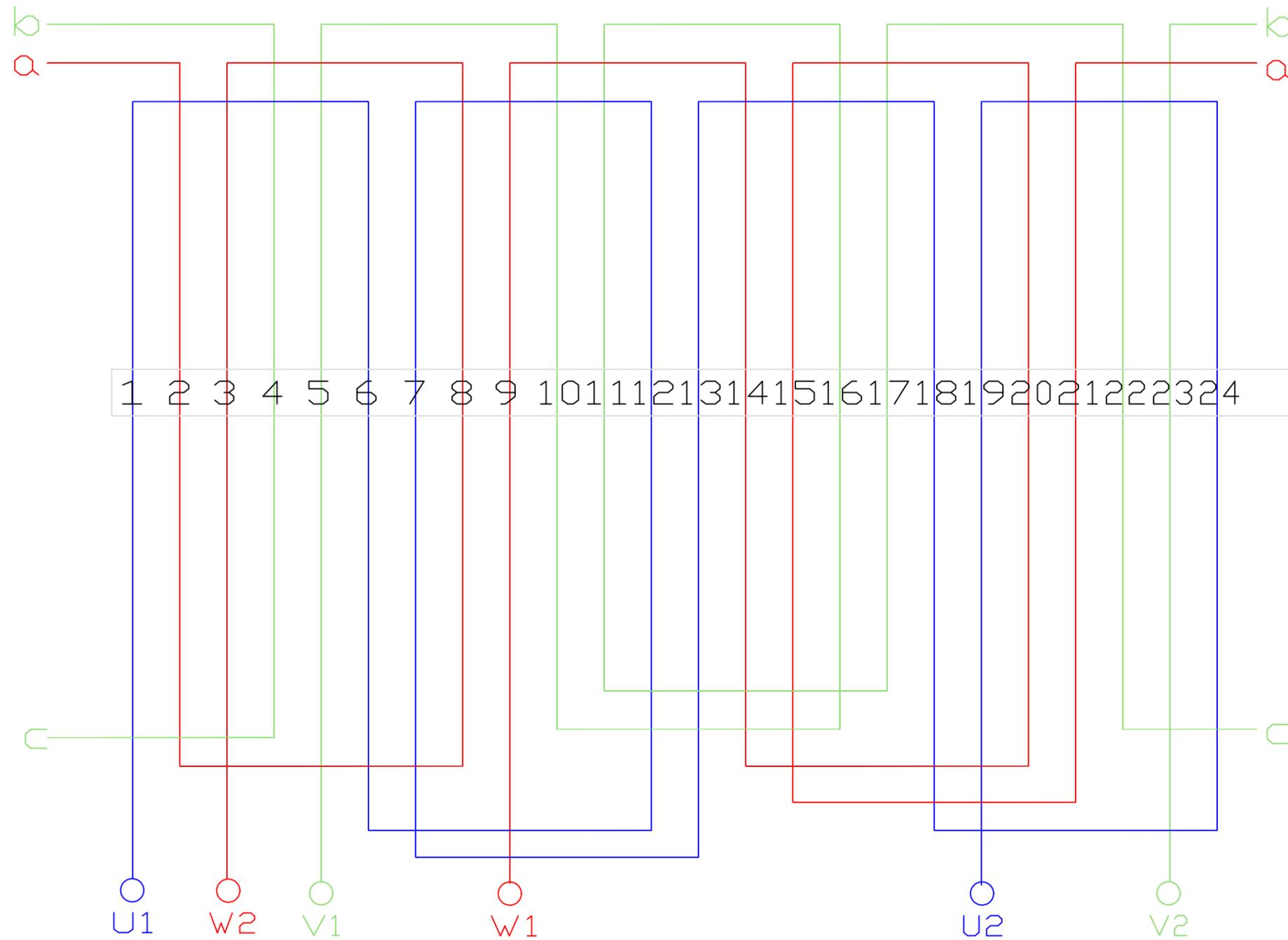
Las propiedades magnéticas del acero eléctrico dependen del tratamiento térmico, puesto que el aumento del tamaño medio de los cristales disminuye las pérdidas por histéresis. Las pérdidas por histéresis se determinan mediante una prueba estándar y para los grados comúnmente disponibles de acero eléctrico, pueden variar de 2 a 10 vatios por kilogramo para una frecuencia de 60 Hz y un flujo magnético de 1,5 Tesla. Existen también aceros eléctricos semielaborados, los cuales son entregados en un estado tal que, después de darle a las chapas la forma final mediante troquelado, un posterior y último tratamiento térmico desarrolla el tamaño de grano deseado de 150 micrómetros. Los aceros totalmente elaborados generalmente se entregan

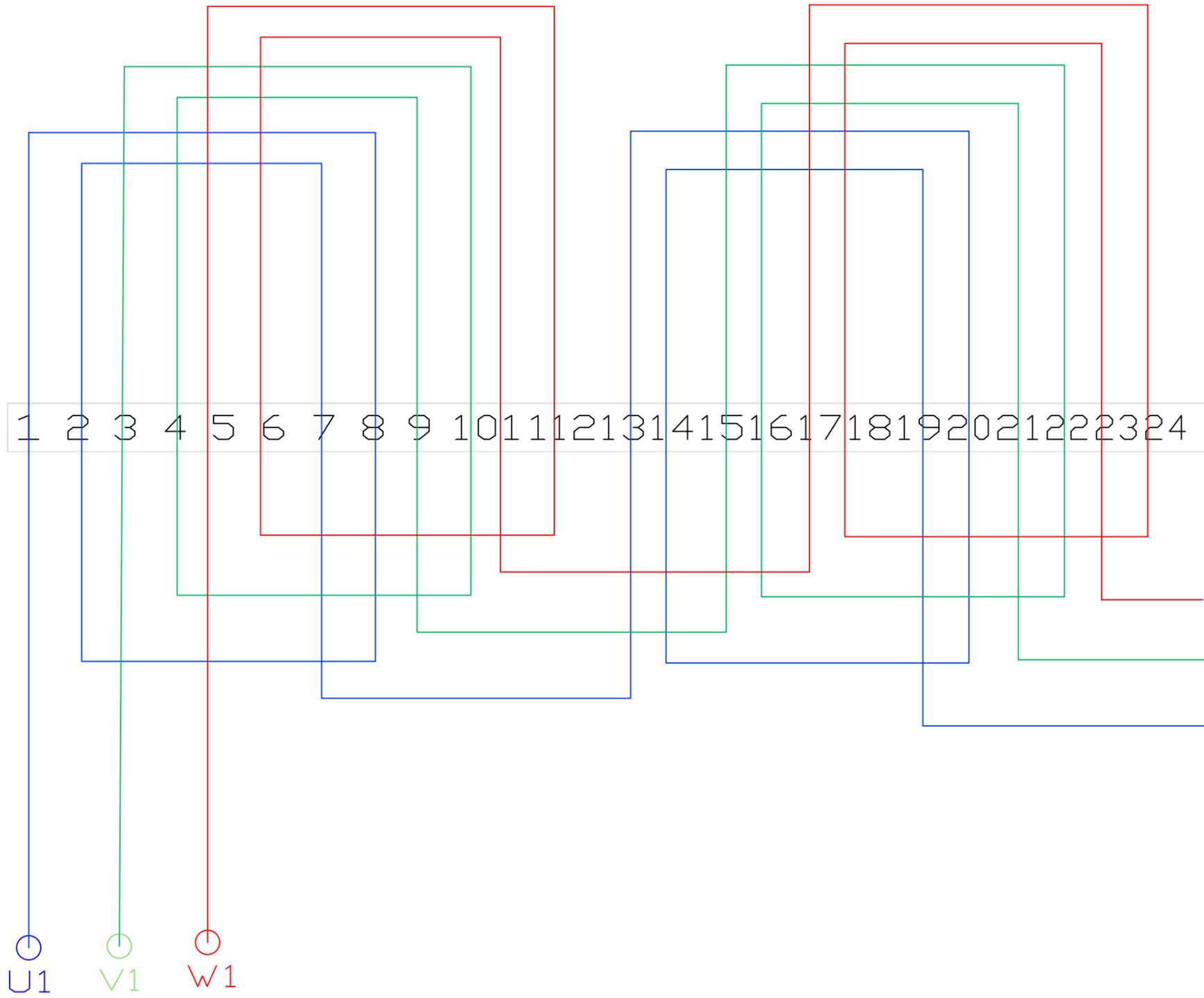
con revestimiento aislante, tratamiento térmico completo, y propiedades magnéticas definidas, para aplicaciones donde la operación de troquelado no degrada significativamente las propiedades del material. Una curvatura excesiva, un tratamiento térmico incorrecto, o incluso una manipulación o almacenaje incorrectos del acero pueden afectar negativamente a las propiedades magnéticas y aumentar el ruido debido a la magnetostricción.

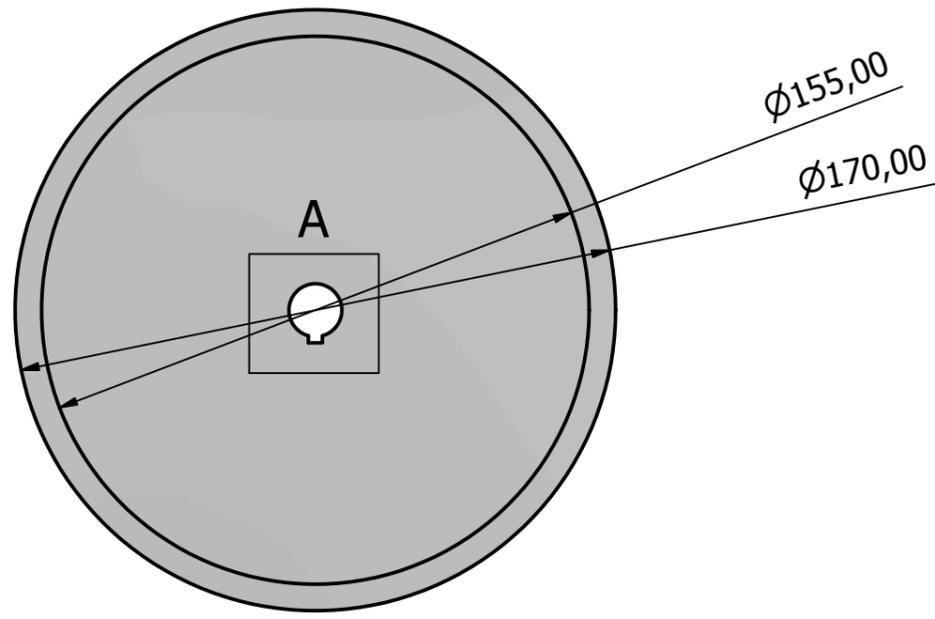
Fuente: Wikipedia (https://es.wikipedia.org/wiki/Acero_el%C3%A9ctrico)

BIBLIOGRAFÍA

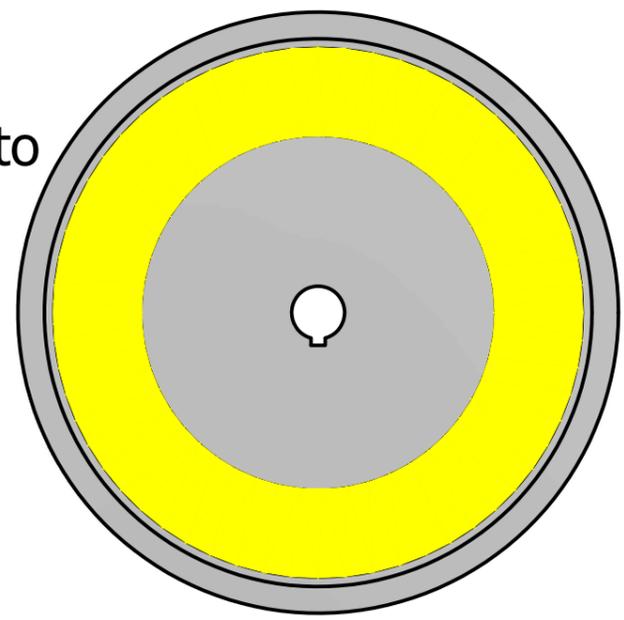
TÍTULO	AUTOR	EDITORIAL
Cálculo industrial de máquinas eléctricas	Juán Corrales Martín	Boixaren
Máquinas eléctricas rotativas	F. Vargas-Machuca	Megaprint
Apuntes de la asignatura: “Diseño y cálculo de máquinas eléctricas”	Miguel Ángel Rodríguez Pozueta	
Manual de fórmulas técnicas	K. Gieck	Alfaomega
Design of electrical machines	K.G. Upadhayay	New age international
Design of rotating electrical machines	J. Pyrhonen	Wiley
Axial flux permanent magnet brushless machines	Jacek f. Gieras	Springer



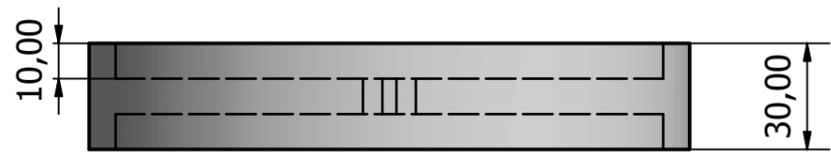
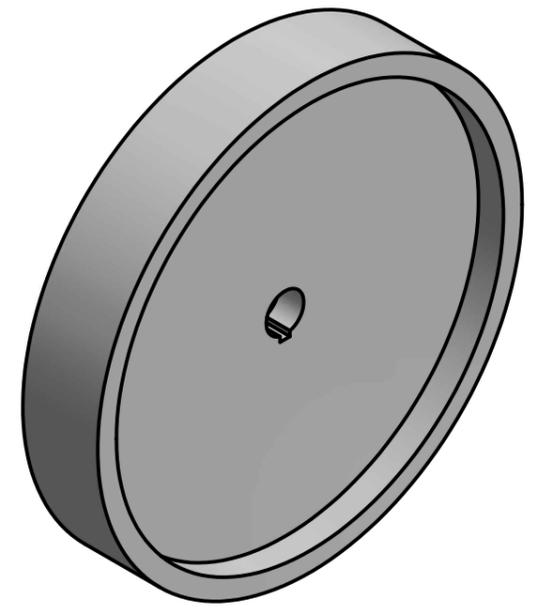
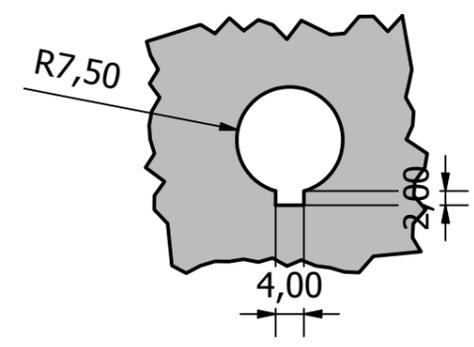


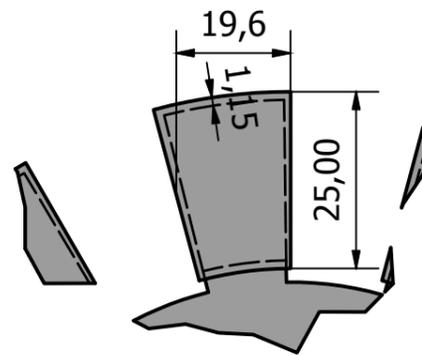
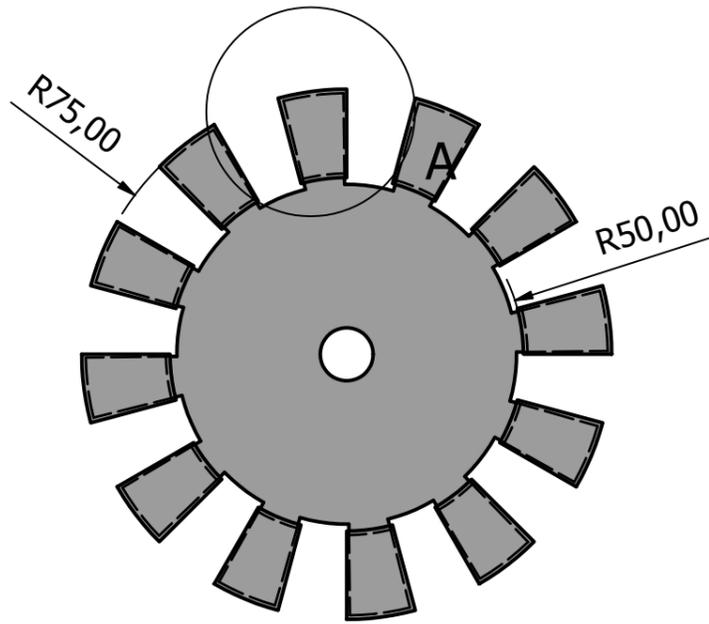


Zona del arrollamiento

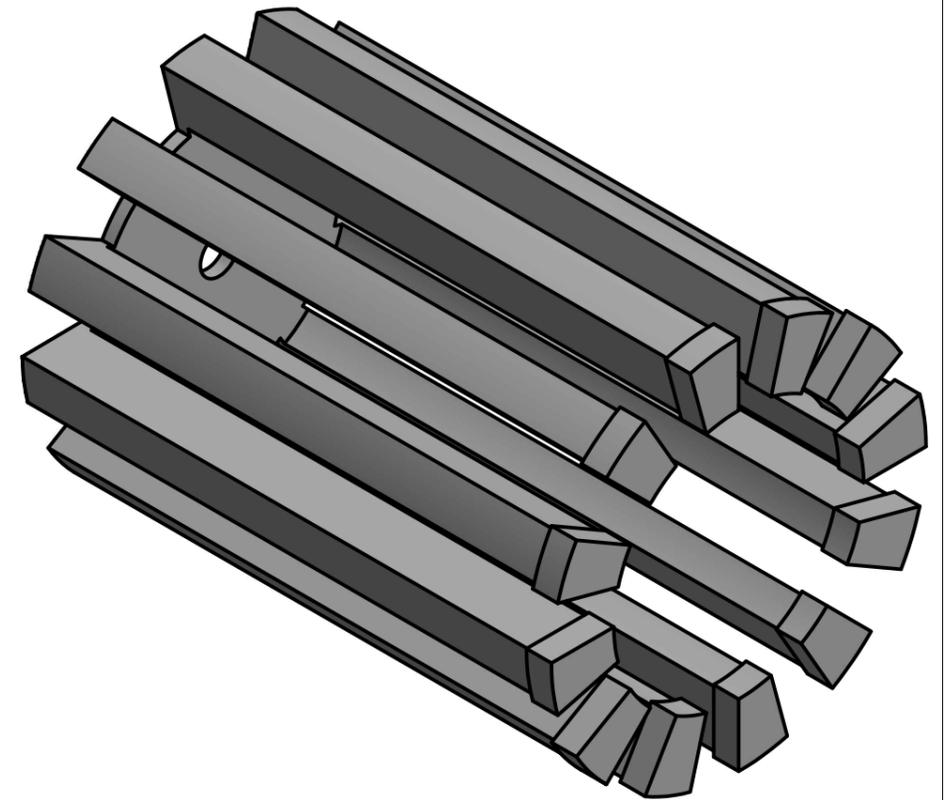
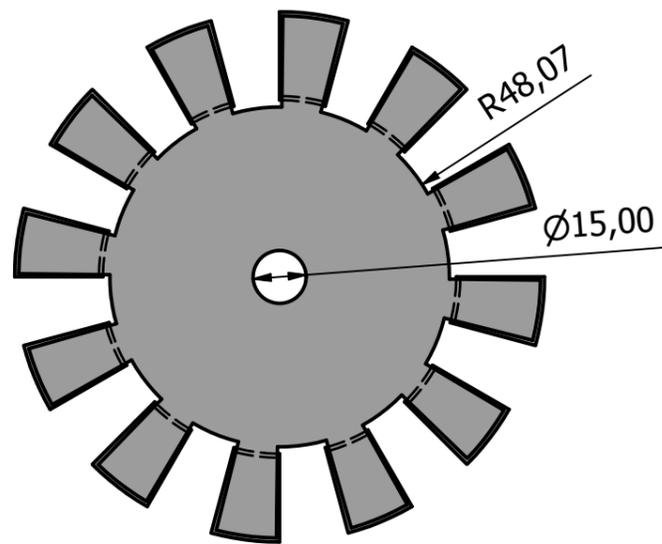
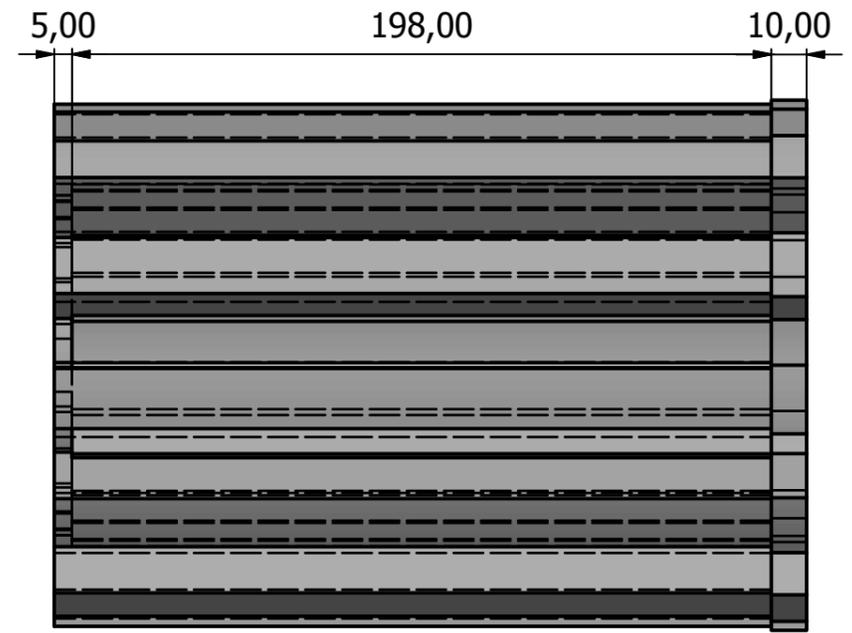


A (1:1)





A (1 : 1)



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

PROYECTO:

Diseño de un prototipo de generador síncrono para automoción

FECHA:

Abril 2016

DIBUJO:

Rodrigo Díez Fdez

ESCALA:

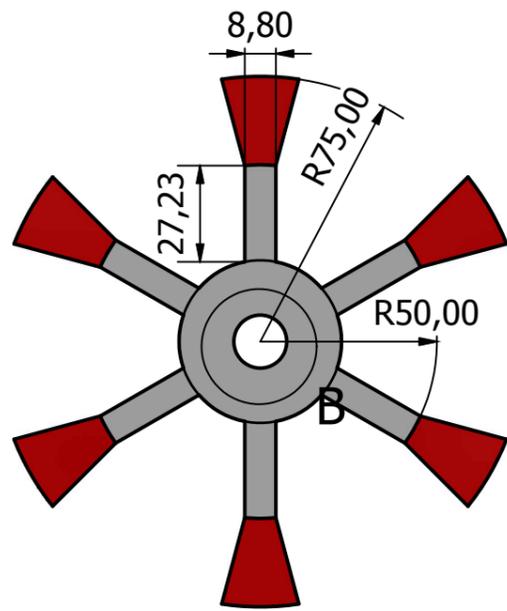
1:2

PLANO:

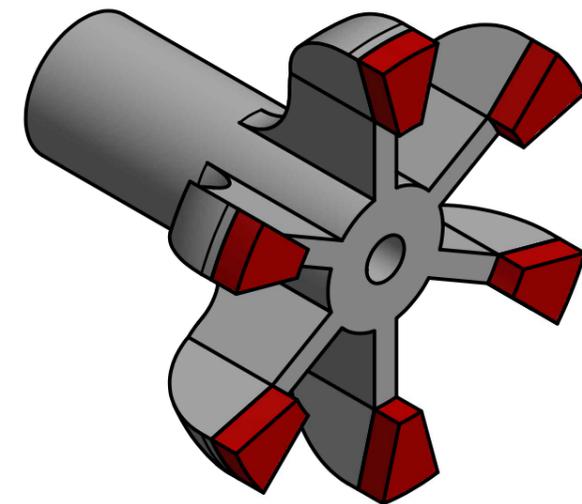
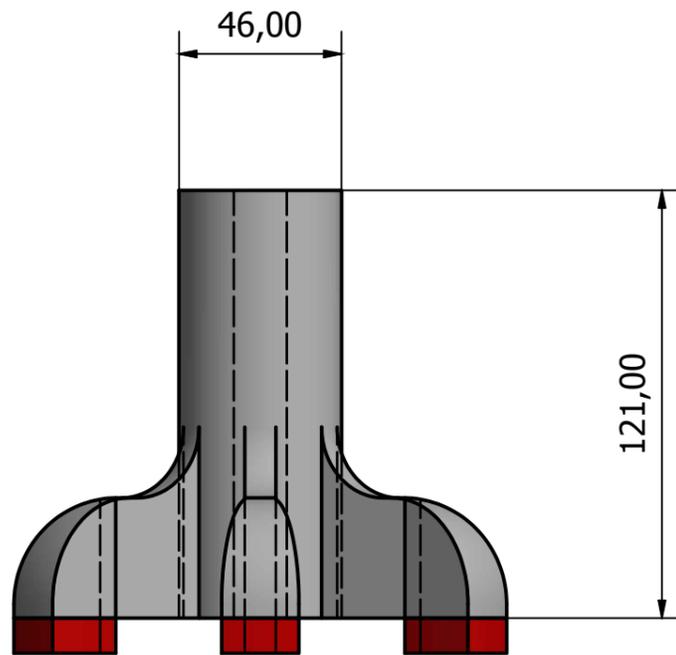
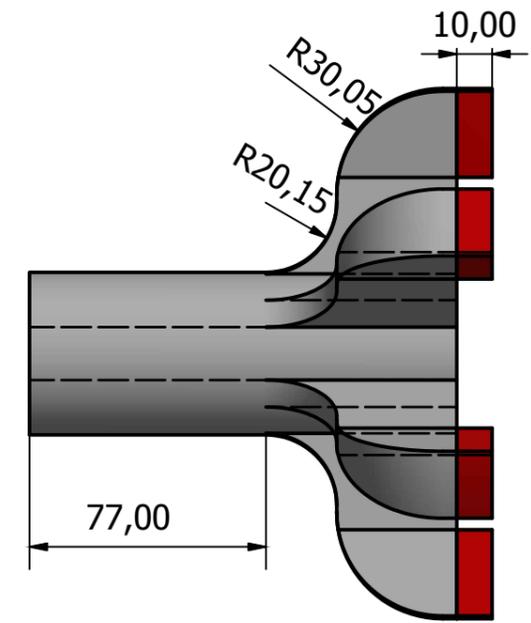
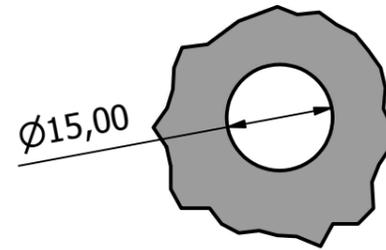
PLANO 4: Diseño del inductor A

PLANO N°

4



B (1 : 1)



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

PROYECTO:

Diseño de un prototipo de generador síncrono para automoción

FECHA:

Abril 2016

DIBUJO:

Rodrigo Díez Fdez

ESCALA:

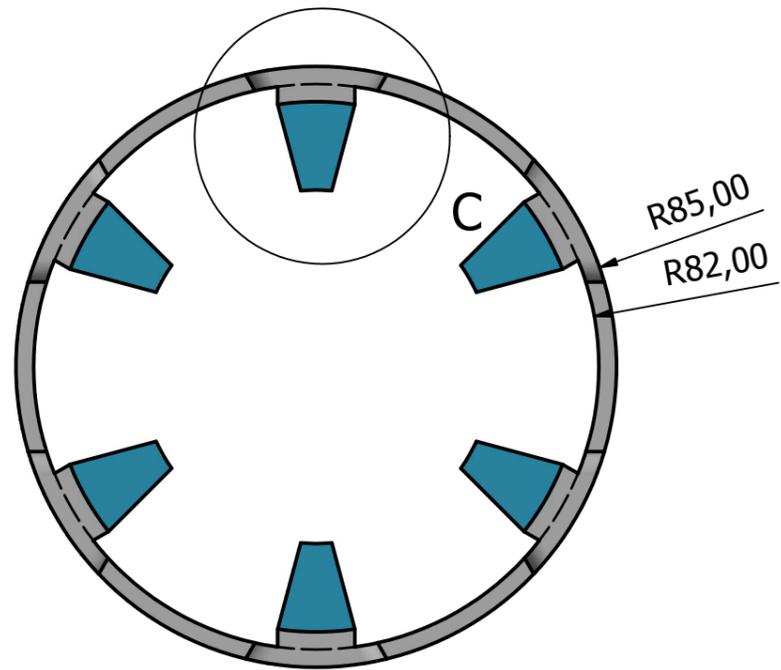
1:2

PLANO:

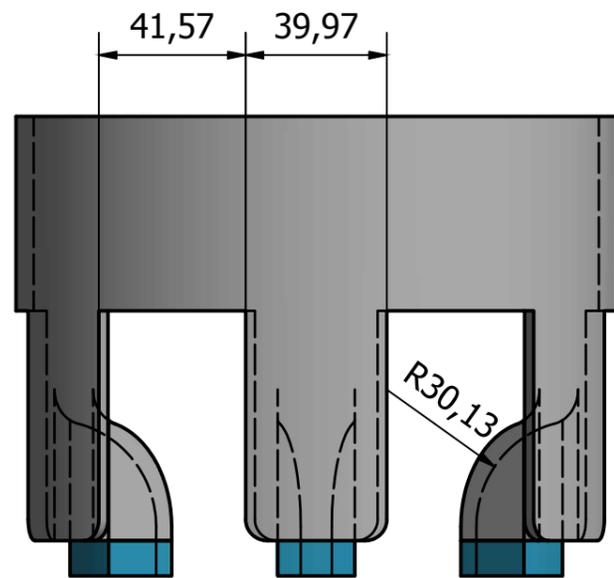
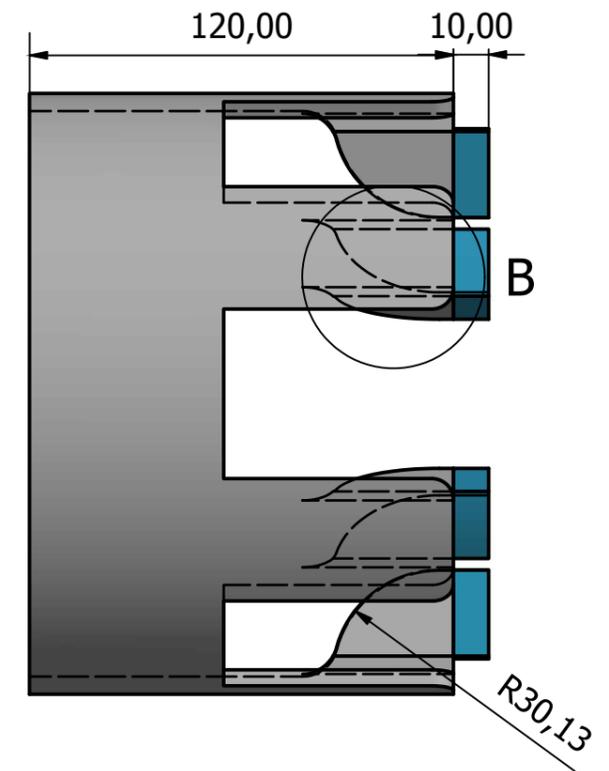
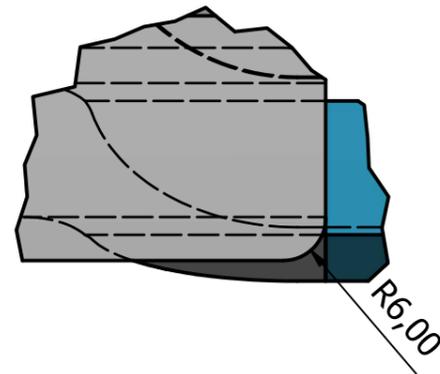
PLANO 5: Cilindro interior del inductor B

PLANO N°

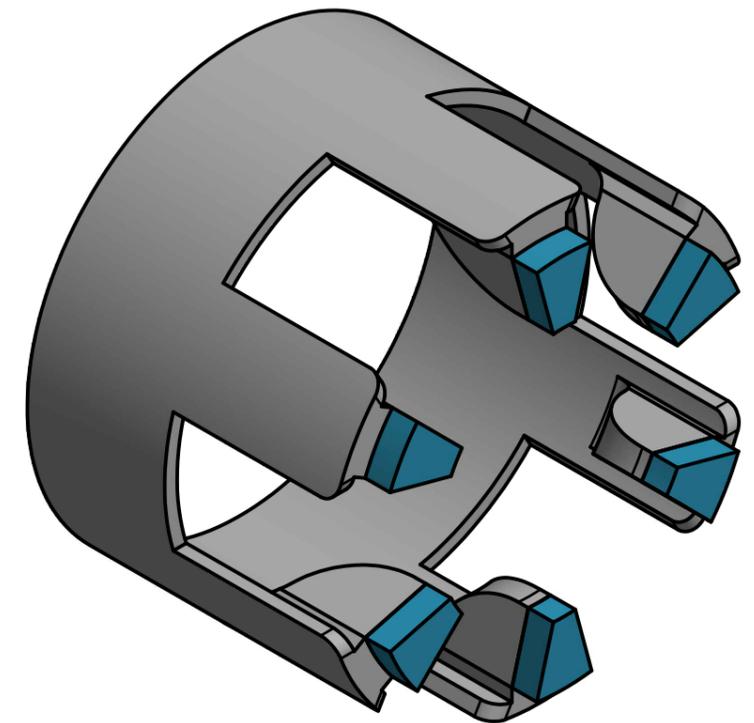
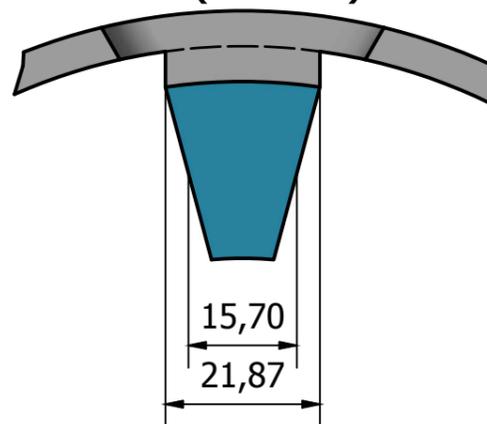
5

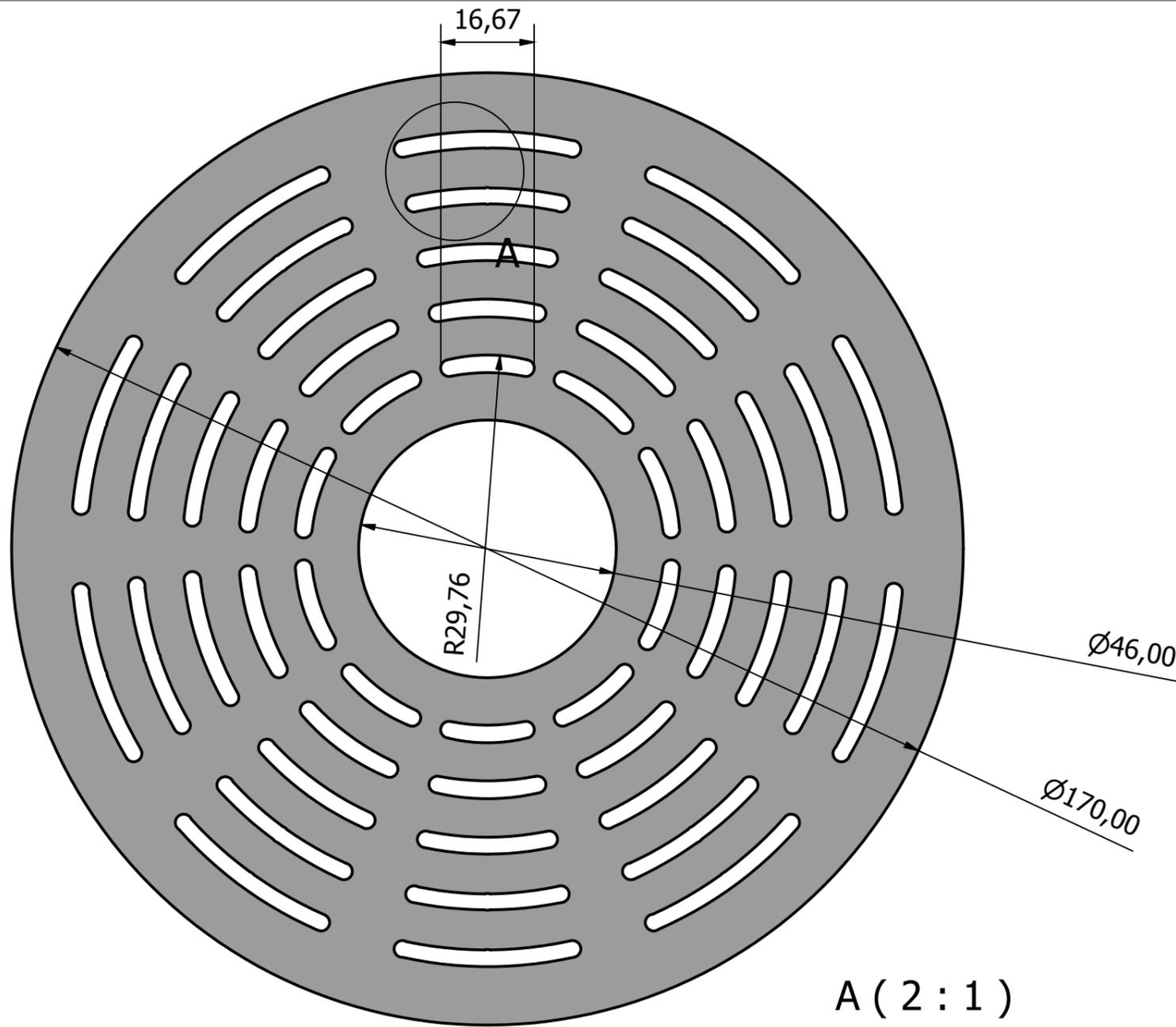


B (1:1)

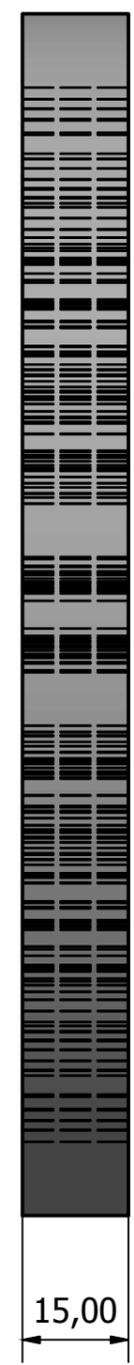
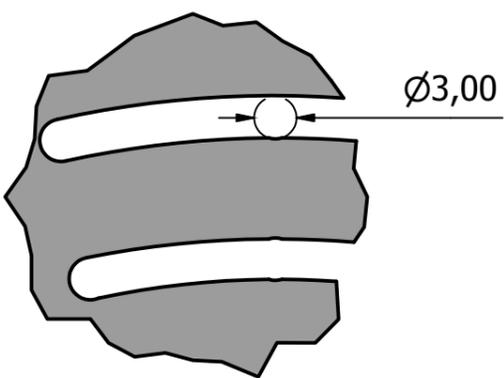


C (1:1)

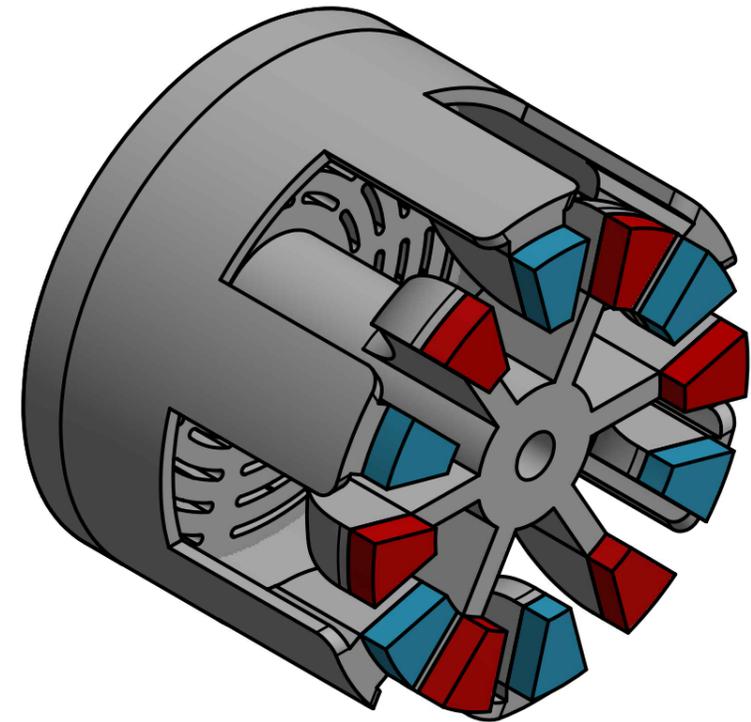
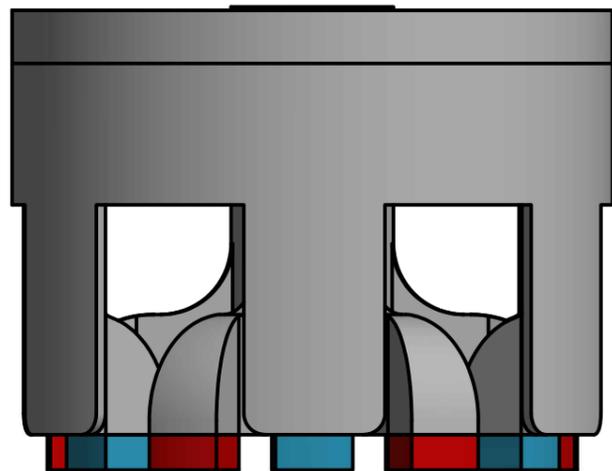
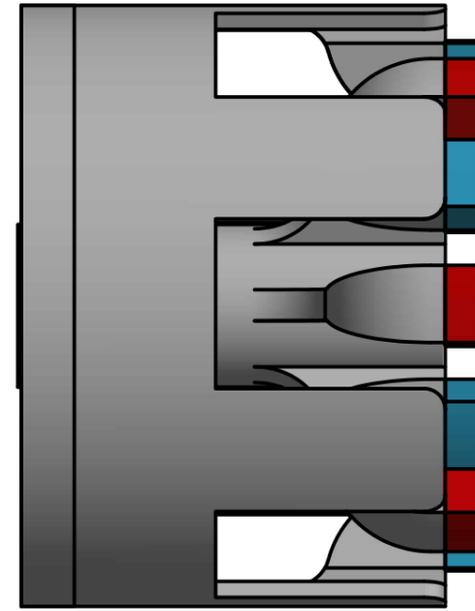
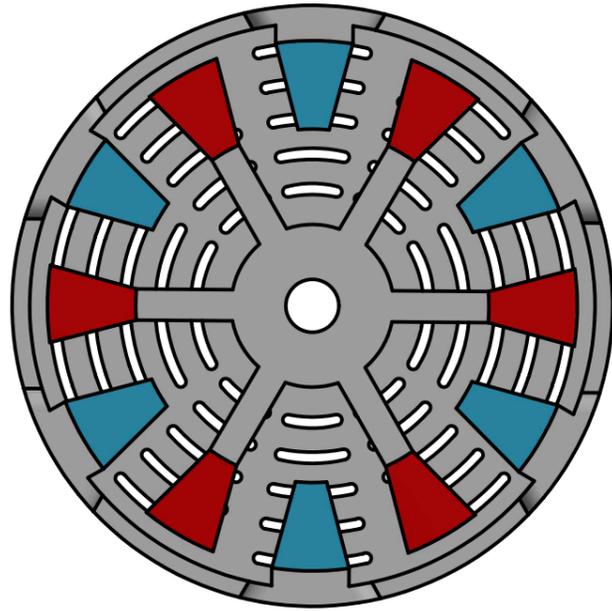




A (2 : 1)



 UNIVERSIDAD DE CANTABRIA	PROYECTO:	FECHA:	ESCALA:	PLANO:	PLANO N°
	Diseño de un prototipo de generador síncrono para automoción	Abril 2016 DIBUJO: Rodrigo Díez Fdez	1:1	PLANO 7: Tapa de cierre del inductor B	7



UNIVERSIDAD DE
CANTABRIA

PROYECTO:

Diseño de un prototipo de generador síncrono para automoción

FECHA:

Abril 2016

DIBUJO:

Rodrigo Díez Fdez

ESCALA:

1:2

PLANO:

PLANO 8: Ensamblaje del
Inductor B

PLANO N°

8