



**PROYECTO:**  
**ANÁLISIS EXPERIMENTAL Y**  
**MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS**  
**ELEMENTOS FINITOS DE UNA**  
**MÁQUINA SÍNCRONA DE**  
**IMÁNES PERMANENTES DE**  
**POTENCIA FRACCIONARIA**

Alumno: **Rosa Laplaza Castán**

Profesor: **Antonio Usón**

Especialidad Electricidad

Convocatoria Febrero 2014

## INDICE

### Contenido

1	OBJETIVOS.....	6
2	ANTECEDENTES.....	6
3	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS ALTERNADORES DE AUTOMÓVILES.....	7
3.1	Inducción electromagnética .....	7
3.2	Funcionamiento de un alternador genérico.....	10
3.3	Coagging .....	13
4	CONSTRUCCIÓN BÁSICA.....	15
4.1	Estructura y partes de un alternador genérico .....	16
4.2	Componentes del alternador .....	18
4.2.1	Estator o inducido .....	18
4.2.2	Rotor o inductor .....	18
4.2.3	Escobillas .....	19
4.2.4	Puente rectificador.....	20
4.2.5	Carcasa .....	21
4.2.6	Ventilador y polea .....	22
4.3	Funcionamiento del alternador.....	22
5	TIPOS DE BOBINADOS DE CORRIENTE ALTERNA.....	23
5.1	Términos técnicos del bobinado de motores eléctricos .....	24
5.1.1	Bobina. ....	24
5.1.2	Paso polar.....	24
5.1.3	Paso de bobina.....	24
5.1.4	Paso diametral.....	25
5.1.5	Paso acortado.....	25
5.1.6	Paso alargado.....	25
5.1.7	Devanados abiertos.....	25
5.1.8	Devanado de una capa o simple capa.....	25
5.1.9	Devanado de dos capas o doble capa.....	26
5.1.10	Grupo polar.....	26
5.1.11	Devanados enteros y fraccionarios.....	27

5.2	BOBINADO POR POLOS.....	27
5.3	BOBINADO POR POLOS CONSECUENTES.....	27
5.4	BOBINADOS CONCÉNTRICOS.....	28
5.5	BOBINADO IMBRICADO .....	29
5.6	BOBINADO ONDULADO.....	31
5.7	CÁLCULOS GENERALES PARA LOS DIFERENTES TIPOS DE BOBINADOS. ....	32
5.7.1	Ranuras que ocupa el bobinado por polo magnético y por fase. ....	32
5.7.2	Número de bobinas.....	32
5.7.2.1	Bobinado de una capa.....	32
5.7.2.2	Bobinado de dos capas.....	32
5.7.3	Número de bobinas por grupo.....	32
5.7.4	Paso polar.....	33
5.7.5	Paso de bobina-ancho de bobina.....	33
5.8	Cálculos para bobinados concéntricos.....	33
5.8.1	Amplitud del grupo. ....	33
5.9	Cálculos para bobinados excéntricos o imbricados enteros.....	34
5.10	Bobinados excéntricos o imbricados fraccionarios.....	34
6	CARACTERIZACIÓN DEL DEVANADO ESTATÓRICO.....	35
7	CARACTERIZACIÓN DEL ROTOR.....	39
7.1	Lata ferromagnética .....	40
7.2	Imanes de tierras raras.....	41
7.3	Eje .....	43
7.4	Rodamientos.....	43
8	CARACTERIZACIÓN DE LA MÁQUINA.....	44
8.1	Soporte .....	44
9	MÁQUINA REVERSIBLE SÍNCRONA.....	45
9.1	OBJETIVO .....	45
9.2	PLANTEAMIENTO BÁSICO.....	45
9.3	GENERADORES SÍNCRONOS Y SU FUNCIONAMIENTO .....	46
9.3.1	Introducción a las máquinas de corriente alterna .....	46
9.3.2	Construcción de generadores síncronos .....	46

9.3.3	Funcionamiento interno del generador y generación del campo magnético giratorio. ....	49
9.3.4	Velocidad de rotación de un generador síncrono.....	53
9.3.5	Fuerza electromotriz generada por un generador síncrono.....	54
9.3.6	Potencia y par en los generadores síncronos.....	54
9.3.7	Resumen de funcionamiento de un generador síncrono.....	55
10	ENSAYOS Y ESTUDIO METROLOGICO .....	56
10.1	MATERIAL .....	57
11	SIMULACIONES MEDIANTE FEMM.....	57
12	OBTENCIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO ROTÓRICO .....	58
12.1	Mediante sonda sensor de efecto Hall.....	58
12.2	Mediante simulación en FEMM.....	60
12.3	Conclusiones.....	60
13	OBTENCIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO ESTATÓRICO .....	62
13.1	Mediante sonda de efecto hall.....	62
13.2	Mediante simulación en FEMM.....	62
13.3	Conclusiones.....	64
14	ENSAYO DE VACIO: GENERADOR SINCRONO .....	64
14.1	GENERADOR $p$ estator= $p$ rotor =6.....	65
14.1.1	Ensayos y estudio metrológico.....	65
14.1.2	Ánalisis por Femm .....	67
14.1.2.1	Análisis mediante Femm: $p$ estator= $p$ rotor =6 y $n=500\text{rpm}$ .....	71
14.1.2.2	Análisis mediante femm: $p$ estator= $p$ rotor =6 y $n=3000\text{rpm}$ .....	76
14.1.3	Conclusiones.....	77
14.2	GENERADOR $p$ estator $\neq$ $p$ rotor .....	82
14.2.1	Ensayos y estudio metrológico.....	82
14.2.1.1	Conclusiones estudio metrológico .....	83
14.2.2	Ánalisis por femm.....	84
14.2.2.1	Análisis mediante femm: $p$ estator $\neq$ $p$ rotor y $n=500\text{rpm}$ .....	85
14.2.2.2	Análisis mediante femm: $p$ estator $\neq$ $p$ rotor y $n=3000\text{rpm}$ .....	86
14.2.2.3	Conclusiones simulación femm.....	87

---

15	ENSAYO EN VACIO: MOTOR SINCRONO.....	90
15.1	MOTOR p estator=p rotor; n=500rpm.....	90
15.1.1	Ensayos y estudio metrológico.....	90
15.1.2	Ánálisis por Femm .....	91
15.2	MOTOR p estator≠p rotor; n=500rpm.....	98
15.2.1	Ensayos y estudio metrológico.....	98
15.2.2	Ánálisis por Femm .....	98
15.3	CONCLUSIONES.....	101
16	BIBLIOGRAFÍA .....	102

## 1 OBJETIVOS.

Se explican a continuación los objetivos planteados al comenzar el proyecto, y que se han alcanzado en gran medida, gracias al número de horas invertido y al apoyo recibido.

El objetivo que se plantea es la propuesta de un rotor y devanado estatórico de una máquina eléctrica reversible (motor-generador) para el prototipo de volante de inercia levitado mediante superconductores.

La idea principal es partir de un devanado estatórico de un alternador de automóvil, el cual conseguiremos en el desguace, un soporte que permita introducir distintos rotores caseros, construidos por una lata ferromagnética e imanes, y llegar a proponer un nuevo devanado y un rotor definitivo que se mandarán construir a los talleres correspondientes.

El proyecto se centra en el estudio del único estator y de los distintos rotores. Todo ello para conseguir una máquina eléctrica reversible que reúna las características necesarias para poder ser funcional en el caso del prototipo del volante de inercia.

## 2 ANTECEDENTES.

La realización de este proyecto surge como necesidad de mejorar y culminar el proyecto realizado por PEDRO JESÚS LAMBEA ANTÓN titulado: "PROTOTIPO DE VOLANTE DE INERCIA LEVITADO MEDIANTE SUPERCONDUCTORES"

Por otra parte se pretende estudiar y diseñar el mejor modo de recuperar la energía acumulada en el motor, haciendo que trabaje como generador, para iluminar una pequeña maqueta a base de diodos Led.

A continuación se exponen en los distintos capítulos los aspectos técnicos del proyecto, su diseño y construcción, así como las explicaciones teóricas y referencias históricas, necesarias para una mayor comprensión.

### 3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS ALTERNADORES DE AUTOMÓVILES

#### 3.1 Inducción electromagnética

El alternador basa su funcionamiento en los efectos de inducción electromagnética que se producen en las bobinas sometidas a las variaciones de un campo magnético. Cuando se hace girar sobre un punto medio un imán colocado frente a una bobina plana, el campo magnético que afecta a la bobina es variable y, como consecuencia de ello, en la bobina se induce una f.e.m. que evoluciona al compás del giro del imán.

Para comprender la forma en que se produce una fuerza electromotriz alterna, consideremos el dispositivo representado en la figura 3.1, en el que se encuentra una bobina que puede girar en el seno de un campo magnético creado por un sistema polar. Los extremos de la espira están unidos a los anillos rozantes, sobre los que frotan las escobillas que sirven para poder conectar la espira a un circuito exterior, que en la figura está constituido por un galvanómetro.

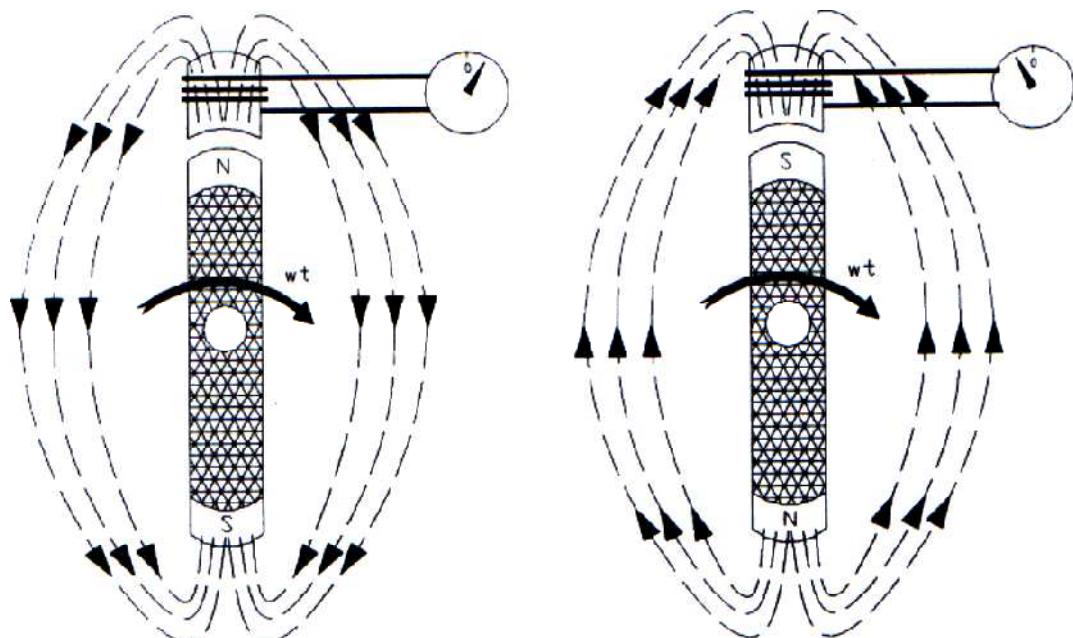


Figura 3.1 Campo magnético giratorio

Cuando el polo norte se presenta a la bobina, ésta se ve afectada por un cambio en el campo magnético del imán, generándose en ella una f.e.m. y una corriente eléctrica inducida que es indicada por el galvanómetro. Si es el polo sur el que se presenta a la bobina, la f.e.m. inducida en ella como consecuencia de la variación del flujo magnético es de sentido contrario al anterior.

Como los polos del campo magnético cambian continuamente de posición a consecuencia del giro, en la bobina se induce una f.e.m. alterna, cuya magnitud y sentido está variando continuamente. La fem es proporcional a la rapidez con que varía el flujo magnético. Por tanto la fem es máxima cuando es máxima la velocidad de cambio de campo magnético o de su flujo en la espira.

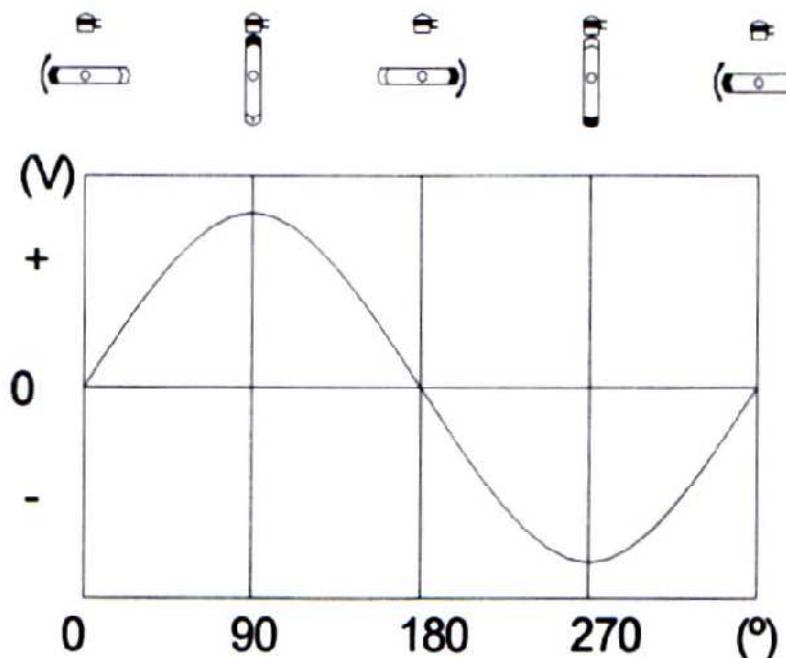


Figura 3.2 Fuerza electromotriz. Alterna

Supongamos que unimos dos conductores formando una espira y en su interior hacemos girar un electroimán. En esta situación (figura 3.3), el campo magnético giratorio afecta a los conductores activos que forman la espira y en cada uno de ellos se induce una f.e.m. senoidal. Así pues, en el conjunto de la espira se suman dos fuerzas electromotrices senoidales de igual frecuencia e igual fase, resultando otra f.e.m., también senoidal, de frecuencia y fase idénticas a las componentes.

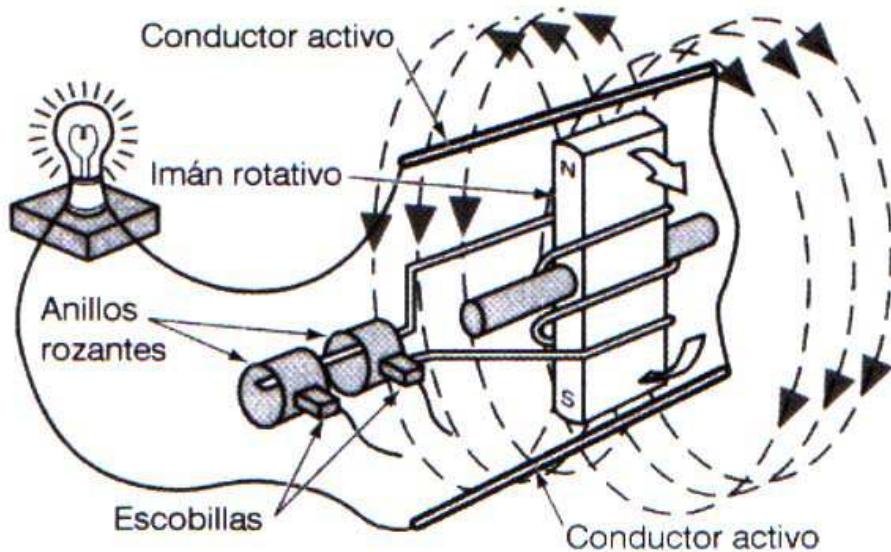


Figura 3.3 Generación de fuerza electromotriz

En este ejemplo, el campo magnético inductor ha sido generado por el paso de una corriente continua a través de una bobina arrollada al núcleo giratorio que constituye el electroimán. De esta forma, variando la intensidad de la corriente en la bobina del rotor se varía la intensidad del campo magnético inductor y, con ello, la tensión inducida en la espira.

La figura 3.4 muestra la secuencia en fases de producción de f.e.m. en una espira sometida a la acción de un campo magnético giratorio. En la posición A los polos del electroimán no inducen f.e.m. alguna en los conductores activos de la espira. A medida que el imán gira en el sentido marcado por las flechas, sus polos se acercan a los conductores activos, por lo que se induce una f.e.m. en éstos que va en aumento, alcanzando su valor máximo cuando los polos están justo enfrente de los conductores (posición B). Desde la posición B a la C la f.e.m. inducida va en disminución, hasta que cambia de sentido el comenzar el recorrido entre C y D. Cuando el electroimán llega a la posición D, el valor de la f.e.m. inducida vuelve a ser máximo, pero de signo contrario al anterior, mientras que en el recorrido entre D y E la f.e.m. va disminuyendo hasta hacerse 0.

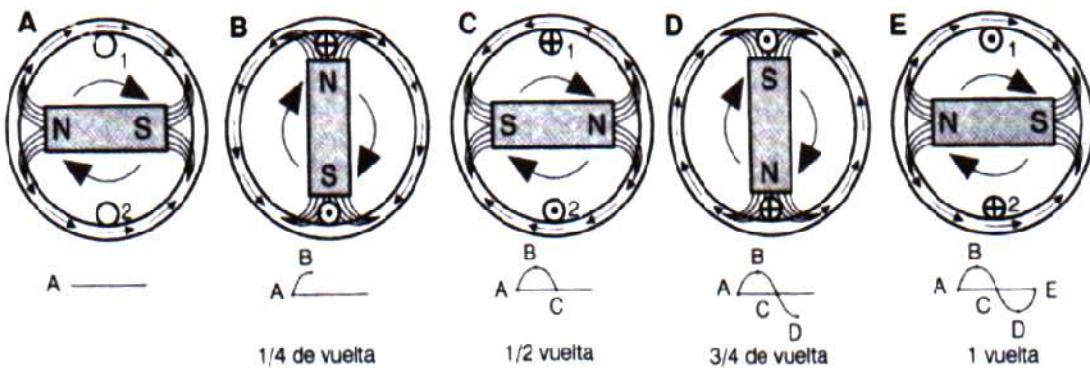


Figura 3.4 Secuencia de generación de fuerza electromotriz.

### 3.2 Funcionamiento de un alternador genérico

El alternador genérico posee dos arrollamientos concéntricos de hilo que forman el alternador: la bobina estatórica (la bobina externa que no gira) y la bobina rotórica (la bobina interna, movida por la polea del alternador, que gira).

Un campo electromagnético se crea cuando la corriente fluye a través de la bobina rotórica. La intensidad del campo magnético es proporcional a la cantidad de corriente que fluye a través del rotor. Como el rotor gira, el campo magnético giratorio resultante atraviesa la bobina externa y se genera una corriente alterna en el estator. La corriente alterna tiene una frecuencia igual que la frecuencia con la que la polea del alternador está girando.

Para que este proceso comience, es necesario excitar al rotor con algún tipo de corriente. Cuando el rotor está girando, él mismo no produce absolutamente nada, a menos que haya corriente fluyendo a través de la bobina, produciendo un campo magnético. Entonces es necesario tener el alternador conectado a alguna fuente de energía que proporcione la corriente inicial.

Debido a que el propósito general del alternador es la carga de baterías, la corriente alterna producida es rectificada por medio de un puente de diodos. La corriente resultante es corriente continua, que ya puede ser usada para cargar una batería. Esta corriente continua también puede ser usada para alimentar al rotor durante su operación. Como resultado, la bobina rotórica absorbe corriente de la fuente de energía externa únicamente hasta que el alternador es capaz de producir su propia corriente. Una vez que el alternador produce su propia corriente, éste se autoexcita.

La tensión que proviene del alternador depende de dos variables: la cantidad de corriente que fluye a través de la bobina rotórica y la velocidad a la que el rotor gira. El alternador tiene un regulador que intenta mantener la tensión hacia la batería a unos

14,4 voltios (la tensión óptima para recargar baterías de coche de 12 voltios). El regulador controla la cantidad de corriente que se inyecta en el rotor. Una vez que el alternador está autoexcitado, la única corriente que fluye hacia el rotor es producida por el propio alternador. Si la tensión de salida es demasiado alta, el regulador disminuye la corriente de excitación, mientras que si la tensión de salida es demasiado baja, el regulador aumenta dicha corriente. De forma simple, si el alternador puede mantener 14,4 V en la batería, haciendo que la polea gire más deprisa o más despacio, no se tendrá ningún efecto sobre la potencia de salida. La potencia de salida depende en todo caso de la carga que se conecte a la salida del alternador.

Es importante tener en cuenta que antes que el alternador se autoexcite, la corriente de excitación no está regulada. La corriente inicial de excitación depende únicamente de la resistencia de la bobina, de la resistencia de lo que esté en serie con la bobina y del estado de carga de la batería. Esto es crítico para saber si el alternador funcionará a velocidades más bajas que las deseadas (por debajo de 2100 rpm).

Los alternadores están construidos con tres grupos de bobinas, dispuestas en intervalos de 120º dentro de la estructura del alternador; por lo tanto, los alternadores producen corriente alterna trifásica. Pero, ¿por qué trifásica?

Si observamos el efecto de los diodos en una corriente alterna monofásica, podemos ver que la salida es una serie de pulsos de corriente continua. En realidad, la corriente continua es completamente lisa. La salida de los diodos es discontinua, y tiene algo de rizado.

Cuando la tensión continua rectificada de cada una de las tres bobinas del estator es añadida o superpuesta, se produce una corriente continua más limpia y con menos rizado. Las baterías de los automóviles son más duraderas cuando se cargan con corriente continua pura que cuando tienen un alto rizado. Las dinamos pueden ser una “auténtica pesadilla”, pero proporcionan un corriente continua muy limpia. Los devanados trifásicos fueron diseñados en los alternadores para producir una corriente continua con menor rizado.

Si se disponen las tres espiras citadas anteriormente, convenientemente espaciadas entre sí, de manera que formen ángulos de 120º en el desplazamiento, en cada una de ellas se induce una f.e.m. alterna, tal y como se ha representado en la figura 3.5; por lo tanto, tenemos ahora una f.e.m. inducida trifásica, cuyos valores máximos se obtienen con un desfase de 120º.

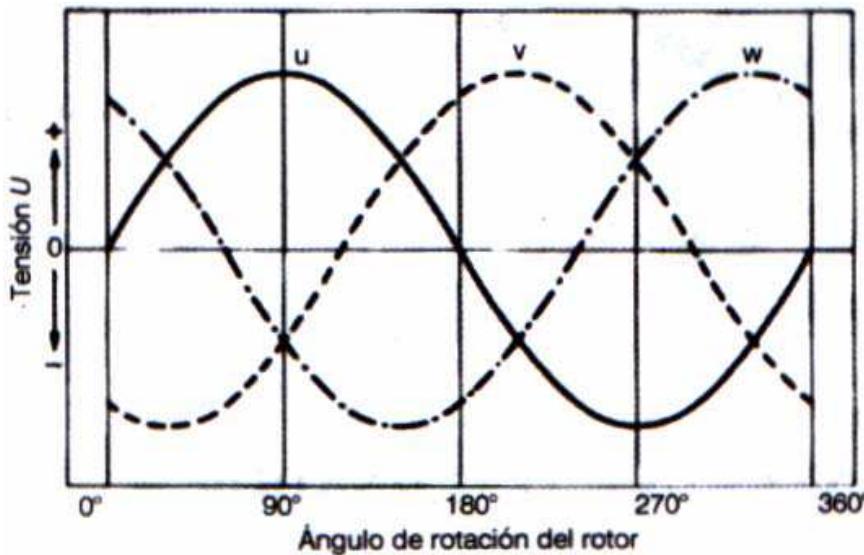


Figura 3.5 F.E.M. trifásica

Las tres fases de un alternador están unidas entre sí mediante una conexión en estrella o en triángulo. La figura 3.6 muestra la representación de estos dos tipos de conexión.

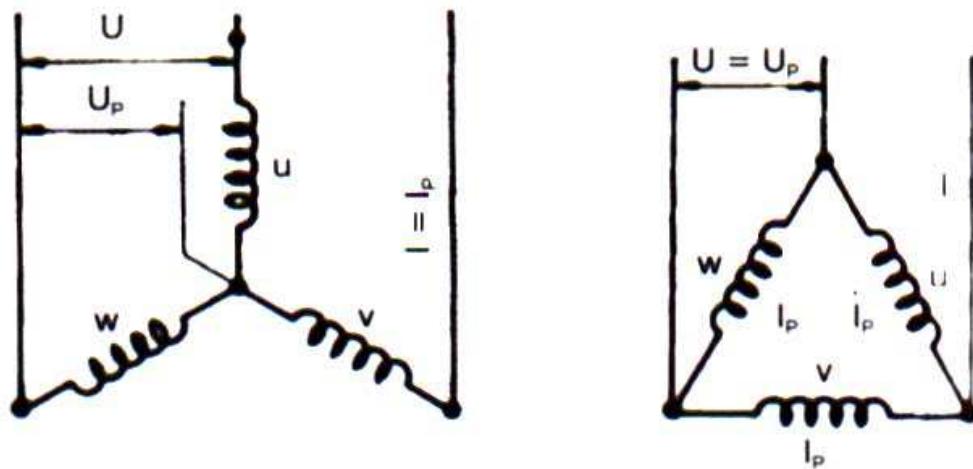


Figura 3.6-a Conexión en estrella Figura 3.6-b Conexión en triángulo

La mayoría de los alternadores usados en automoción conectan un extremo de cada devanado a un punto común llamado neutro, es decir, se conectan en estrella. El otro extremo de cada bobina se conecta a dos diodos, por lo que serán necesarios seis diodos para formar el puente rectificador trifásico.

Los nuevos alternadores, particularmente los de alta corriente, usan dos diodos adicionales conectados al neutro del alternador, que sirven para muestrear la tensión de salida y enviársela al regulador.

### 3.3 Coagging

La mayoría de las máquinas eléctricas, salvo los reactores y los electroimanes monofásicos, poseen dos o más arrollamientos y, cuando se encuentran en carga y circulan corrientes por esos arrollamientos cada uno de ellos produce una fuerza magnetomotriz (fem) que, al combinarse, dan lugar al flujo en la estructura magnética, a las tensiones inducidas, y a las fuerzas.

En el caso de generador cuando hay solamente corriente de excitación las líneas de fuerza del campo producido siguen una trayectoria como la mostrada en la figura 3.7 donde el sentido de la corriente  $I_f$  es tal que el polo superior resulta norte y el inferior sur. En la figura se indicó con un vector  $F_f$  la dirección dominante de ese campo. Se puede observar que la línea neutra magnética,  $n-n$ , es decir la recta que une los puntos de campo nulo del inducido, coincide con el eje transversal de la máquina; además la inducción magnética es prácticamente constante bajo los polos y decae en los extremos de las expansiones polares. Esta es la situación que existe en un generador en vacío.

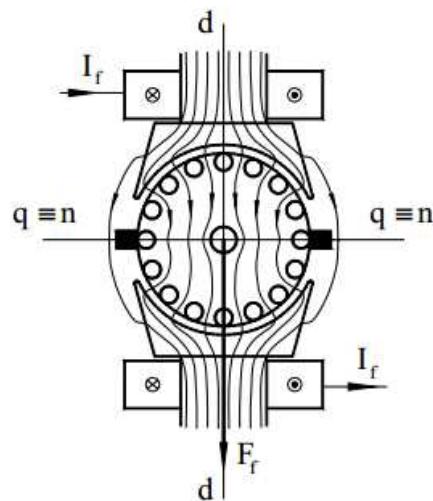


Figura 3.7 Campo de excitación

Si se tiene solamente corriente de armadura se producirá una fuerza magnetomotriz, indicada simbólicamente por el vector  $F_a$ , figura 3.8. El sentido de la corriente de armadura se supuso entrante en la mitad superior del inducido y saliente en la otra mitad, por lo tanto el inducido genera un polo norte en su lado izquierdo y un sur en el derecho. En este caso el campo resultante se cierra principalmente a través de las expansiones polares y también resulta una inducción prácticamente constante en el entrehierro.

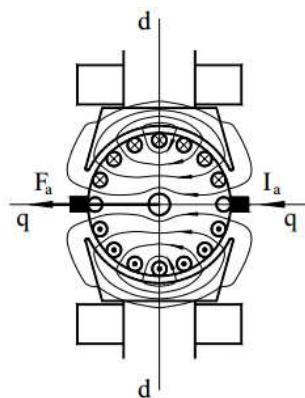


Figura 3.8 Campo de armadura

Cuando la máquina se encuentra en carga y hay corriente en la excitación y en el inducido, la fuerza magnetomotriz transversal del inducido distorsiona el campo producido por la excitación, produciendo un campo resultante como se indica aproximadamente en la figura 3.9, que se aleja de la distribución ideal mostrada en la figura 3.7.

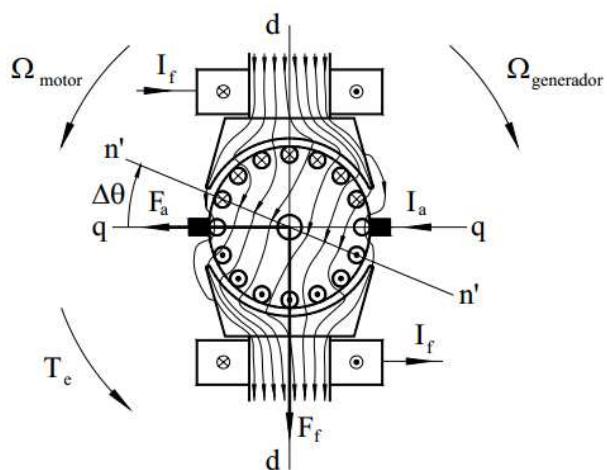


Figura 3.9 Campo resultante

De acuerdo al principio de alineación, que establece que las fuerzas magnetomotoras tratan de alinearse, la  $F_a$  trata de alinearse con la  $F_f$  y se genera un par de fuerzas paralelas de sentido contrario y de igual intensidad electromagnética en el rotor (inducido) en sentido antihorario, por lo tanto la figura 3.9 corresponde a un motor girando en ese sentido o a un generador haciéndolo en sentido contrario. Analizando el campo resultante en la figura 3.9 se pueden observar dos efectos significativos.

## 4 CONSTRUCCIÓN BÁSICA

Las antiguas dinamos tenían unos imanes permanentes que producían un campo magnético constante en el que una bobina de cable arrollada, llamada armadura, giraba. Un conmutador en uno de los extremos de la armadura hecho de segmentos individuales de latón pasaba la corriente generada hacia el exterior a través de unas escobillas de carbón.

Debido a que los segmentos del conmutador tienen que estar eléctricamente aislados unos de otros, no pueden estar fabricados de metal. Cada segmento conmutador tiene que estar individualmente unido a la armadura del eje. Esto es una fuente de averías mecánicas. Cuando la armadura gira a velocidades elevadas, la fuerza centrífuga hace que el conmutador explote, enviando los segmentos en todas las direcciones.

Para prevenir explosiones, la dinamo se usa normalmente a velocidades por debajo de la velocidad del motor. Un motor de automóvil puede girar a 5000 rpm, pero la dinamo tiene que ser movida a un máximo de 2500 rpm por recomendaciones de seguridad. Como resultado, la dinamo gira tan despacio que a bajas velocidades del motor genera una corriente muy baja o nula.

Un alternador moderno contiene dos devanados, uno que puede girar y otro estacionario. El devanado móvil, llamado rotor, usa corriente continua que es introducida por los anillos rozantes para generar un campo magnético giratorio. La potencia es extraída del devanado estacionario.

Los anillos rozantes reemplazan el débil conmutador de la dinamo. El devanado rotórico está encajado en un fuerte armazón de hierro blando, haciendo que el conjunto ensamblado sea mucho más robusto que la armadura de la dinamo. El resultado es que estos alternadores pueden funcionar a velocidades mucho más elevadas sin peligro de averías mecánicas. En efecto, los alternadores pueden ser utilizados a velocidades de incluso el doble que la velocidad del motor, es decir, hasta 10000 rpm o más. A bajas velocidades del motor, el alternador empieza a generar mucho antes de lo que lo haría una dinamo.

Un arrollamiento de hilo girando en el interior de un campo magnético produce una corriente alterna, con una frecuencia que depende de la velocidad del rotor. Una dinamo usa un conmutador mecánico rotativo y produce corriente continua.

Las tres bobinas estacionarias separadas del típico alternador de automóvil producen tres fases de corriente alterna. En vez de usar un conmutador mecánico para convertir la corriente alterna en continua, el alternador utiliza seis diodos que forman un puente rectificador trifásico de onda completa. En esencia, los diodos son interruptores de estado sólido sin partes en movimiento, con lo que son mucho más resistentes y seguros.

La tensión de salida del alternador puede ser controlada o regulada variando la corriente de excitación. Los reguladores muestran la tensión de salida y automáticamente cambian la corriente de excitación que se introduce al rotor por medio de los anillos rozantes.

#### 4.1 Estructura y partes de un alternador genérico

La estructura básica de un alternador está formada por un devanado estatórico trifásico y un rotor en el que se forman los polos del electroimán mediante un devanado de excitación, al que se hace llegar la corriente eléctrica a través de unos anillos rozantes y sus correspondientes escobillas. La corriente alterna trifásica inducida en el estator es rectificada por medio de un puente rectificador trifásico. El alternador está formado básicamente por los siguientes elementos (figura 4.1):

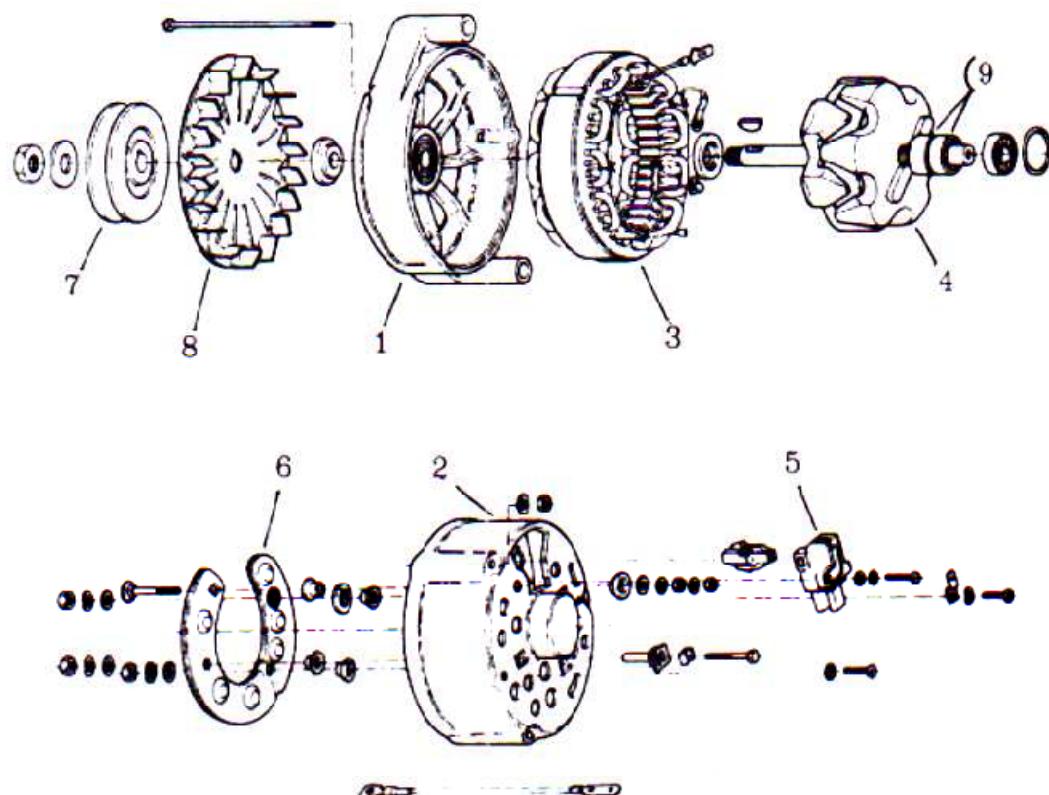


Figura 4.1 Elementos de un alternador

La carcasa está formada por las piezas 1 y 2, que se sujetan entre sí por espárragos. Unido a la carcasa está el inducido o estator (3), que está formado por un conjunto de láminas de acero prensadas en forma de corona circular; unas ranuras, situadas en el diámetro interior del mismo sirven de alojamiento para el arrollamiento del inducido. En el interior de la carcasa gira el rotor (4), cuyo eje se apoya en los dos extremos de la carcasa mediante unos rodamientos. La parte 2 de la carcasa lleva montado el portaescobillas (5), los diodos rectificadores (6), que rectifican la corriente alterna trifásica generada en el estator y los bornes del alternador. Por la parte 1 de la carcasa sobresale el eje del rotor, sobre el que se montan la polea de arrastre (7) y el ventilador (8). La corriente continua necesaria para la excitación de la bobina inductora es introducida en el rotor a través de los anillos rozantes (9), a los cuales se encuentran soldados los extremos de la bobina.

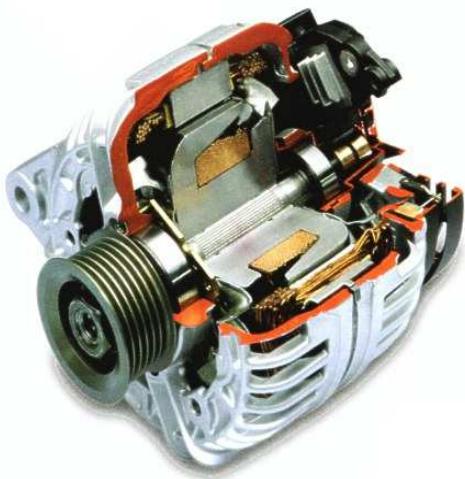


Figura 4.2 Interior de un alternador

## 4.2 Componentes del alternador

### 4.2.1 Estator o inducido

Es un conjunto constituido por un paquete de láminas de acero, ensambladas en forma de corona circular. En su diámetro interior tiene practicadas unas ranuras, donde se alojan las bobinas del inducido, debidamente aisladas.



Figura 4.3 Devanado estatórico

### 4.2.2 Rotor o inductor

Es un conjunto robusto y equilibrado dinámicamente que está formado por masas polares ensambladas en un eje de acero que apoya sus dos extremos en la carcasa del alternador por medio de dos rodamientos, uno en cada extremo del eje. Montadas a presión en el eje van dos mitades de la pieza con forma de garra que constituye los polos del rotor, quedando éstos intercalados unos dentro de otros (figura 4.4 a y figura 4.4 b).



Figura 4.4 a Rotor del alternador

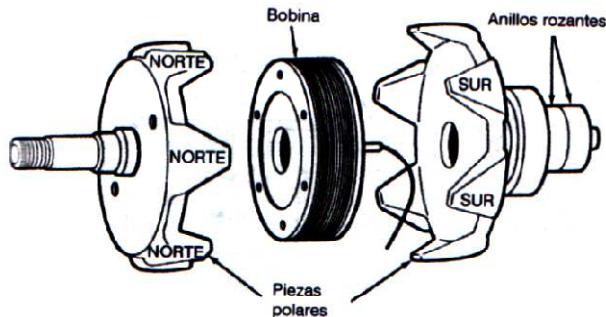


Figura 4.4 b Rotor del alternador

En el interior de estas dos mitades se aloja la bobina, que constituye el devanado de excitación, que genera en las masas polares un campo magnético como el indicado en la figura 4.5. Los extremos de la bobina se conectan a los anillos rozantes, que están montados a presión sobre el eje del rotor y aislados eléctricamente de él. El diámetro de estos anillos es pequeño con el fin de reducir el desgaste de las escobillas.

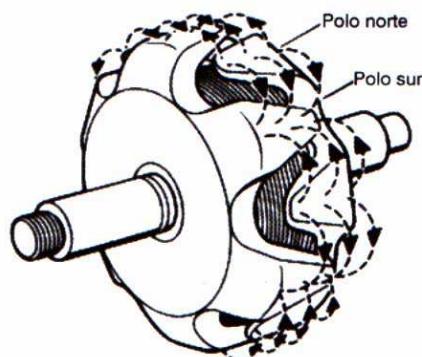


Figura 4.5 Campo magnético generado por el rotor

#### 4.2.3 Escobillas

Las escobillas (figura 4.6) actúan sobre los anillos rozantes introduciendo corriente a la bobina del rotor a través de éstos. El paso de corriente por la bobina da lugar a un campo magnético que se ve reforzado por el núcleo que suponen las dos mitades de las piezas polares. Según el sentido de paso de la corriente por la bobina, en todas las garras de una mitad se forman los polos norte y en todas las de la otra mitad los polos sur.



Figura 4.6 Escobillas del alternador

#### 4.2.4 Puente rectificador

Es un elemento formado por seis diodos que va sujeto a la carcasa en el lado de los anillos rozantes mediante dos tornillos aislados eléctricamente (figura 4.7). A este conjunto se le conectan las salidas de las bobinas del inducido. Los diodos se montan de forma que tres de ellos quedan conectados a masa y los otros tres al borne de salida del alternador. Para evitar el calentamiento excesivo de los diodos se montan en unos disipadores de calor que a la vez hacen de bornes

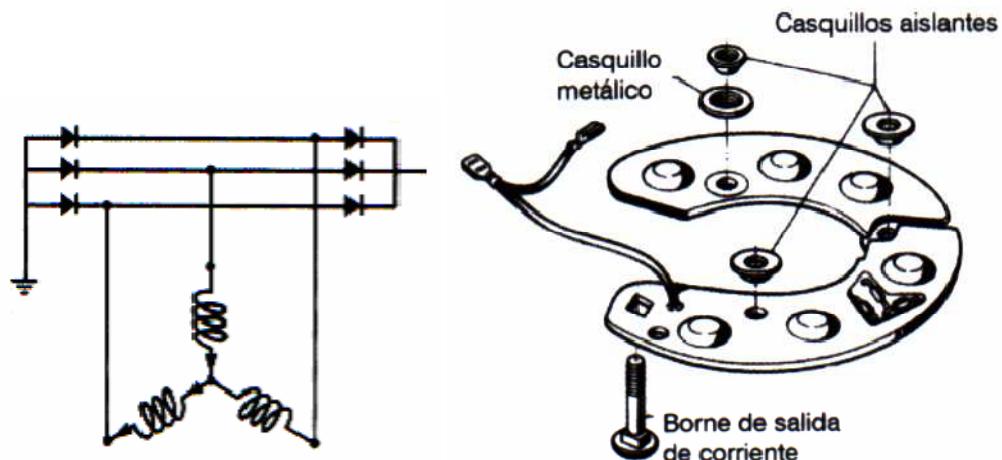


Figura 4.7 Puente rectificador del alternador

#### 4.2.5 Carcasa

La carcasa del alternador está obtenida por dos piezas de aluminio obtenidas por fundición. En una de ellas (figura 4.8), colocada en el mismo lado que los anillos rozantes, se encuentran atornillados el portaescobillas y el puente rectificador, mientras que en su parte interior se aloja un rodamiento donde apoya el rotor.



Figura 4.8 Parte delantera de la carcasa

Por la otra parte de la carcasa (figura 4.9) asoma el eje del rotor, por un orificio apoyado en un rodamiento. Esta otra mitad también es de aluminio fundido y tiene unos orificios para la ventilación del interior del conjunto.



Figura 4.9 Parte trasera de la carcasa

#### 4.2.6 Ventilador y polea

Suelen ser una misma pieza que está montada en el extremo del eje del rotor (figura 4.10). Por la parte interior tiene unas aspas de material metálico que al girar ventilan el interior del alternador. Por la parte exterior tiene una polea, que es el lugar por donde se transmite el par mecánico que mueve el rotor a través de una correa de transmisión.



Figura 4.10 Ventilador y polea

#### 4.3 Funcionamiento del alternador

Teniendo en cuenta la disposición del devanado de las bobinas del estator (figura 4.11), cuando gira el rotor, su campo magnético va afectando a cada uno de los conductores activos, induciéndose en ellos una f.e.m.

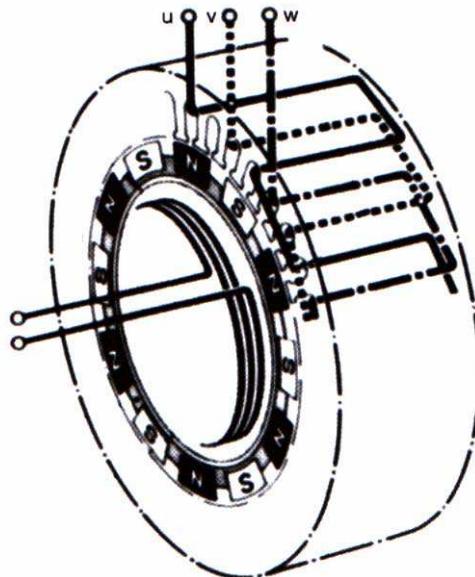


Figura 4.11 Disposición de los polos del alternador

En nuestro caso, que el rotor dispone de 12 polos (seis norte y seis sur), cada uno de los conductores activos está afectado por el flujo  $\Phi$  existente en el espacio entre dos polos del rotor, doce veces en cada vuelta del rotor, luego en la unidad de tiempo, cada conductor activo ha sido cortado por  $12 \Phi.N/60$  líneas de fuerza, siendo  $N$  el número de vueltas o revoluciones por minuto a que gira el rotor.

En un instante dado, la f.e.m. inducida en cada fase del alternador es la suma de la inducida en cada uno de los conductores activos de esa fase. Si llamamos  $n$  al número de conductores activos, la f.e.m. inducida en cada fase del alternador será:

$$U = 12 \Phi.N.n/60 = \Phi.N.n/5 \text{ voltios}$$

Cuando el alternador funciona en vacío, es decir, sin que salga corriente por el inducido, no existe fuerza alguna que se oponga al movimiento del rotor, excepto el rozamiento del eje. Se dirá entonces que el par resistente es nulo. Sin embargo, cuando se extrae corriente del inducido, la f.e.m. inducida en sus conductores activos hace que se establezca una corriente en ellos y en todo el circuito de carga, que produce a su vez un campo magnético en estos conductores activos, que se opone al campo magnético del rotor y, a su vez, genera una fuerza que se opone al giro del rotor, apareciendo entonces un par resistente que dificulta el arrastre del alternador.

## 5 TIPOS DE BOBINADOS DE CORRIENTE ALTERNA

Cada fase del devanado trifásico está formada por varias espiras formando bobinas, conectadas de forma que se sumen las fuerzas electromotrices engendradas en los conductores. El bobinado de cada fase es de tipo tambor y abierto (con un principio y un final). Las fases deben ser idénticas y desfasadas entre sí, basándose en el ángulo característico del sistema (120° eléctricos en el devanado trifásico).

Las bobinas del devanado forman grupos que pueden ser según su forma:

- Concéntricos.
- Imbricados.
- Ondulados.

Según la manera de conexión de los grupos de bobina de una misma fase, el devanado puede ser conectado:

- Por polos.
- Por polos consecuentes.

Para entender bien este capítulo, previamente se definirán los términos técnicos propios del bobinado de motores eléctricos

## 5.1 Términos técnicos del bobinado de motores eléctricos

### 5.1.1 Bobina.

Recibe el nombre de bobina cada uno de los conjuntos compactos de espiras que unidos entre sí forman el bobinado inducido de la máquina. Van alojadas en las ranuras de la armadura. Están compuestas de lados activos y cabezas (figura 5.1)



Figura 5.1. Bobina.

### 5.1.2 Paso polar.

El paso polar, es la distancia entre dos polos (es el número de ranuras que corresponden a cada polo). Puede ser expresado en centímetros o por el número de ranuras. El paso polar se puede observar en la figura 5.2.

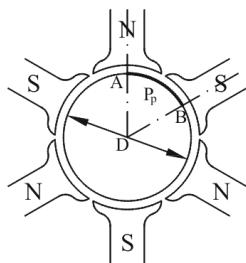


Figura 5.2. Paso polar.

### 5.1.3 Paso de bobina.

Es la distancia que hay entre los dos lados de una bobina. Se puede medir en fracciones del paso polar, en radianes eléctricos o geométricos, pero normalmente se mide contando el número de ranuras que hay entre los dos lados de la bobina (al paso de bobina medido en números de ranuras se le designara  $Y_k$ ). En la figura 5.3 se puede observar el paso de bobina.

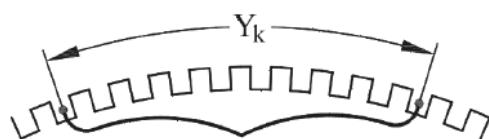


Figura 5.3. Paso de bobina.

### 5.1.4 Paso diametral.

Una bobina se denomina de paso diametral, si su paso es igual al paso polar. El paso diametral se puede observar en la figura 5.4.

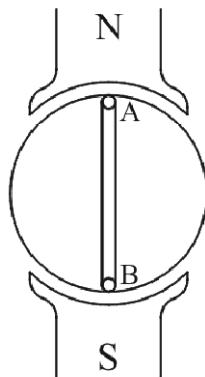


Figura 5.4. Paso diametral.

### 5.1.5 Paso acortado.

Una bobina se denomina de paso acortado, si su paso es inferior al paso polar.

### 5.1.6 Paso alargado.

Una bobina es de paso alargado, si su paso es superior al paso polar.

### 5.1.7 Devanados abiertos.

Están formados por una o varias fases, cada una de las cuales tiene un principio y un final. Estos devanados se usan en las máquinas de corriente alterna.

### 5.1.8 Devanado de una capa o simple capa.

En este devanado, cada ranura solo posee un lado activo de una bobina. Actualmente solo se utilizan estos devanados en máquinas de c.a. En la figura 5.5 se puede observar el devanado de una capa.



Figura 5.5. Devanado de una capa.

### 5.1.9 Devanado de dos capas o doble capa.

En los devanados de doble capa, en cada ranura hay dos lados activos correspondientes a dos bobinas distintas, colocados uno encima del otro formando dos capas de conductores entre las cuales se coloca un aislante. Estos devanados son abiertos. En la figura 5.6 se puede observar el devanado de doble capa.

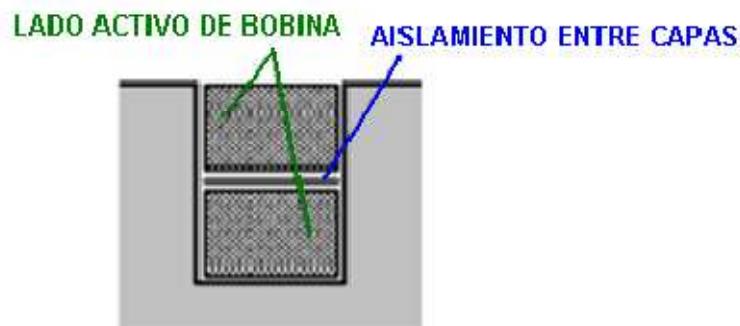


Figura 5.6. Devanado de doble capa.

### 5.1.10 Grupo polar.

Es un conjunto de bobinas de la misma fase conectadas en serie, alojadas en ranuras contiguas y arrolladas alrededor de un mismo polo. Los grupos polares se conectan entre sí en serie o formando varias ramas en paralelo idénticas para, así, construir una fase del devanado. En la figura 5.7 los grupos polares se han señalado con un número rodeado de una circunferencia.

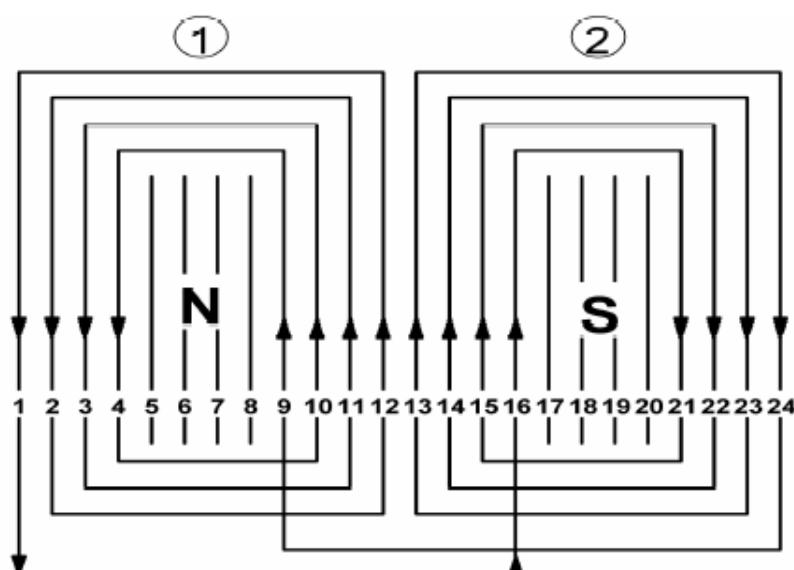


Figura 5.7. Grupos polares.

### 5.1.11 Devanados enteros y fraccionarios.

En ciertas ocasiones (especialmente en los inducidos de alternadores), se utilizan devanados fraccionarios en los que los grupos polares de una fase, no son todos exactamente iguales; algunos tienen una bobina más que los otros.

En los bobinados fraccionarios, el número de bobinas por par de polos y fase,  $b$ , no es entero, ni tampoco el número de ranuras por polo y fase,  $kpq$ . Esto no significa que cada par de polos tenga un número no entero de bobinas, sino que, como hay diferencias entre el número de bobinas de cada grupo polar, en una fase los valores medios de los parámetros  $b$  y  $kpq$  no son números enteros.

En los devanados enteros, todos los grupos polares son iguales y, por lo tanto, los parámetros  $b$  y  $kpq$  tienen valores enteros.

## 5.2 BOBINADO POR POLOS

Un bobinado es por polos cuando el final de un grupo de bobinas está conectado con el final del siguiente, y el principio de un grupo con el principio del siguiente, dejando sin conectar el principio del primer grupo y el final del último, que serán el principio y el final, respectivamente de la fase. En la figura 5.8 se puede observar el bobinado por polos.

En un bobinado por polos, el número de grupos por fase es igual al número de polos. Y el número total de grupos, es el número de grupos por fase, por el número de fases.

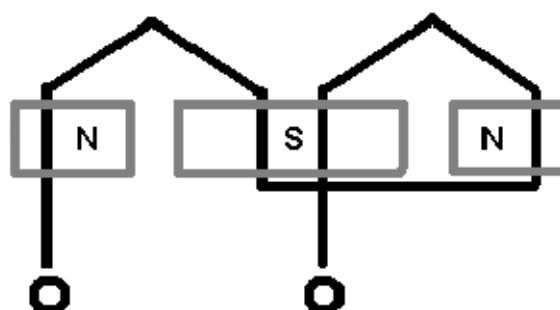


Figura 5.8. Bobinado por polos.

## 5.3 BOBINADO POR POLOS CONSECUENTES

Un bobinado es por polos consecuentes cuando el final de un grupo de bobinas está conectado con el principio del siguiente, dejando sin conectar el principio del primer grupo y el final del último, que serán el principio y el final, respectivamente de la fase. En la figura 5.9 se puede observar el bobinado de polos consecuentes.

En los bobinados de polos consecuentes, el número de grupos por fase es igual al número de pares de polos, y el número total de grupos es el número de grupos por fase, por el número de fases.

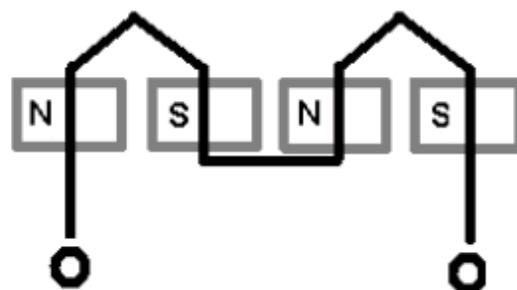


Figura 5.9. Bobinado por polos consecuentes.

#### 5.4 BOBINADOS CONCÉNTRICOS

En los bobinados concéntricos las bobinas de un grupo polar son de diferentes tamaños, y se van situando sucesivamente unas dentro de las otras. En la figura 5.10 se puede observar el bobinado concéntrico.

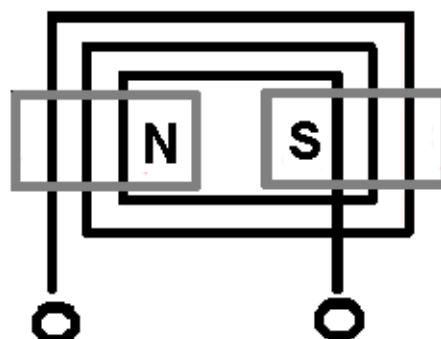


Figura 5.10. Bobinado concéntrico.

En este tipo de bobinado los pasos de bobina son diferentes de unas bobinas a otras.

Los bobinados concéntricos pueden ser construidos tanto por polos como por polos consecuentes. La forma de ejecutar los bobinados de una y dos fases es por polos (el bobinado monofásico concéntrico por polos, se puede observar en la figura 5.11), mientras que en los bobinados trifásicos se realizan por polos consecuentes (el bobinado trifásico concéntrico por polos consecuentes, se puede observar en la figura 5.12).

Cuando se usa la conexión por polos consecuentes, el valor medio de los pasos de las bobinas de un grupo polar es igual al paso polar.

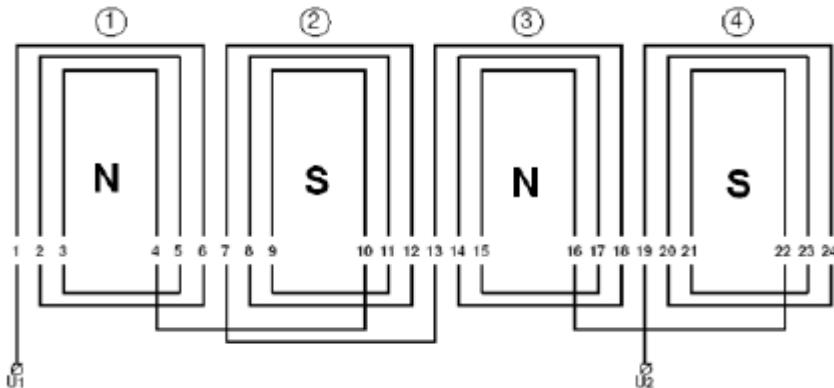


Figura 5.11. Bobinado monofásico concéntrico por polos.

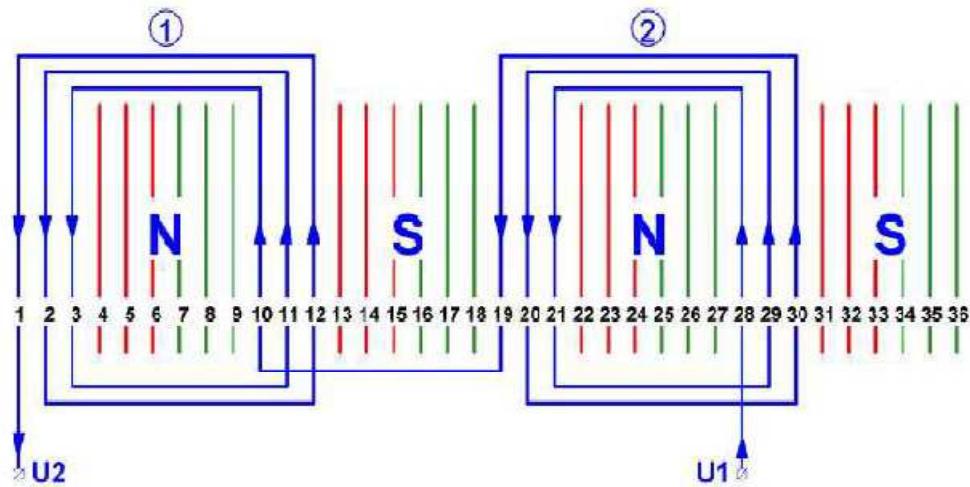


Figura 5.12. Bobinado trifásico concéntrico por polos consecuentes.

## 5.5 BOBINADO IMBRICADO

Los bobinados imbricados están realizados con bobinas de igual tamaño y forma.

En los bobinados imbricados, un grupo polar se obtiene conectando en serie varias bobinas de una misma fase, todas ellas correspondientes al mismo polo (una representación gráfica del bobinado imbricado se puede observar en la figura 5.13). Por esta razón, en estos bobinados hay que retroceder para conectar el final de una bobina con el principio de la siguiente (pues el final de una bobina está por delante del principio de la siguiente con la que se conecta como se puede observar en las figuras 5.14 y 5.15).

Estos bobinados pueden ser de una o dos capas (en la figura 5.14, se puede observar el bobinado imbricado de una capa, y la figura 5.15 se puede observar el bobinado imbricado de doble capa), de paso diametral, alargado o acortado y siempre se ejecutan por polos.

Cuando un bobinado imbricado es de una sola capa el paso de bobina medido en número de ranuras, debe ser impar (figura 5.14). Esto se debe a que, como se muestra

en la figura 5.14, en las ranuras se van colocando alternativamente el lado derecho de una bobina, el lado izquierdo de la otra bobina, el lado derecho y así sucesivamente. Por consiguiente, una bobina tendrá uno de sus lados en una ranura par y el otro en una ranura impar y el paso de bobina, es, pues, impar.

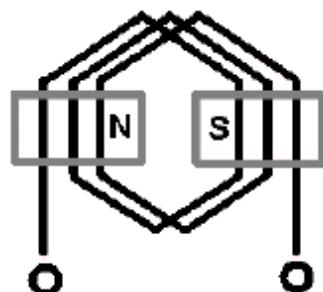


Figura 5.13. Bobinado imbricado.

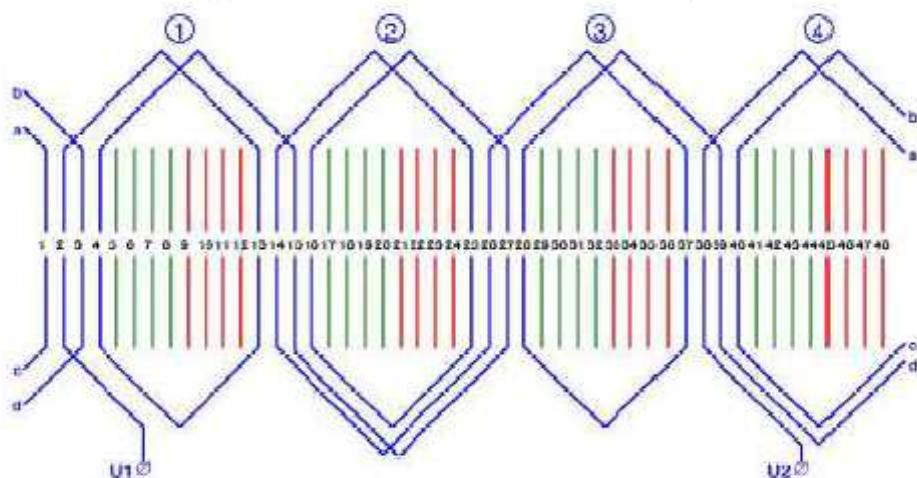


Figura 5.14. Bobinado imbricado de una capa.

En la figura 5.14, se muestra el bobinado trifásico imbricado, por polos, de 4 polos, una capa, 4 grupos polares por fase de 2 bobinas cada uno, 48 ranuras, 4 ramas por polo y fase, y con paso medido de ranuras 11.

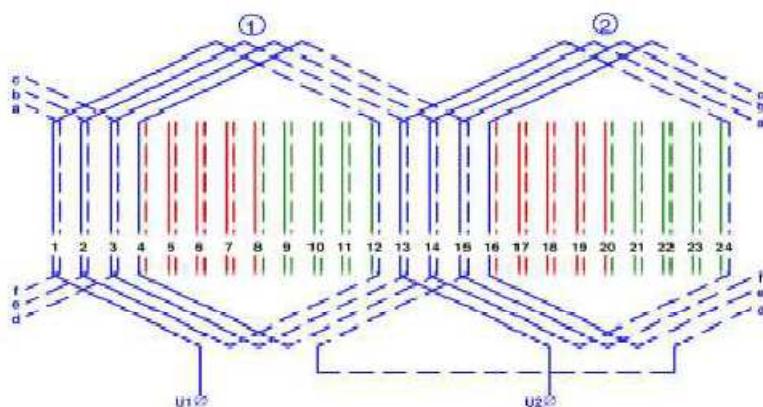


Figura 5.15. Bobinado trifásico imbricado de dos capas.

En la figura 5.15, se muestra el bobinado trifásico imbricado, por polos, de 2 polos, doble capa, 2 grupos polares por fase de 4 bobinas, 24 ranuras, 4 ranuras por polo y fase, y con paso acortado de ranura en 1 ranura.

## 5.6 BOBINADO ONDULADO.

Los devanados ondulados también están realizados con bobinas de igual tamaño.

A diferencia de lo que sucede en los bobinados imbricados, en los devanados ondulados una bobina se conecta con otra de la misma fase que está situada bajo el siguiente par de polos. Por esta razón, en estos devanados hay que avanzar a conectar el final de una bobina con el principio de la siguiente (pues el final de una bobina, está detrás del principio de la siguiente con la que se conecta, como se puede apreciar en la figura 5.16). Esto hace que estos arrollamientos tengan forma de onda ondulada, lo que da origen a su denominación.

Los bobinados ondulados se fabrican de dos capas y se ejecutan por polos.

Estos arrollamientos pueden ser de paso diametral, alargado o acortado.

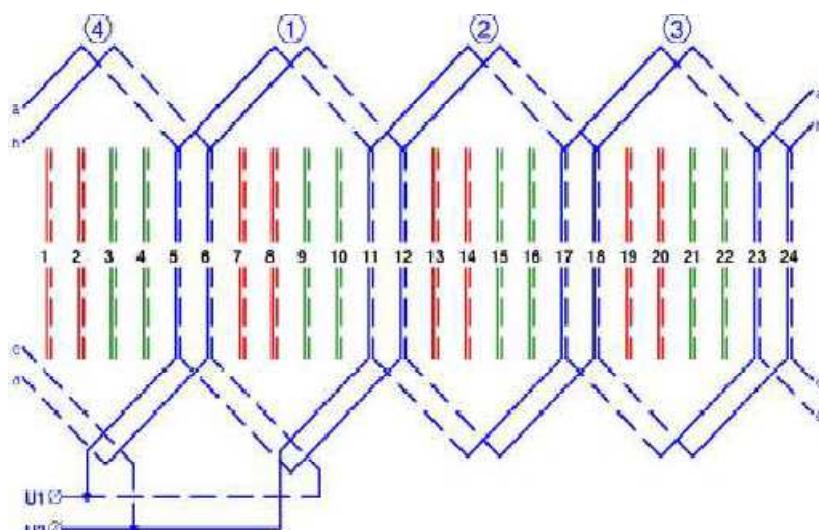


Figura 5.16. Bobinado trifásico ondulado.

En la figura 5.16, se muestra un bobinado trifásico ondulado, por polos, de 4 polos, doble capa, con 4 grupos polares por fase de 2 bobinas de cada uno, 24 ranuras, 2 ranuras polo y fase, y paso de bobina diametral.

## 5.7 CÁLCULOS GENERALES PARA LOS DIFERENTES TIPOS DE BOBINADOS.

### 5.7.1 Ranuras que ocupa el bobinado por polo magnético y por fase.

En la ecuación (5.1) se puede observar el cálculo para las ranuras que ocupa el bobinado por polo magnético y por fase.

$$Kpq = k/2pq \quad (5.1)$$

Donde:

$Kpq$ : Ranuras que ocupa el bobinado por polo magnético y por fase.

$k$ : Número de ranuras.

$2pq$ : Número de grupos por fase por el número de fases.

### 5.7.2 Número de bobinas.

#### 5.7.2.1 Bobinado de una capa.

Para el bobinado de una capa, el número de bobinas es la mitad del número de ranuras, como se puede observar en la ecuación (5.2).

$$B = K/2 \quad (5.2)$$

Donde:

$B$ : Número de bobinas.

#### 5.7.2.2 Bobinado de dos capas.

Para el bobinado de dos capas. El número de bobinas ( $B$ ) es igual al número de ranuras ( $K$ ), como se puede observar en la ecuación (5.3).

$$B = K \quad (5.3)$$

### 5.7.3 Número de bobinas por grupo.

Es el número de bobinas totales dividido por los grupos totales del bobinado, como se puede observar en la ecuación (5.4).

$$U = B/G \quad (5.4)$$

Donde:

$U$ : Número de bobinas por grupo.

$B$ : Número de bobinas

*G*: Número de grupos totales del bobinado.

#### 5.7.4 Paso polar.

Es la distancia medida entre los polos consecutivos, tomada sobre el arco de circunferencia del entrehierro.

$$Pp = \pi d / 2p \quad (5.5)$$

Donde:

*Pp*=Paso polar, medido en longitud de arco.

*d*=diámetro de entrehierro

*p*= número de pares de polos

#### 5.7.5 Paso de bobina-ancho de bobina

Es el número de ranuras que corresponden a cada polo.

$$Yp = K / 2p \quad (5.6)$$

Donde:

*Yp*: Paso polar.

*K*: Número de ranuras.

*2p*: Número de polos.

### 5.8 Cálculos para bobinados concéntricos.

Los bobinados concéntricos se suelen realizar de una capa y conectados por polos consecuentes.

#### 5.8.1 Amplitud del grupo.

Se le llama amplitud del grupo, al número de ranuras que se encuentran en el interior de un grupo de bobinas.

En la ecuación (5.7) se puede observar cómo se halla la amplitud del grupo para los bobinados concéntricos.

$$m = (q-1)kpq \quad (5.7)$$

Donde:

*m*: Amplitud por grupo.

*q*: numero de fases.

Una observación importante a la hora de hacer el cálculo para bobinados concéntricos es la siguiente:

- Si el número de bobinas por grupo ( $U$ ) es un numero entero ( $n+1/2$ ) se colocan alternativamente grupos de  $n$  bobinas y de  $n+1$  bobinas.

### 5.9 Cálculos para bobinados excéntricos o imbricados enteros.

Se suelen realizar de una o dos capas, y se caracterizan por tener el número de ranuras por polo y fase entero (como se ilustra en la ecuación (5.8)).

$$Kpq=\text{número entero} \quad (5.8)$$

En los bobinados excéntricos o imbricados enteros el ancho de bobina o paso de ranura ( $Yk$ ) puede ser menor o igual al paso polar, como se indica en la ecuación (5.9).

$$Yk \leq Yp \quad (5.9)$$

Cabe resaltar que:

- En el bobinado de una capa, el paso de ranura debe ser impar.

### 5.10 Bobinados excéntricos o imbricados fraccionarios.

Se ejecutan en dos capas y conectados por polos. Se caracterizan por tener el número de ranuras por polo y fase como un número fraccionario ( $U=A/B$ ), siendo el número fraccionario irreducible y  $B$  múltiplo de 3.

Para saber la distribución en el bobinado de los grupos de ranuras, se realiza una tabla de distribución:

- En tres columnas se trazan  $B$  filas de  $A$  puntos.
- Se traza una señal en el primer punto de la primera fila y en todos los que distan de este  $B$  unidades

Las señales de la primera fila indican el número de ranuras que corresponden a cada fase del primer polo.

Las señales de la segunda fila indican el número de ranuras que corresponden a cada fase del segundo polo, y así sucesivamente.

El ancho de bobina o paso de ranura ( $Yk$ ) puede ser menor o igual al paso polar, como se indica en la ecuación (1.8). [1], [2], [3].

## 6 CARACTERIZACIÓN DEL DEVANADO ESTATÓRICO

Para no interceder en los trabajos que se realizan en el volante de inercia se decide comprar unos alternadores en el desguace para tener nuestro propio devanado estatórico y ser independientes en nuestro proyecto.

Al revisar diferentes proyectos que habían trabajado con alternadores nos damos cuenta que el diámetro del núcleo estatórico de los distintos alternadores es distinto. La conclusión que llegamos es el diámetro del núcleo estatórico depende de su potencia o del fabricante.

Por tanto se decide comprar dos alternadores, uno Femsa y otro marca Bosh. Al desmontarlos nos damos cuenta que sus dimensiones son distintas. Se decide trabajar con el núcleo y el devanado estatórico de la marca Bosh ya que las dimensiones de este se aproximan bastante a las que tiene el núcleo estatórico del volante de inercia y además se puede observar más fácilmente el tipo de bobinado realizado sobre ese núcleo.

Una vez conocida toda la teoría sobre los alternadores y los devanados estoy en condiciones de interpretar el tipo de devanado que posee el alternador tras desmontarlo.

El estator de nuestro alternador tiene las siguientes características:

- Número de ranuras (***k***): 36
- Número de pares de polos (***p***): 6
- Número de fases (***m***): 3
- Devanado por polos consecuentes y de una capa:  $B=k/2 \Rightarrow 18=36/2$
- Número de bobinas simples (***B***): 6 en cada fase. En total 18
- Número de ranuras por polo y fase (***kpq***): 2 ranuras.  $q=k/2pm = 36/2.3.3$
- Paso de bobina (***y<sub>k<sub>p</sub></sub>***):  $y = k/2p = 36/2.6 = 3$
- Resistencia de cada devanado (***R***):  $0.15\Omega$
- Diámetro del hilo (***d***): 1.4mm
- Conexión en estrella

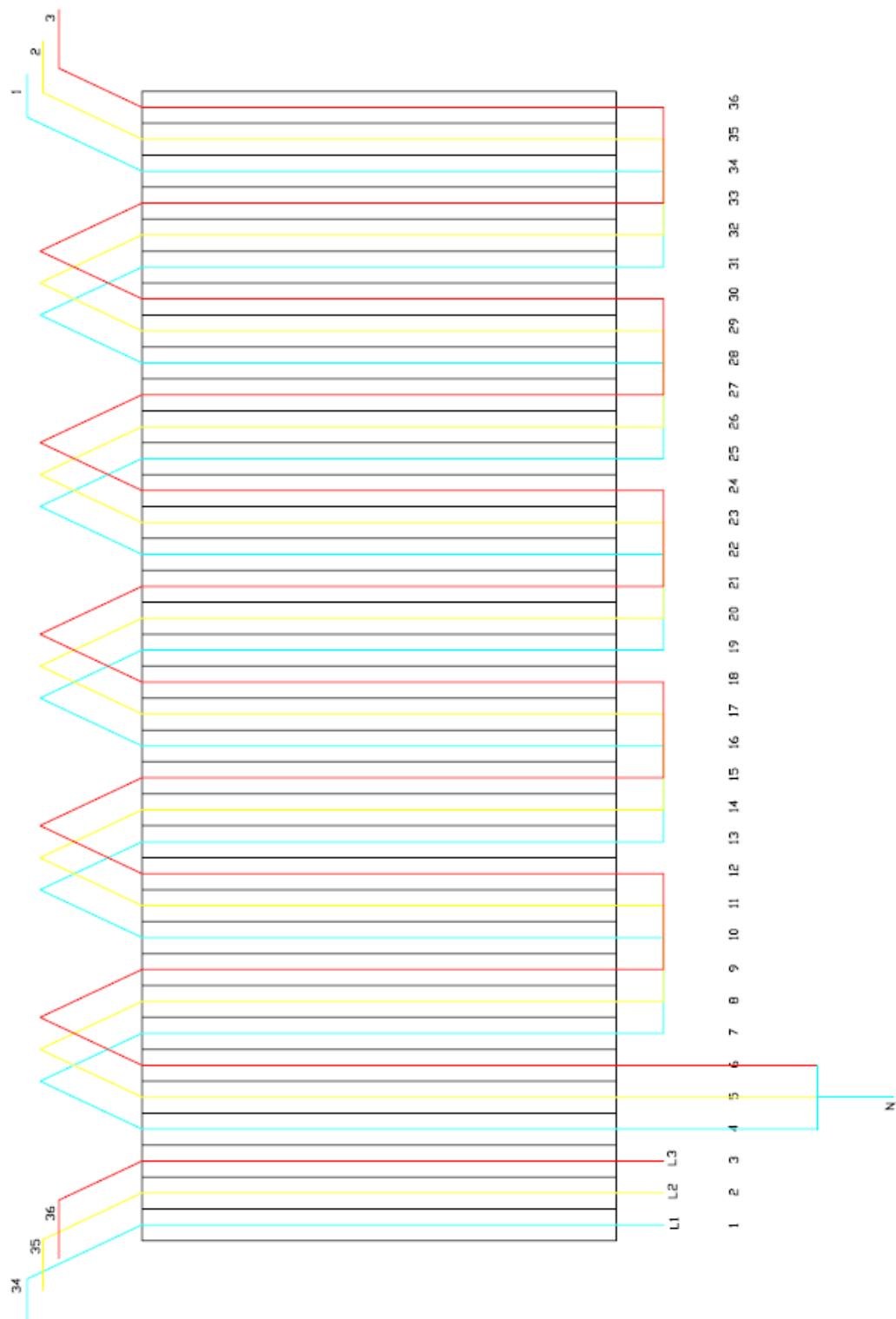


Figura 6.1 Disposición del devanado estatórico

El paso de bobina ( $y_b$ ) es el adecuado para que cuando a uno de sus lados se presente un polo norte, al otro lo haga un polo sur, condición indispensable para poder obtener corriente en la bobina (figura 6.2). De esta manera, al tener el rotor de nuestro alternador 12 polos, en una vuelta completa del mismo se generan 12 semiondas de tensión en cada una de las fases, lo que supone la obtención de una tensión más estable a la salida del inducido.

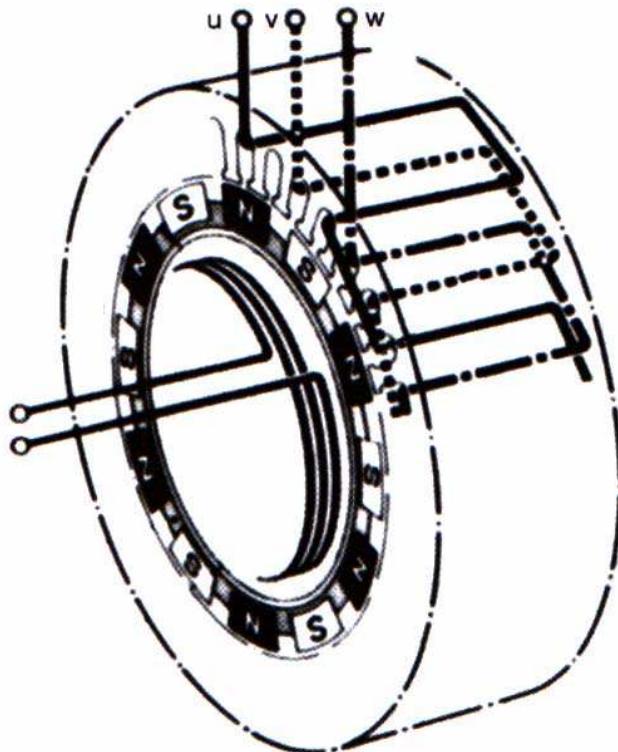


Figura 6.2 Situación de los polos

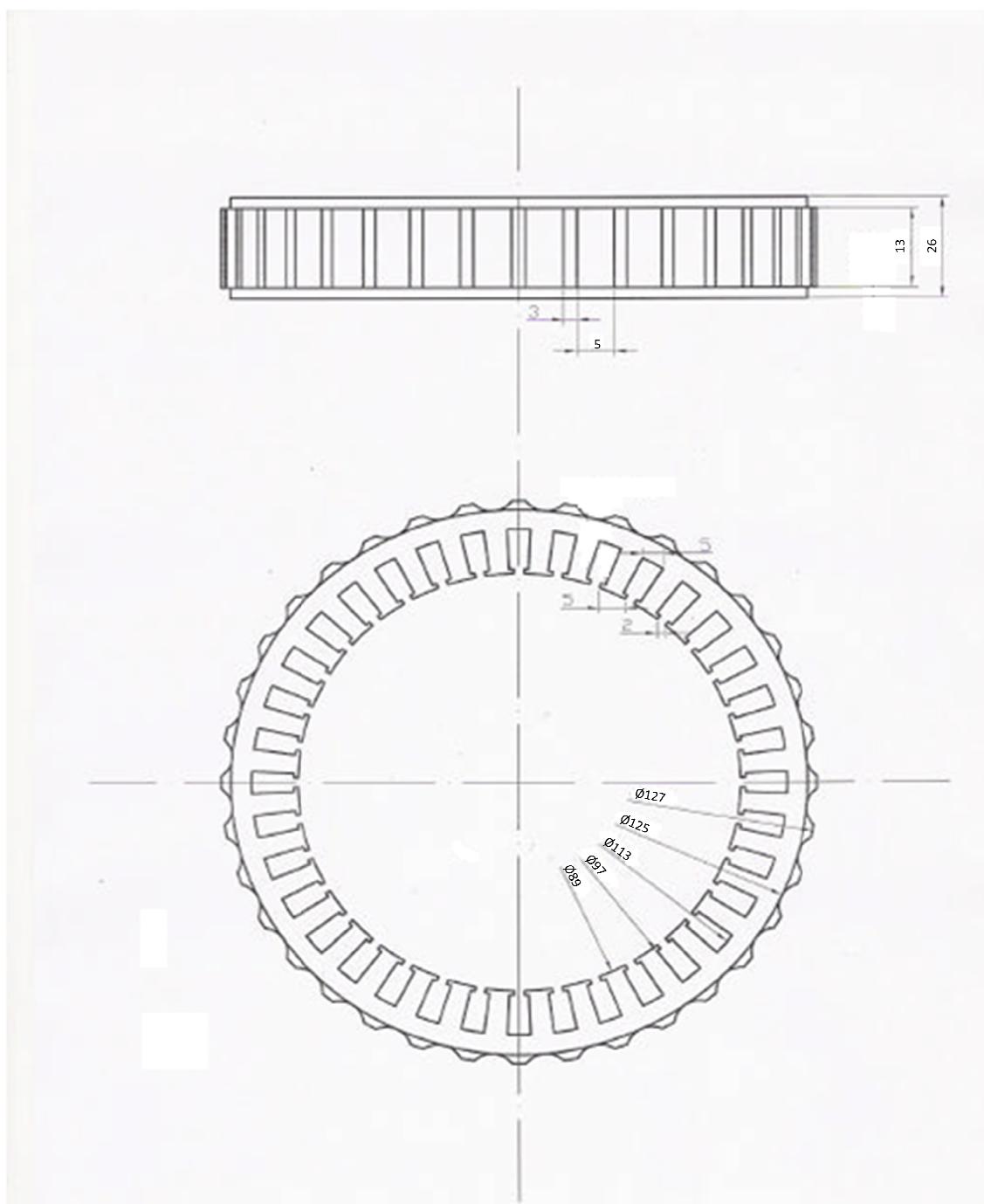


Figura 5.6 Plano del núcleo estatórico.

## 7 CARACTERIZACIÓN DEL ROTOR

El rotor de un generador es en esencia un gran electroimán o como ocurre en este caso, un grupo de imanes permanentes que forman los polos magnéticos.

El rotor de nuestro proyecto es una lata de conservas o similar, de material ferromagnético, a la cual se le han pegado imanes.

Es muy importante que la lata sea de material ferromagnético para que el flujo magnético pueda circular por ella.

La elección en su día de este rotor tan peculiar se debe a la facilidad de construcción del rotor.

El rotor gira solidariamente con el eje, pero cabe destacar que al ser fabricado caseramente las tolerancias no son tan ajustadas como quisiéramos como para tener un entrehierro uniforme.

El rotor es la parte fundamental en este proyecto. Para poder estudiarlo y hacer diversas pruebas se construirán diversos prototipos.

Se construye 2 prototipos que se diferencia entre sí en el diámetro de la lata ferromagnética o la mecanización para poder alojar los imanes, ya que dependiendo del número de pares de polos la distribución en el espacio es diferente.

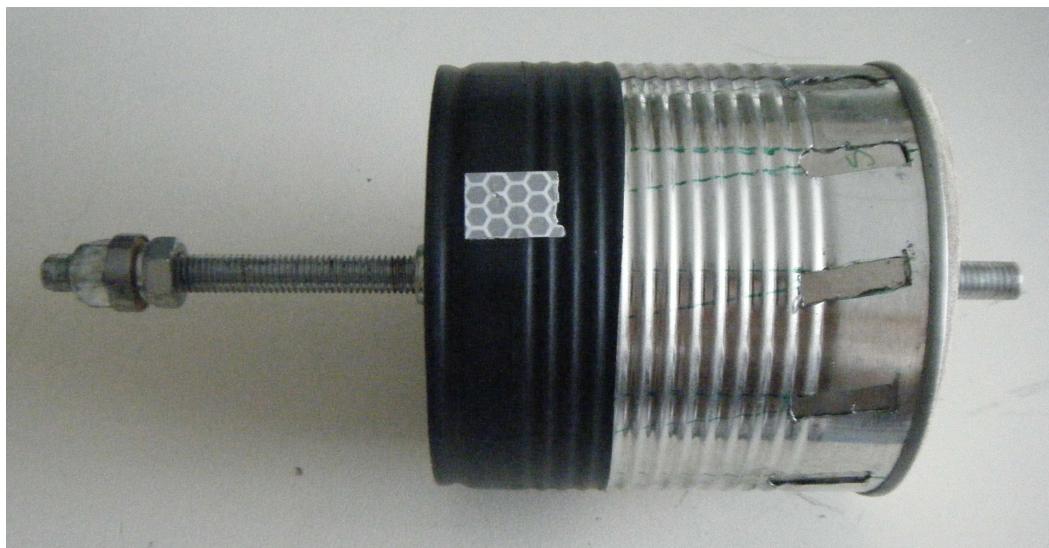


Figura 7.1 Prototipo de rotor

Todos los prototipos tienen en común los siguientes materiales:

## 7.1 Lata ferromagnética

La lata ferromagnética se elige de un diámetro adecuado para que exista el mínimo entrehierro y así evitar las pérdidas. El diámetro de las latas ferromagnéticas que se pueden adquirir en los supermercados está estandarizado. El diámetro de lata que nos interesa, para poder tener el menor entrehierro, es de 83.6 mm así nos quedará un entrehierro aproximado de 2.7 mm, ya que el diámetro interior de núcleo estatórico es de 89 mm.

Cabe destacar que el rotor en un principio iba a alojar los imanes sobre la lata, teniendo en cuenta que el grosor de estos es 2 mm, el entrehierro sería de 0.7 mm. De este modo el entrehierro era mínimo pero al existir diversas tolerancias hacen que el rotor no gire concéntricamente y se produzca rozamiento

Por tanto se decidió colocar los imanes por dentro de la lata, así obteníamos un entrehierro de 2.7 mm, y evitábamos el rozamiento mecánico entre imanes y el núcleo estatórico. Para evitar el apantallamiento del campo magnético que le ocasionaría estar los imanes por dentro de la lata se le practicó a la lata unas aperturas donde irán alojados los imanes en el interior de esta; de este modo proporcionamos rigidez mecánica para que los imanes permanezcan en su lugar correspondiente. Están aperturas se realizaron mediante una herramienta multiusos, tipo dremel.

Las aperturas de la lata son de un tamaño menor a los imanes (18 x 0.5mm) y con una inclinación de 10º para reducir el cogging que esperamos obtener.

Existen 2 prototipos de lata ferromagnética debido a su distinta mecanización por la distribución en el espacio de los polos en el rotor.

Rotor 1: es capaz de albergar 2, 4, 8 polos en la lata.

Rotor 2: es capaz de albergar 2, 6, 12 polos en la lata.



Figura 7.2 Mecanización lata (figura izquierda); Figura 7.3 Imanes dentro de la lata (figura derecha)

## 7.2 Imanes de tierras raras

Un imán es un material capaz de producir un campo magnético exterior y atraer el hierro. Los imanes que manifiestan sus propiedades de forma permanente pueden ser naturales o artificiales, obtenidos a partir de aleaciones de diferentes metales.

Los imanes empleados en este proyecto son de los denominados tierras raras, compuesto de Neodimio (Nd)-Hierro (Fe)-Boro (B). Los que aquí se utilizan son los llamados de “neodimio sinterizado”, debido a su proceso de fabricación. Poseen una magnetización entre 6 y 10 veces mayor que los materiales magnéticos tradicionales. Tienen una alta resistencia a la desmagnetización. Son lo bastante fuertes como para magnetizar y desmagnetizar algunos imanes de alnico. Se oxidan fácilmente, por eso van recubiertos de un baño de cinc, níquel o un barniz epoxídico.

Es importante manejarlos con cuidado para evitar dañarlos, ya que son muy frágiles, además los golpes fuertes o las rayas en su recubrimiento pueden descolocar las partículas haciendo que el imán pierda su potencia.

Algunas de sus *características* son:

- Alta inducción y fuerza coercitiva.
- Dificultad de mecanizado por su fragilidad.
- Baja resistencia a la oxidación.
- Escasa resistencia a temperaturas altas.
- A causa de sus altos valores magnéticos, pueden ser de muy reducidas dimensiones, lo cual les da utilidad en aplicaciones imposibles para otros materiales magnéticos.
- Buen precio con relación a sus prestaciones.

Entre sus aplicaciones distinguimos:

- Filtros magnéticos.
- Instrumental de precisión.
- Motores.
- Sensores.
- Micrófonos.
- Altavoces.

Se incluye a continuación una tabla con las propiedades magnéticas, y sus valores para las distintas variedades de imanes comercializados por la casa IDEMAG.

PROPIEDADES MAGNÉTICAS	NB	N30-SH	NS-35	CS-20	CS-25	
Inducción Remanente	7.500	11.300	12.200	9.000	10.000	Gauss
Fuerza Coercitiva	5.700	10.600	11.700	8.500	9.500	Oe.
Energía Máxima	25/27	28/31	33/35	16/19	19/24	MGOe.
Coeficiente Magnético de Temp.	-0,13	-0,11	-0,11	-0,04	-0,04	%°C
Máx. Temperatura de Trabajo	125	140	80	250	250	°C
Densidad	6	7,4	7,4	8,2	8,2	Gr/cm
Punto Curie	310	320	320	720	720	°C

Tabla 7.4 Tabla de propiedades magnéticas y valores, de los diferentes imanes comercializados.

Los que se usan en nuestro prototipo son los NS-35, que como puede apreciar el lector, son los de mejores propiedades magnéticas, si exceptuamos su temperatura máxima de trabajo, que debido al ambiente frío que los rodea, originado por el uso de nitrógeno líquido, no se va a alcanzar en ningún momento.

Se han usado imanes con unas medidas de 20 x 10 x 2 mm. Estos imanes, de la clase NS-35, son dispuestos alrededor del rotor con una separación determinada y una inclinación de 10º respecto al eje para evitar el cosido magnético o cogging.

Para la sujeción de los mismos, se aprovecha la característica que posee todo imán permanente: la de atraer el hierro, para que los imanes, por si solos, se anclen a la lata.



Figura 7.5 Imán de Tierras Raras

### 7.3 Eje

Un eje es un elemento constructivo destinado a guiar el movimiento de rotación a una pieza o de un conjunto de piezas en nuestro caso el rotor, lata ferromagnética. El eje se aloja por un diámetro exterior al diámetro interior del rodamiento, con el cual tiene un ajuste mediante tuercas grover para que el rodamiento se quede fijo en la posición adecuada.

### 7.4 Rodamientos

Es un tipo de cojinete. Es un elemento mecánico que reduce la fricción entre un eje y las piezas conectadas a éste por medio de rodadura, que le sirve de apoyo y facilita su desplazamiento.

En nuestro caso son rodamientos que se utilizan en el modelismo para construir modelos a escala(coches y aviones).



Figura 7.6 Rodamiento

## 8 CARACTERIZACIÓN DE LA MÁQUINA

Una vez explicado los componentes más importantes de nuestra máquina como es el rotor y el estator hay que crear un soporte que permita que las dos partes esenciales de la máquina interactúen.

### 8.1 Soporte

El soporte es una parte esencial del proyecto. Sin dicho soporte no se puede realizar ninguna prueba empírica.

Consiste en una base de madera donde está alojada una parte de la carcasa del alternador donde irá apoyado, en su alojamiento original, el devanado estatórico. Por otra parte, se construye mediante tubos de acero, un dispositivo que permite colocar lo mas concéntricamente el rotor con respecto al estator. Quedando de este modo el rotor sujetado mediante el rodamiento al dispositivo.

Además este dispositivo permite también colocar un taladro como motor de arrastre; para ello también debe estar situado concéntricamente con el rotor.



Figura 7.7 Soporte

## 9 MÁQUINA REVERSIBLE SÍNCRONA

### 9.1 OBJETIVO

El objetivo de este proyecto es conseguir que la máquina funcione como generador y como motor.

Para trabajar como generador, disponemos de un autotrafo monofásico el cual consigue regular la velocidad del motor de arrastre que mueve el rotor, la ferromagnética. Con ello se consigue arrastrar el rotor, haciendo que la velocidad aumente o disminuya de forma regulada.

En consecuencia el generador de imanes permanentes tiene que llegar a ofrecernos unos valores determinados de fuerza electromotriz y por supuesto una señal de onda lo más adecuada posible.

En el caso que su funcionamiento sea como motor dispondremos de un autotrafo trifásico el cual alimenta al devanado estatórico.

### 9.2 PLANTEAMIENTO BÁSICO

El siguiente diagrama de bloques, representa básicamente en qué consiste y que finalidad tiene el proyecto realizado como generador

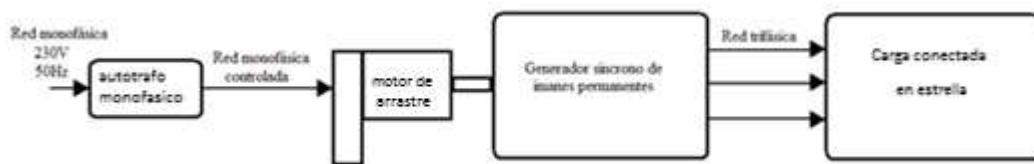


Figura 9.1. Diagrama de bloques del sistema

Si observamos la Ley de Faraday:

$$E_A = \sqrt{2} \pi N m \phi \quad f = 4,44 \text{ Nm f} \phi \quad (9.1)$$

Donde:

$E_A$  = Fem inducida (V)

$N$  = número de espiras

$m$  = nº de bobinas en serie

$\phi$  = flujo magnético (Wb)

$f$ = frecuencia eléctrica (Hz).

Podemos llegar a la conclusión de que para mejorar el generador síncrono de imanes permanentes se pueden realizar algunas de las siguientes operaciones:

- Aumentar el número de espiras en las bobinas
- Dejar el menor entrehierro posible.
- Aumentar la  $f$  generada por el taladro.

Por supuesto, también se debe mejorar el apartado mecánico de la construcción del generador. Tanto unos como otros, son solo unos ejemplos de posibles mejoras.

## 9.3 GENERADORES SÍNCRONOS Y SU FUNCIONAMIENTO

### 9.3.1 Introducción a las máquinas de corriente alterna

Las máquinas de corriente alterna (ac) son los generadores que convierten energía mecánica en energía eléctrica ac y los motores que convierten energía eléctrica ac en energía mecánica.

Existen dos clases principales de máquinas de corriente alterna: las máquinas síncronas y las máquinas de inducción. Las máquinas síncronas son motores y generadores cuya corriente de campo magnético es suministrada por una fuente de corriente continua separada o por imanes permanentes, mientras que las máquinas de inducción son motores y generadores cuya corriente de campo magnético es suministrada por inducción magnética (acción transformadora) en sus devanados de campo. Los circuitos de campo de la mayoría de las máquinas síncronas y de inducción están localizados en sus rotores.

### 9.3.2 Construcción de generadores síncronos

Normalmente en un generador síncrono se aplica una corriente dc al devanado del rotor, la cual produce un campo magnético. (En nuestro caso no es necesario la circulación de corriente por los devanados rotóricos ya que nuestro prototipo es de imanes permanentes). Entonces el rotor del generador gira mediante un motor primario, un taladro en el caso de este proyecto, y produce un campo magnético rotacional dentro de la máquina. Este campo magnético rotacional induce un grupo trifásico de fuerzas electromotrices inducidas en los devanados del estator del generador.

Dos términos muy utilizados para describir los devanados de una máquina son devanados de campo y devanados de armadura. En general, el término “devanado de campo” se aplica a los devanados que producen el campo magnético principal de la

máquina, y el término “devanado de armadura” se aplica a los devanados donde se induce el voltaje principal. En las máquinas síncronas, los devanados de campo están sobre el rotor, de modo que los términos “devanados del rotor” y “devanados de campo” se utilizan indistintamente.

De igual manera se emplean los términos “devanados estatóricos” y “devanados de armadura”.

En esencia, el rotor de un generador es un gran electroimán, o como ocurre en este proyecto, un gran imán permanente. Los polos magnéticos del rotor pueden ser construidos salientes o no salientes. El término saliente significa “proyectado hacia afuera” o “prominente”; así pues, un polo saliente es un polo magnético que se proyecta hacia afuera de la superficie del rotor. Por otro lado, un polo no saliente es un polo magnético construido al mismo nivel de la superficie del rotor. La figura 9.2.1 muestra un rotor de polos no salientes y la figura 9.2.2 muestra un rotor de polos salientes. Los rotores de polos salientes se utilizan en rotores de dos y cuatro polos, mientras que los rotores de polos salientes se utilizan en rotores de cuatro o más polos que giran a velocidades angulares menores. Puesto que el rotor está sujeto a campos magnéticos variables con el tiempo, se construye con láminas delgadas agrupadas para reducir las pérdidas por corrientes parásitas.

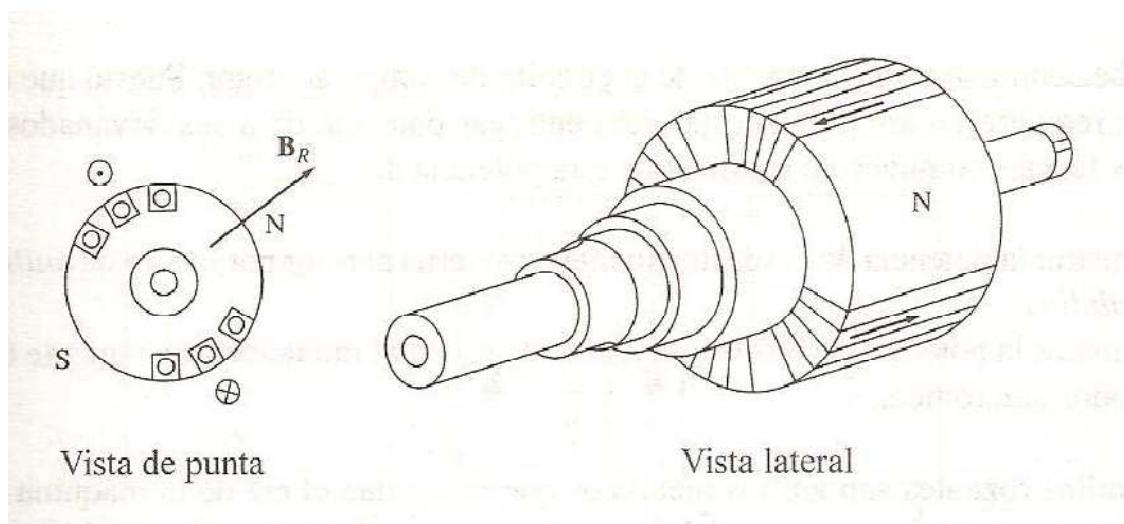


Figura 9.2.1 Rotor de polos no salientes en una máquina síncrona

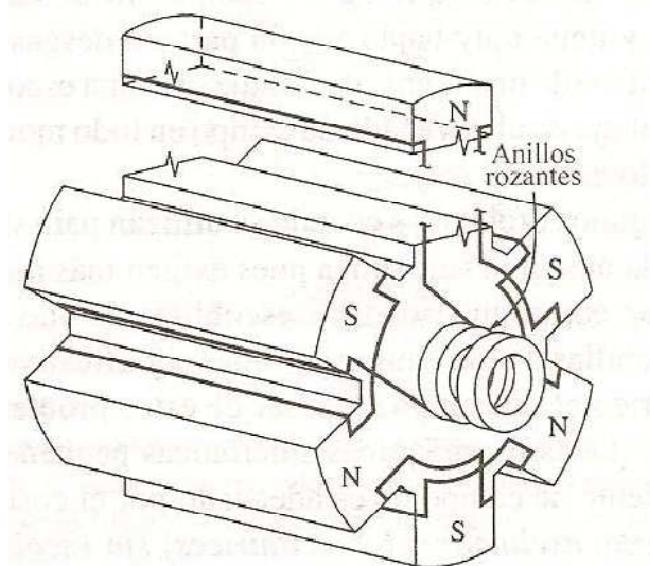


Figura 9.2.2 Rotor de seis polos salientes en máquina síncrona.

Se debe suministrar una corriente dc al circuito de campo del rotor. Puesto que el rotor está girando, se requiere un arreglo especial para entregar potencia dc a sus devanados de campo. Existen dos formas comunes de suministrar esta potencia dc:

- Suministrar la potencia dc desde una fuente dc externa al rotor por medio de anillos rozantes y escobillas
- Suministrar la potencia dc desde una fuente dc especial montada directamente en el eje del generador síncrono.

Los anillos rozantes son anillos metálicos que circundan el eje de la máquina pero se encuentran aislados de él. Un extremo del devanado del rotor dc está unido a cada uno de los dos anillos rozantes colocados sobre el eje de la máquina síncrona, y una escobilla estacionaria se desliza sobre cada anillo rozante. Una “escobilla” es un bloque de un compuesto de carbón grafitado que conduce la electricidad libremente y tiene muy baja fricción para no desgastarse con el anillo rozante. Si se conecta el extremo positivo de una fuente de voltaje dc a una escobilla y el extremo negativo a la otra, se aplicará igual voltaje dc al devanado de campo en todo momento, sin tener en cuenta la posición angular o la velocidad del rotor.

Los anillos rozantes y las escobillas crean algunos problemas cuando se utilizan para suministrar potencia dc a los devanados de campo de la máquina síncrona pues exigen más mantenimiento en la máquina ya que se deben revisar con regularidad las escobillas debido a su desgaste. Además, la caída de tensión en las escobillas puede causar pérdidas significativas de potencia en las máquinas que tienen grandes

corrientes de campo. A pesar de estos problemas, los anillos rozantes y las escobillas se utilizan en todas las máquinas síncronas pequeñas ya que ningún otro método de suministro de la corriente de campo dc es adecuado por el costo.

En generadores y motores grandes, se utilizan excitadores (o excitatrices) sin escobillas para suministrar la corriente de campo dc a la máquina. Un excitador sin escobillas es un generador ac pequeño cuyo circuito de campo está montado en el estator y su circuito de armadura está montado sobre el eje del rotor. La salida trifásica del generador excitador es rectificada a corriente continua por un circuito rectificador trifásico montado también en el eje del generador y se incluye en el circuito principal de campo dc. Controlando la pequeña corriente dc de campo del generador excitador (situado sobre el estator), es posible ajustar la corriente dc de campo de la máquina principal sin anillos rozantes ni escobillas.

Muchos generadores síncronos que incluyen excitadores sin escobillas tienen también anillos rozantes y escobillas, de manera que disponen de una fuente auxiliar de corriente de campo en caso de emergencia.

A pesar de la importancia de este punto, referente al suministro de una corriente dc al rotor del generador por medio de anillos rozantes y escobillas, cabe destacar que dicho fenómeno no tiene lugar en el generador de imanes permanentes que se está desarrollando en este proyecto, debido a que dicho generador no necesita corriente aplicada en el rotor para generar campo magnético.

Los estatores de los generadores síncronos se construyen normalmente con devanados preformados de doble capa. El devanado en si mismo está distribuido y encordado para reducir el contenido de componentes armónicos en la fem y corrientes de salida.

### 9.3.3 Funcionamiento interno del generador y generación del campo magnético giratorio.

El voltaje  $E_A$  es el voltaje interno generado, en una fase del generador sincrónico. Sin embargo, este voltaje  $E_A$  no es usualmente el voltaje que aparece en los terminales del generador. En efecto, la única vez en la cual el voltaje interno  $E_A$  es el mismo voltaje de salida  $V_\phi$  de una fase es cuando no fluye corriente de armadura en la máquina. ¿Por qué el voltaje de salida  $V$  de una fase no es igual a  $E_A$ , qué relación hay entre los dos voltajes?

Existen varios factores que ocasionan la diferencia entre  $E_A$  y  $V_\phi$ :

1. La distorsión del campo magnético del entrehierro debida a la corriente que fluye en el estator, llamada reacción del inducido.

2. La autoinducción de las bobinas de la armadura.
3. La resistencia de las bobinas de la armadura.
4. El efecto de la forma de los polos salientes del rotor.

El primer efecto mencionado y normalmente el mayor de ellos es la reacción del inducido. Cuando gira el rotor de un generador, se induce una fem  $E_A$  en las bobinas estáticas del mismo. Si se conecta una carga a los terminales del generador, fluye una corriente trifásica estática que produce un campo magnético propio en la máquina. Este campo magnético estático distorsiona el campo magnético del rotor cambiando el voltaje de fase resultante. Este efecto se llama reacción del inducido debido a que la corriente del inducido (estator) afecta al campo magnético que la produce en primera instancia.

Para entender la reacción del inducido, vemos la figura 9.3.1. La figura a) muestra un rotor de dos polos girando dentro de un estator trifásico. No hay carga conectada al estator. El campo magnético del rotor  $B_R$  produce un voltaje interno  $E_A$  cuyo valor pico coincide con la dirección  $B_R$ . El voltaje será positivo hacia fuera de los conductores en la parte superior, y negativo hacia dentro de los conductores en la parte inferior de la figura. Cuando no hay carga en el generador, no hay flujo de corriente en el inducido y  $E_A$  será igual al voltaje de fase  $V_\phi$ .

Supóngase ahora que se conecta el generador a una carga con factor de potencia inductivo. Debido a que el fasor de la corriente de la carga está retrasado respecto de la tensión, la corriente pico ocurrirá a un ángulo retrasado respecto del voltaje pico. Este efecto se muestra en la figura 9.3.1. b)

La corriente que fluye en los devanados del estator produce un campo magnético propio. Este campo magnético estático se llama  $B_s$  y su dirección está dada por la regla de una mano derecha, según se muestra en la figura 9.3.1. c). El campo magnético del estator  $B_s$  produce un voltaje propio en el estator, denominado  $E_{stat}$  en la figura.

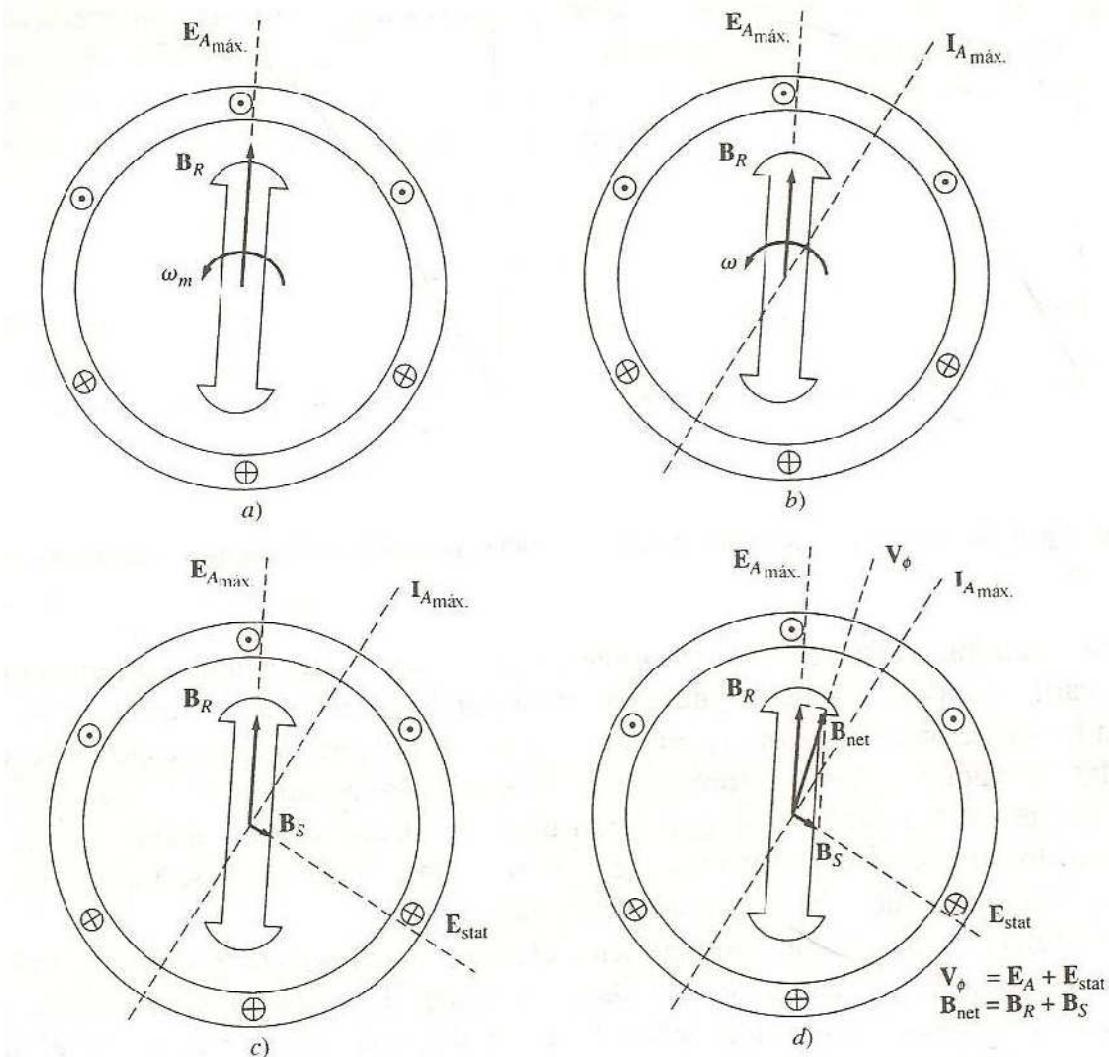


Figura 9.3.1. Desarrollo de un modelo para la reacción de inducido: a) un campo magnético giratorio produce fem inducida  $E_A$ . b) La fem resultante produce una corriente en atraso cuando se conecta a una carga con factor de potencia inductivo. c) La corriente estatórica produce su propio campo magnético  $B_S$ , el cual produce su propia fem  $E_{stat}$  en los devanados estatóricos de la máquina. d) El campo  $B_S$  se suma a  $B_R$  y se transforma en  $B_{net}$ . El voltaje  $E_{stat}$  se suma a  $E_A$  y producen  $V_\phi$  de salida de fase.

Con dos voltajes presentes en los devanados estatóricos, el voltaje total de una fase es la suma del voltaje interno generado  $E_A$  y el voltaje de reacción del inducido  $E_{stat}$ :

$$V_\phi = E_A + E_{stat} \quad (9.3.1)$$

El campo magnético  $B_{net}$  es la suma de los campos magnéticos del rotor y el estator:

$$B_{net} = B_R + B_S \quad (9.3.2)$$

Puesto que los ángulos de  $E_A$  y  $B_R$  son iguales y los ángulos de  $E_{stat}$  y  $B_s$  también son iguales, el campo magnético resultante  $B_{net}$  coincidirá con el voltaje neto  $V_\phi$ . Los voltajes y corrientes resultantes se muestran en la figura 9.3.1. d).

La siguiente cuestión es preguntarse cómo se pueden modelar los efectos de la reacción de inducido en el voltaje de fase. Primero, nótese que el voltaje  $E_{stat}$  está un ángulo de 90º atrás del plano de la corriente máxima  $I_A$ . Segundo, el voltaje  $E_{stat}$  es directamente proporcional a la corriente  $I_A$ . Si  $X$  es una constante de proporcionalidad, el voltaje de reacción de inducido puede expresarse como

$$E_{stat} = -jX I_A \quad (9.3.3)$$

El voltaje es una fase es entonces

$$V_\phi = E_A - jX I_A \quad (9.3.4)$$

Obsérvese el circuito de la figura 9.3.2. La ley de voltajes de Kirchhoff para este circuito es:

$$V_\phi = E_A - jX I_A \quad (9.3.5)$$

Ecuación igual a la que describe el voltaje de la reacción del inducido. Entonces, el voltaje de reacción del inducido se puede modelar mediante una inductancia en serie con el voltaje interno generado.

Además de los efectos de la reacción del inducido, los devanados del estator tienen una autoinductancia y una resistencia. Si llamamos  $L_A$  coeficiente autoinducción del estator (y  $X_A$  a su correspondiente reactancia), mientras que la resistencia del estator es llamada  $R_A$ , la diferencia total entre  $E_A$  y  $V_\phi$  está dada por

$$V_\phi = E_A - jX I_A - jX_A I_A - R_A I_A \quad (9.3.6)$$

Los efectos de la reacción del inducido y la autoinducción de la máquina son representados por reactancias, y es costumbre combinarlas en una sola llamada reactancia sincrónica de la máquina:

$$X_S = X + X_A \quad (9.3.7)$$

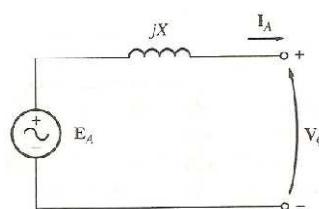


Figura 9.3.2. Circuito equivalente

La ecuación final que describe a  $V_\phi$  es

$$V_\phi = E_A - jX_s I_A - R_A I_A \quad (9.3.8)$$

### 9.3.4 Velocidad de rotación de un generador síncrono

En los generadores síncronos, la frecuencia eléctrica producida está entrelazada o sincronizada con la velocidad mecánica de rotación del generador. Un rotor de generador síncrono consta de un electroimán al cual se suministra corriente directa. El campo magnético del rotor apunta en cualquier dirección según gire el rotor. La relación entre la velocidad de giro de los campos magnéticos de la máquina y la frecuencia eléctrica del estator se expresa mediante la ecuación:

$$n = \frac{60*f}{p} \quad (9.3.9)$$

Donde  $f$  = frecuencia eléctrica, Hz

$n$  = velocidad mecánica del campo magnético en rpm (igual a la velocidad del rotor para las máquinas síncronas).

$p$  = número de pares de polos

Puesto que el rotor gira con la misma velocidad que el campo magnético, esta ecuación relaciona la velocidad de rotación del rotor con la frecuencia eléctrica resultante.

Dado que la potencia eléctrica se genera a 50 o 60 Hz, el generador debe girar a una velocidad fija que depende del número de polos de la máquina. Por ejemplo, para generar a 60 Hz en una máquina de dos polos, el rotor debe girar a 3600 rpm. Para generar a 50 Hz en una máquina de cuatro polos, el rotor debe girar a 1500 rpm. La velocidad de rotación necesaria para una frecuencia dada puede calcularse siempre mediante la ecuación anterior.

### 9.3.5 Fuerza electromotriz generado por un generador síncrono.

Según la Ley de Faraday, se puede definir la magnitud del voltaje inducido en un estator como en la ecuación de numeración 9.1.

Como la propia ecuación indica, este voltaje depende del flujo magnético en la máquina, de la frecuencia o velocidad de rotación y de la construcción de la máquina.

El voltaje interno generado  $E_A$  es directamente proporcional al flujo y a la velocidad, pero el flujo en sí depende de la corriente que fluye en el circuito de campo del rotor y en nuestro caso del tipo de imán permanente que usemos.

### 9.3.6 Potencia y par en los generadores síncronos

No toda la potencia mecánica que entra al generador síncrono se convierte en potencia eléctrica a la salida de la máquina. La diferencia entre la potencia de salida y la de entrada representa las pérdidas de la máquina.

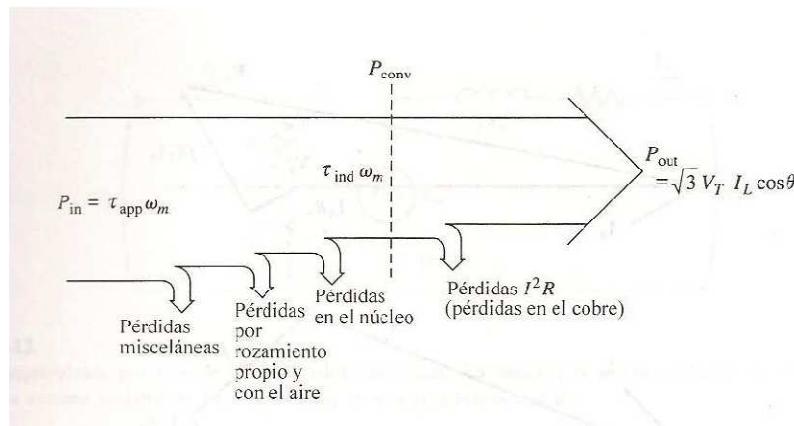


Figura 9.3.3. Diagrama de flujo de potencia en un generador síncrono

### 9.3.7 Resumen de funcionamiento de un generador síncrono.

Los imanes permanentes crean un campo eléctrico en el entrehierro

El rotor crea un campo magnético  $B$  cte.

El rotor gira a  $N$  rpm impulsado por la máquina motriz

El campo magnético  $B$  gira a la misma velocidad que el rotor

El campo magnético  $B$  induce tensiones en el estator con una frecuencia

$$f=np/60 \quad (9.3.10)$$

Al conectar una carga circula corriente por el estator

Que origina un campo giratorio en el estator (reacción del inducido)

El campo magnético resultante es la suma de los dos campos del inductor y del inducido

La tensión en bornes U del alternador es distinta a la del vacío debido a las caídas de tensión por: las resistencias de los devanados y por la reactancia síncrona

## 10 ENSAYOS Y ESTUDIO METROLOGICO

Para realizar los ensayos como generador, realizamos las conexiones indicadas en la figura 10.1

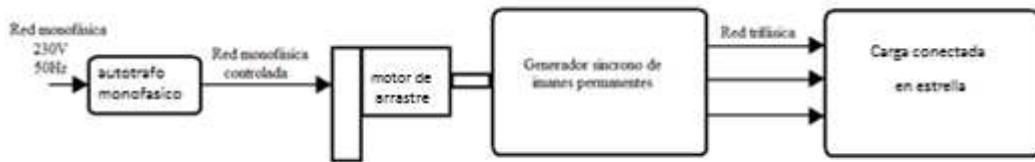


Figura 10.1: Diagrama de bloques del sistema como generador síncrono

Y como motor la conexión es la siguiente:



Figura 10.2: Diagrama de bloques del sistema como motor síncrono

Al ser un motor síncrono necesita para arrancar un motor auxiliar o un pequeño empujón que haga que gire y se sincronice el campo magnético giratorio del devanado estatórico con el campo creado por los imanes. Para ello en algún caso empleamos la ayuda del motor de arrastre, solo hasta la sincronización, y en otros casos es suficiente con la simple ayuda de un pequeño empujón con la mano.

Debido a los distintos rotores que tenemos se realizan diversos ensayos observando sus formas de onda y su comportamiento tanto como generador síncrono como motor síncrono.

Para toda la parte experimental empleamos una carga resistiva conectada en estrella, con un valor de  $270\ \Omega$  por fase; deberemos observar en las gráficas que las ondas de tensión e intensidad no están desfasadas.

Para poder medir la intensidad que circula por el estator necesitamos una resistencia Shunt de valor  $0.1\ \Omega$  colocada en serie con la resistencia en fase.

## 10.1 MATERIAL

El material para realizar los ensayos es el siguiente:

- Osciloscopio digital: visualizar formas de onda
- Ordenador: Se usa para digitalizar las formas de onda.
- Transformador trifásico: Alimenta al devanado estatórico cuando la máquina trabaja como motor.
- Multímetro: Se usa para medir tensión y corriente.
- Tacómetro: Se usa para medir la velocidad del rotor y motor de arrastre.
- Autotransformador: Se emplea para alimentar el motor de arrastre y conseguir distintas velocidades.

## 11 SIMULACIONES MEDIANTE FEMM.

FEMM es un programa de elementos finitos de libre distribución en internet <http://www.femm.info/wiki/Download>; nos permite simular en dos dimensiones -de manera estática o dinámica- el efecto sobre el estator de las distintas posiciones de los imanes colocados en el rotor.

Se puede dibujar directamente sobre el programa FEMM pero en nuestro caso lo importaremos desde el programa autocad con la extensión .dxf.

Una vez dibujado se selecciona los materiales de las siguientes regiones, en nuestro caso:

Estator: Steel 1018

Entrehierro y interior lata: Air

Lata: Supermalloy (Aleación de níquel)

Imanes: NdFeB 37 MGOf

Devanado estatórico: 18 AWG

En las diferentes zonas se selecciona el tamaño del mallado. Si su mallado es pequeño la calidad de los resultados se aproximarán bastante a la realidad pero en cambio el cálculo del programa será lento; por tanto habrá que aplicar un compromiso entre la exactitud del cálculo y la rapidez. En nuestro caso, en la zona de entrehierro, imanes y lata el mallado será el mallado más pequeño para tener una mayor exactitud en los resultados en estas áreas ya que es donde se prevé que estarán las líneas de flujo.

Una vez calculado el mallado se simula y podremos ver el resultado mediante una gama de colores, donde se puede observar las zonas de mayor inducción y campo o mediante las líneas negras que representan el sentido de circulación del flujo magnético.

Elegimos el rotor de  $p=6$  y  $p=2$  ya que proporciona mejor resultados en el estudio metrológico como generador y como motor en vacío. En cada caso de funcionamiento se impondrán diferentes condiciones respecto a las intensidades.

Habrá que tener en cuenta que la posición inicial del rotor y sentido de giro siempre serán las mismas en todos los casos. Nuestra posición inicial en todos nuestros cálculos en los modelos de femm es en la posición (0, 40.8) respecto al centro del estator, donde está alojado un imán con la polaridad sur enfrentada a la lata. La última condición impuesta será el sentido de giro del rotor y siempre será sentido antihorario.

## 12 OBTENCIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO ROTÓRICO

### 12.1 Mediante sonda sensor de efecto Hall

Consiste en ver cómo evoluciona el campo magnético a través de un diente determinado del estator donde está alojado nuestra sonda hall, haciendo girar nuestra lata de conserva en determinados puntos.

Se espera obtener por cada imán un valor de campo magnético máximo, en valor absoluto. Esto se debe a que cuando el diente del estator este enfrentado con el imán será la situación donde mayor números de líneas de flujo magnético atraviesan el diente y por tanto mayor campo magnético existe. Su signo, positivo o negativo, dependerá de la polaridad del imán. Se prevé una forma de onda senoidal.

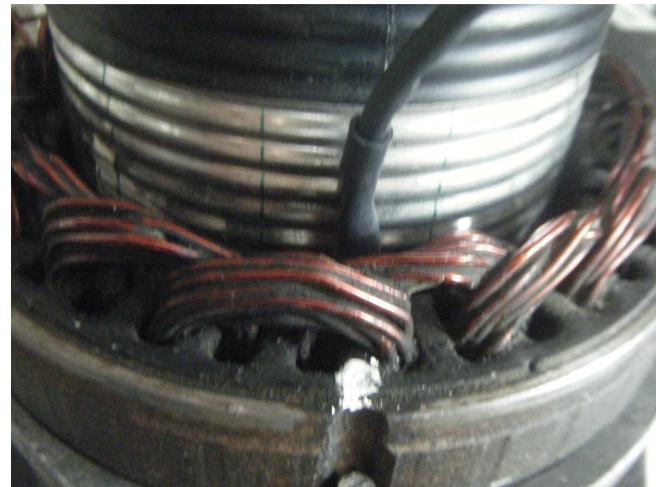


Figura 12.1: Sensor Hall: Parte blanca del estator es el diente donde se apoya sensor

La figura 12.2 se observa lo anteriormente dicho, ya que es el campo magnético obtenido para un rotor de 4 polos se obtendrán 2 valores de campo magnético máximos y dos valores de campo magnético mínimos. Observamos que no es senoidal.

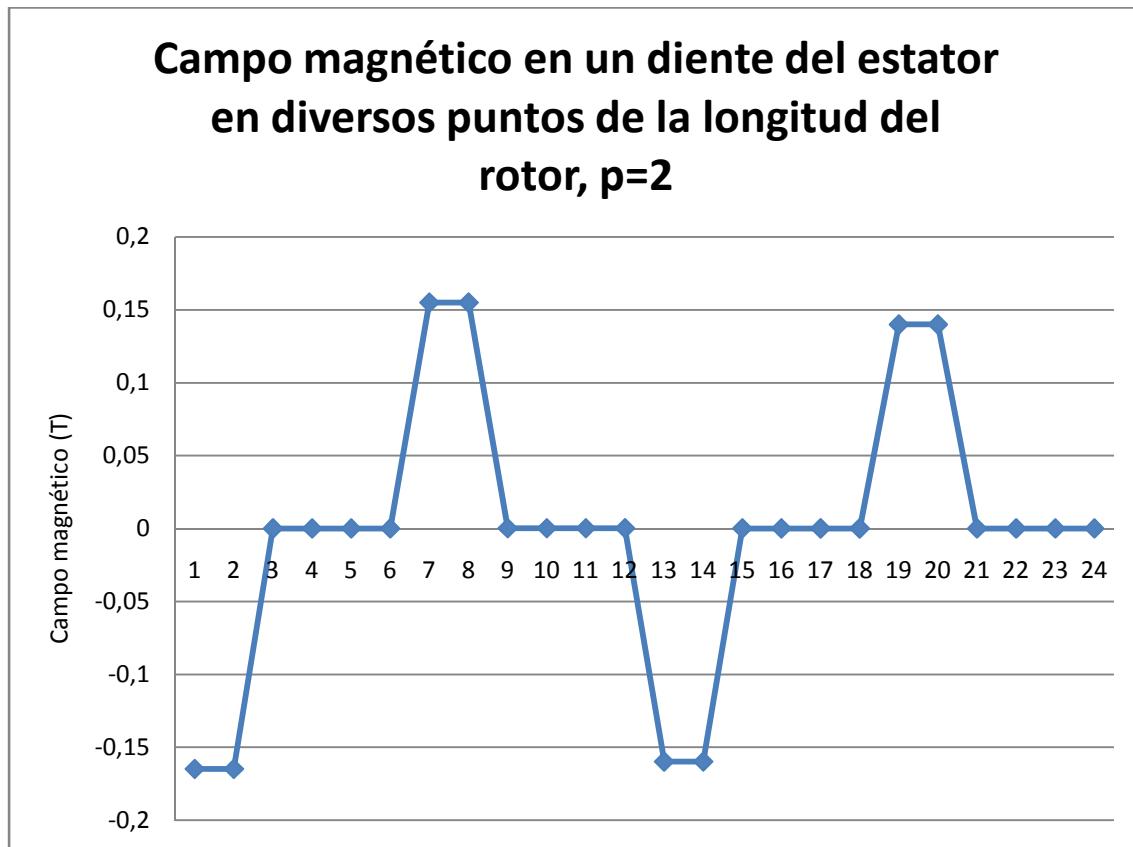


Figura 12.2: Campo magnético en un diente del estator en diversos puntos de la longitud del rotor,  $p=2$

## 12.2 Mediante simulación en FEMM

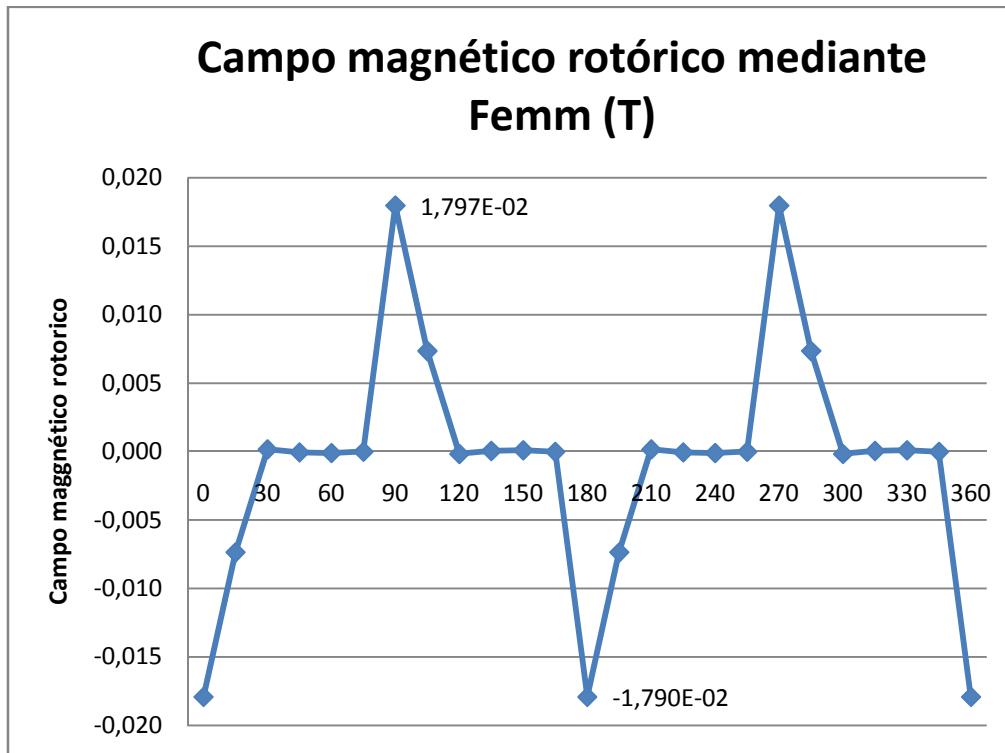


Figura 12.3: Campo magnético en un diente del estator en diversos puntos de la longitud del rotor,  $p=2$

## 12.3 Conclusiones

Podemos observar que existe una diferencia entre los resultados entre el simulador Fem y los datos experimentales. Existe una relación de 10 veces mayor el valor calculado experimentalmente, por tanto existe un error en el modelo de Femm.

Consultando con el tutor del proyecto me doy cuenta que la propiedad del material introducida a la lata en mis simulaciones es errónea, ya que he supuesto para todo la pared de la lata la propiedad de supermalloy. La confusión se ha dado debido a que el supermalloy es una aleación de níquel, material que también contiene la pared de la lata, pero de una permeabilidad muy alta, ya que es un material empleado para el apantallamiento magnético.

Realizamos una prueba para este caso,  $p$  rotor=2, variando el material de la lata y comprobar que lo anteriormente explicado tiene coherencia. En este caso la lata le damos la permeabilidad magnética del aire y realizamos otro vez los cálculos obteniendo lo siguiente:

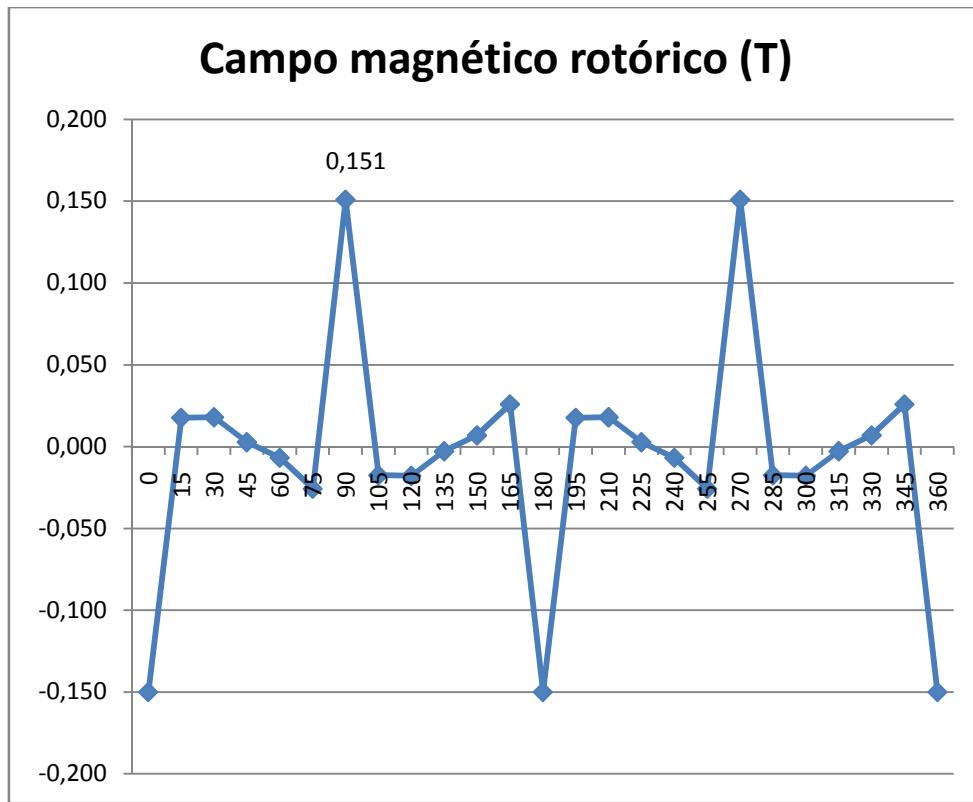


Figura 12.4: Campo magnético en un diente del estator en diversos puntos de la longitud del rotor,  $p=2$  con permeabilidad de la lata el aire

Como podemos observar en la figura 12.4 el valor máximo y mínimo de campo magnético rotórico obtenido en el entrehierro con la permeabilidad en la lata igual a la del aire se aproxima bastante al obtenido en la parte experimental.

Por tanto, hay que indicar que los siguientes apartados son calculados en el modelo de femm con el material de la lata como supermalloy de este modo los valores obtenidos en las simulaciones no se corresponderán con la parte experimental. Para solucionarlo, en la posición donde se localicen los valores máximos de Fem, energía máxima y par que se obtengan con la simulación con material supermalloy se realizará las mismas simulación en dichos modelos sustituyendo en el modelo de femm la permeabilidad de la lata por la del aire. De este modo obtendremos los valores reales que se deberán aproximar a la parte experimental.

## 13 OBTENCIÓN DEL CAMPO MAGNÉTICO ESTATÓRICO

### 13.1 Mediante sonda de efecto hall

Nos interesa conocer el campo estatórico. Para ello hay que eliminar los imanes que se pueden encontrar en el rotor, para que no intercedan en la medición del campo magnético estatórico.

Para realizar la medición se coloca la sonda de efecto Hall en un diente del estator inyectando corriente por le devanado estatórico y el resultado es el siguiente:

:

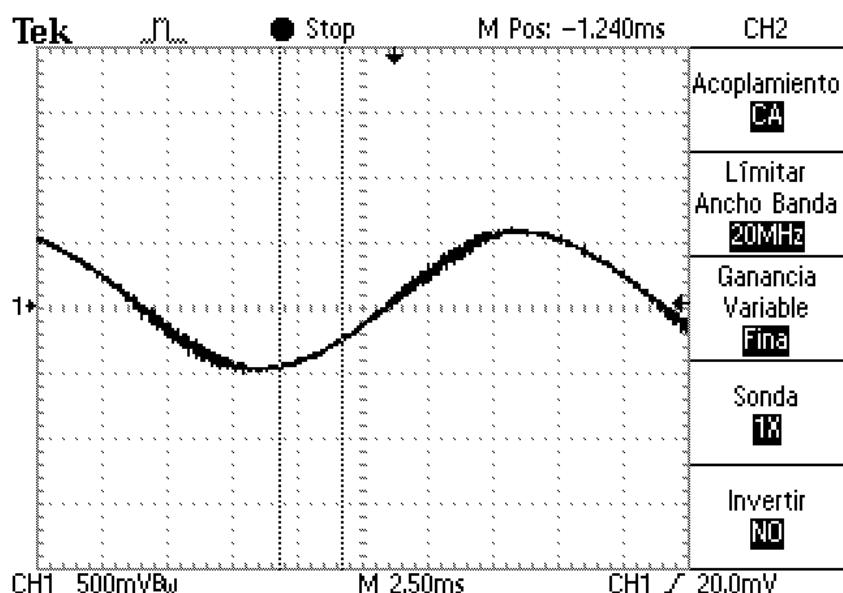


Figura 13.1: Campo magnético estatórico en un diente obtenido por la sonda efecto Hall

Existe una relación de transformación para obtener el campo magnético: 1 V de la sonda Hall equivale a 500 Gauss y cada tesla equivale a 10000 Gauss. Por consiguiente, el valor del campo magnético estatórico es de 0.025Teslas.

### 13.2 Mediante simulación en FEMM

Queremos conocer el campo estatórico en un diente sin la influencia del campo magnético producido por los imanes, por tanto se simula cualquier caso de motor y el resultado es el siguiente

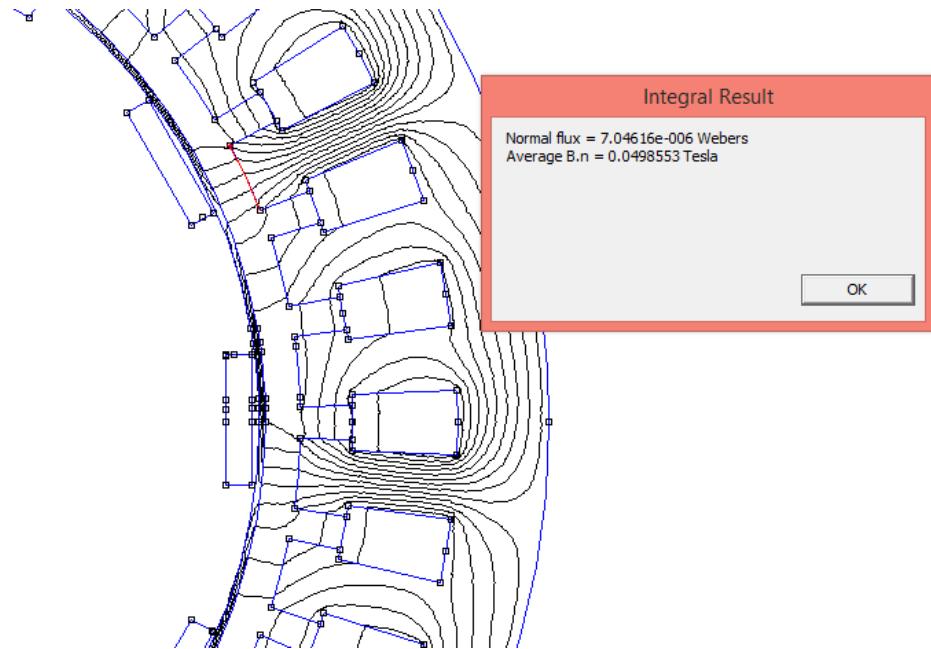


Figura 13.2: Campo magnético estatórico a la salida del diente

Como se puede observar en la figura 12.2.7 el campo magnético estatórico en el diente tiene un valor según el simulador de 0.05 Teslas.

Para simular la situación real debemos tener en cuenta y compararla con la sonda de efecto hall no se encuentra perfectamente en la salida del diente y no ocupa el ancho de este. Para ello incorporaremos en nuestra simulación una línea en el entrehierro, no tan ancha como el diente y no tan próxima a la salida de este. Como se puede observar en la figura 13.2.

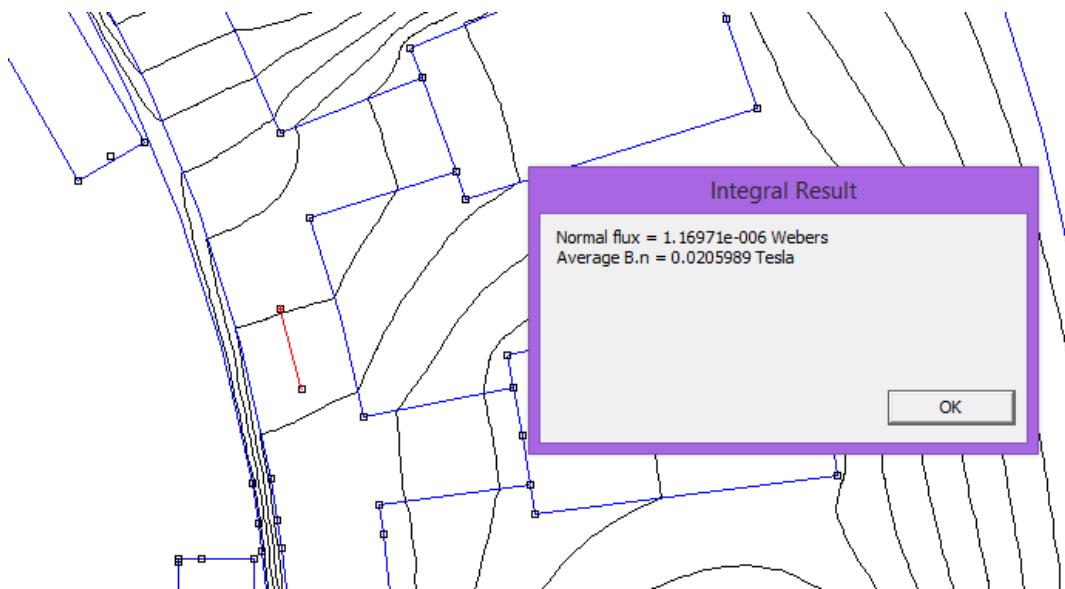


Figura 13.3: Campo magnético estatórico en el entrehierro enfrente de un diente.

Una vez simulado obtenemos el valor del campo estatórico que pasa por esa línea, su valor es 0.02 Teslas, como se observa en la figura 13.3

### 13.3 Conclusiones

Comparando los valores de campo magnético estatórico obtenidos por la sonda de efecto hall con los valores obtenidos en los modelos de femm concluimos con certeza que el valor obtenido en la sonda Hall es correcto ya que en ese caso su valor máximo era 0.025 Teslas y en la simulación es de 0.0205 Teslas.

En este caso el material de la lata introducido en la simulación de femm parece no afectar al resultado. Una posible explicación puede estar en que medimos en el entrehierro y las líneas de flujo magnético aun no han llegado a entrar en contacto con el material de la lata, supermalloy.

## 14 ENSAYO DE VACIO: GENERADOR SINCRONO

Se realiza este ensayo para diferentes números de polos y frecuencia y observamos lo siguiente, la tensión aumenta proporcionalmente a medida que aumentamos la velocidad de giro.

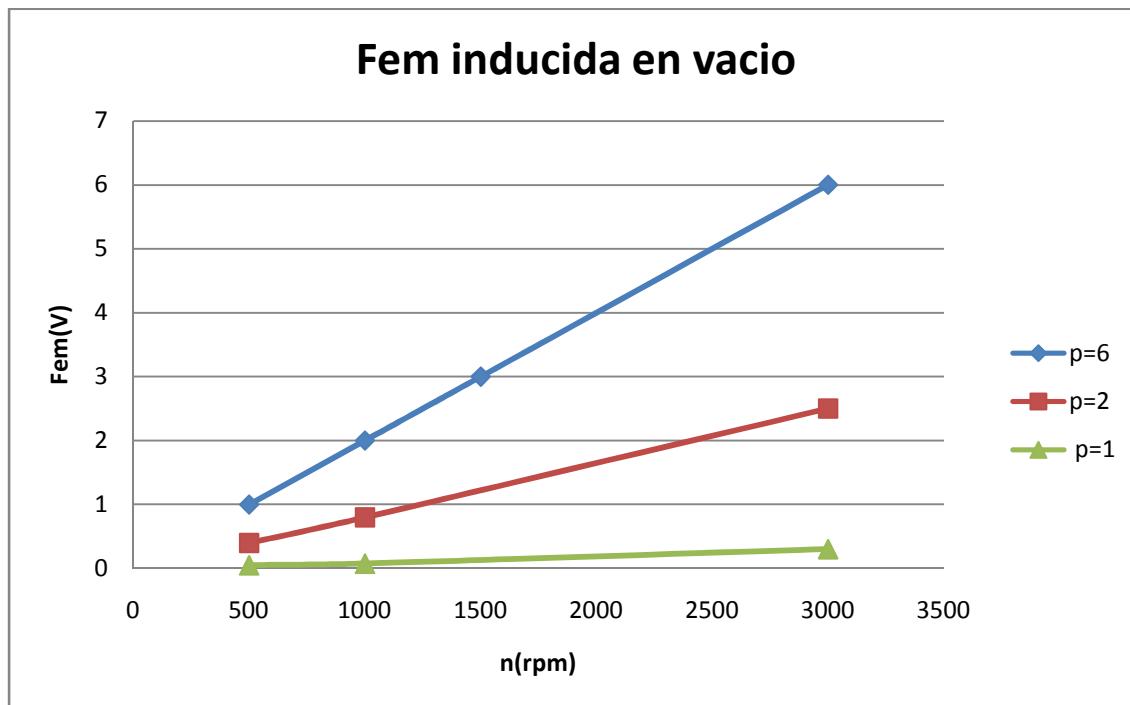


Figura 14.1: Fem inducida en vacío: Generador

## 14.1 GENERADOR $p_{\text{estator}}=p_{\text{rotor}}=6$

### 14.1.1 Ensayos y estudio metrológico

A tener en cuenta que las formas de ondas están realizadas con la sonda del osciloscopio atenuada por 10. Por tanto, para obtener la medida real hay que multiplicar por 10 los valores que necesitemos conocer de la figuras 14.2, 14.3, 14.4 y 14.5.

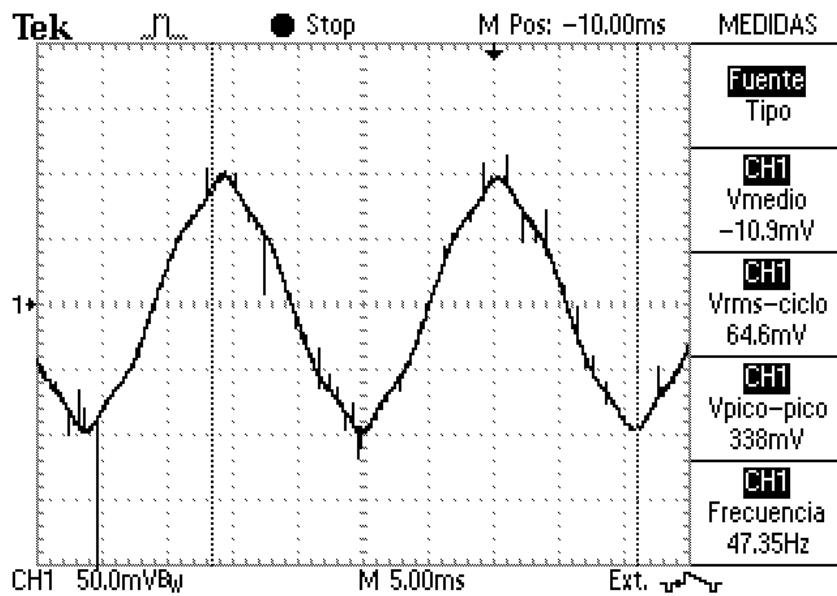


Figura 14.2: Fem inducida en vacío: Generador  $p=6$  y  $n=500\text{rpm}$ .

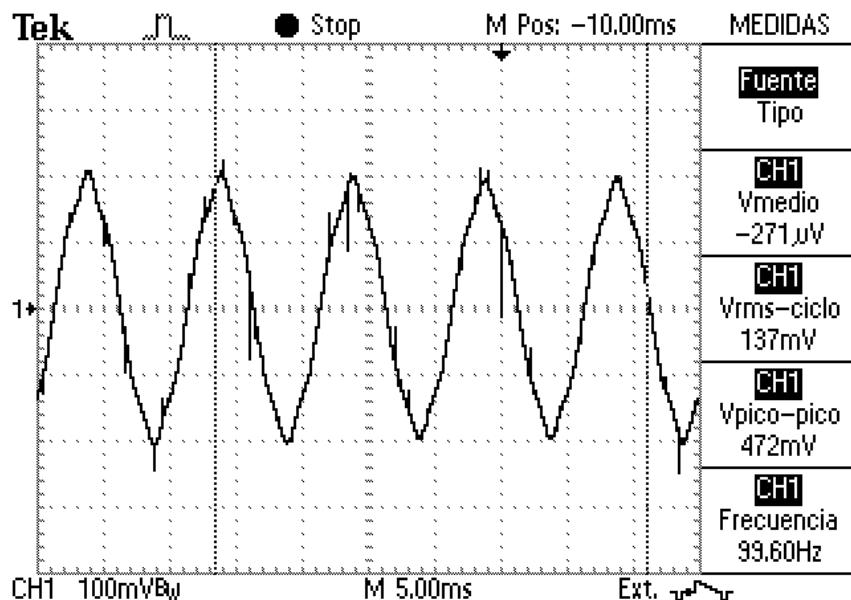


Figura 14.3: Fem inducida en vacío: Generador  $p=6$  y  $n=1000\text{rpm}$

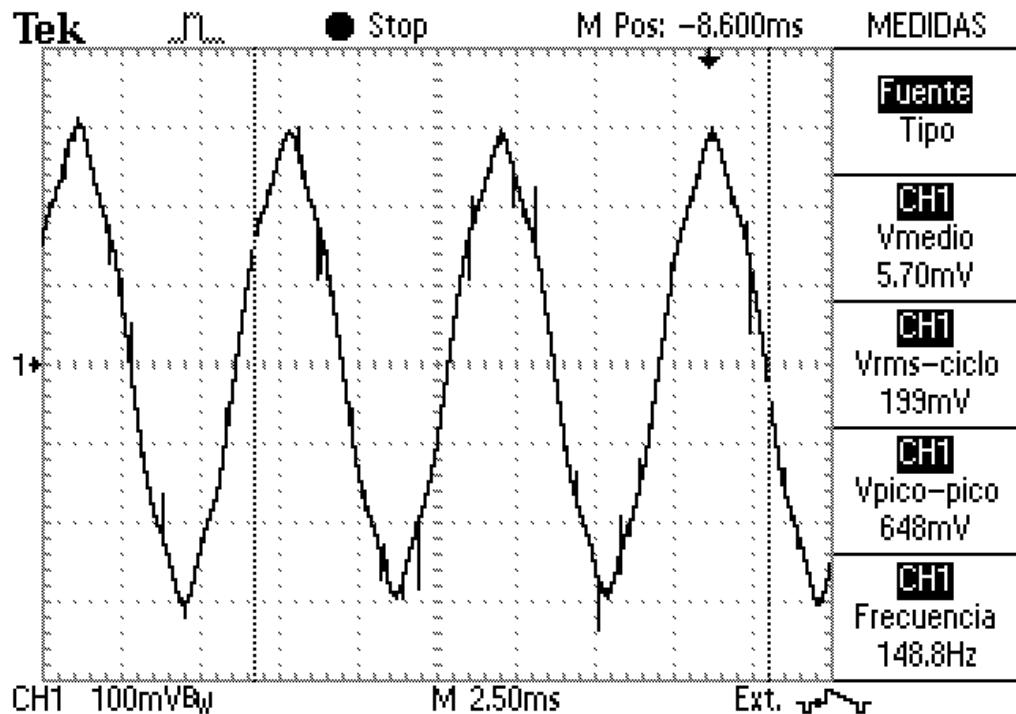


Figura 14.4: Fem inducida en vacío: Generador  $p=6$  y  $n=1500\text{rpm}$

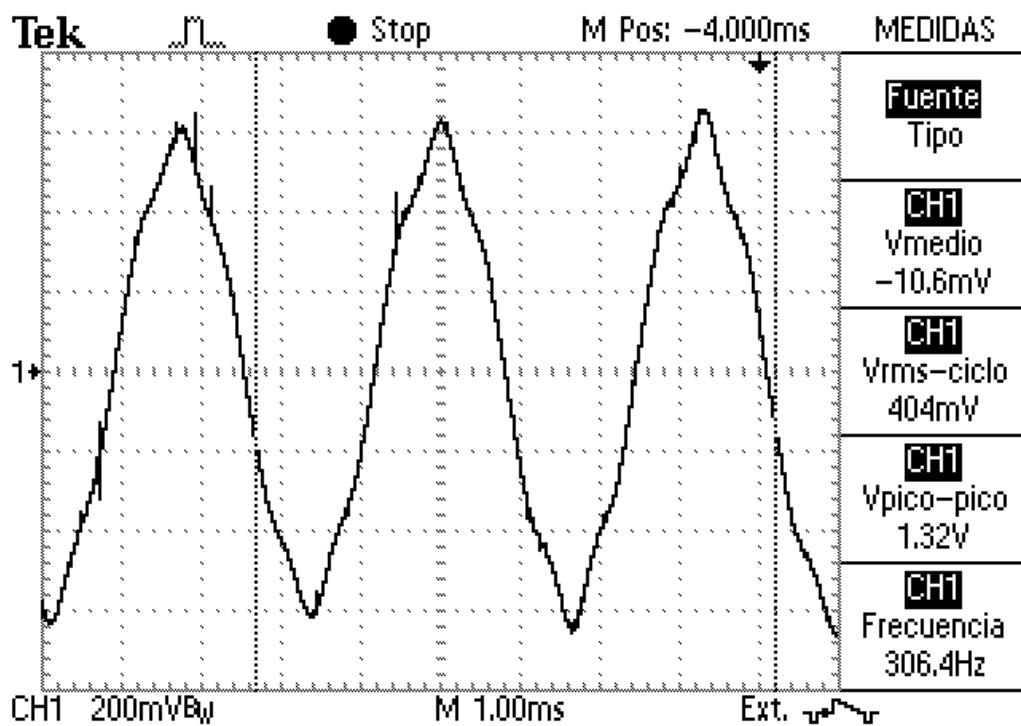


Figura 14.5: Fem inducida en vacío: Generador  $p=6$  y  $n=3000\text{rpm}$

#### 14.1.2 Análisis por Femm

El objetivo es comprobar que fem produce el generador en vacío con esta configuración de imanes.

Para este caso aplicaremos la Ley de Faraday.

$$\xi = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (14.1)$$

$\xi$ = Fuerza electromotriz inducida. (V)

$\Phi$ = Flujo magnético (Wb)

$t$ =Tiempo (s)

Es decir, la fuerza electromotriz de inducida en un circuito cerrado es igual a la variación del flujo de inducción del campo magnético que lo atraviesa en la unidad de tiempo.

En nuestro caso podemos obtener fácilmente la fem en nuestro programa obteniendo el flujo en dos instante distintos y aplicando la fórmula anteriormente explicada con numeración 12.1.

Una vez dibujado nuestro generador en femm, en nuestro caso ha sido importado a Fem desde un archivo con extensión .dxf que se puede obtener mediante autocad, se imponen las condiciones.

En nuestro caso y por las condiciones de trabajo, en vacío, las condiciones a imponer en el programa son que sus intensidades sean cero.

Esta es una pequeña ejemplo de la obtención los datos en la simulación femm y como se aplica la fórmula 14.1

Se analiza su caso para  $t=0$  y su resultado se muestra en la Figura 14.1.

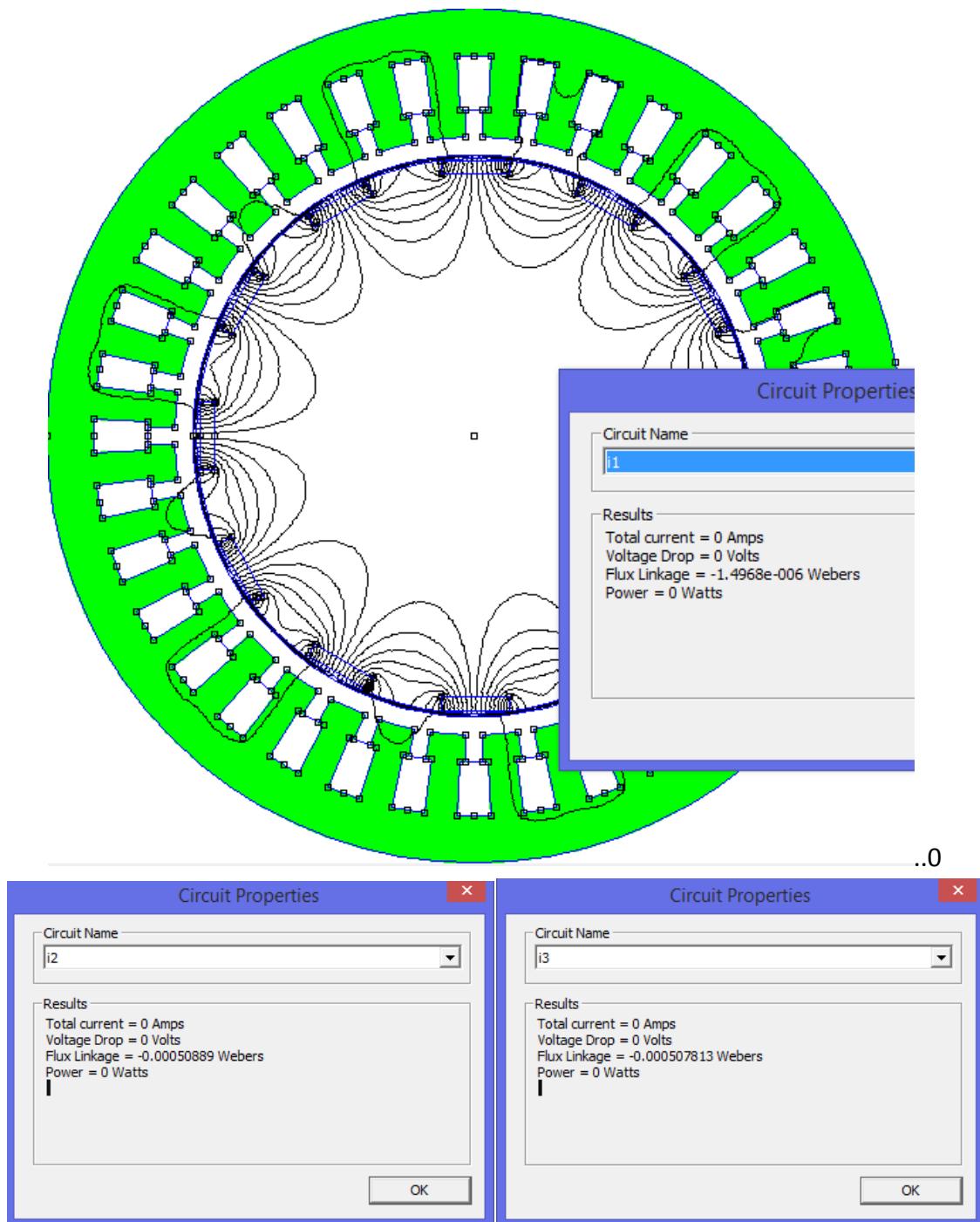


Figura 14.6: Datos obtenidos en Fem para generador en vacío y  $t=0$

Se analiza para  $t = 2.5$  ms con los siguientes se muestran en la figura 14.2.

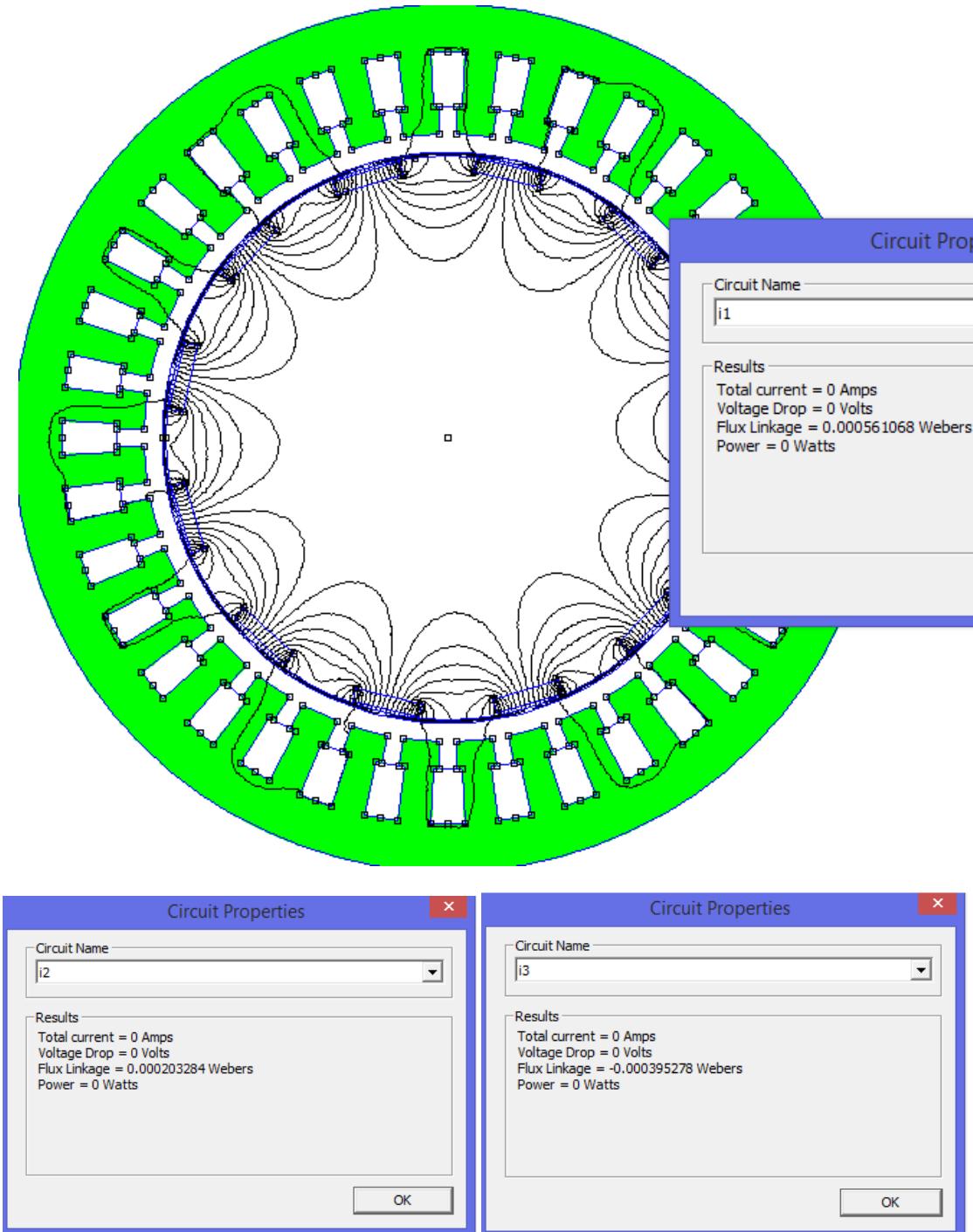


Figura 14.7: Datos obtenidos en Fem para generador en vacío y  $t=2.5$  ms

A partir del dato obtenido en la simulación, Flux Linkage, y el dato de tiempo impuesto por nosotros podemos aplicar la ecuación fórmula 14.1.

Primero obtenemos la variación de flujo:

$$\begin{aligned}\Delta\Phi_1 &= i_1(t = 2.5ms) - i_1(t = 0) = 0.000561068 - (-1.468 * 10^{-6}) \\ &= 5.62536 * 10^{-4} Wb\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\Phi_2 &= i_2(t = 2.5ms) - i_2(t = 0) = 0.000203284 - (0.00050889) \\ &= 7.12174 * 10^{-4} Wb\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta\Phi_3 &= i_3(t = 2.5ms) - i_3(t = 0) = -0.000395278 - (-0.000507813) \\ &= 1.12535 * 10^{-4} Wb\end{aligned}$$

$$\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = t_1(t = 2.5ms) - t_1(t = 0) = 2.5 * 10^{-3} s$$

Aplicando la Ley de Faraday, 12.1, obtenemos la fuerza electromotriz inducida en cada fase y en el instante de tiempo t=2.5 ms

$$\xi_1 = -\frac{\Delta\Phi_1}{\Delta t_1} = -\frac{5.62536 * 10^{-4}}{2.5 * 10^{-3}} = 0.225V$$

$$\xi_2 = -\frac{\Delta\Phi_2}{\Delta t_2} = -\frac{7.12174 * 10^{-4}}{2.5 * 10^{-3}} = 0.2848V$$

$$\xi_3 = -\frac{\Delta\Phi_3}{\Delta t_3} = -\frac{1.12535 * 10^{-4}}{2.5 * 10^{-3}} = 0.045014V$$

Una vez conocido el procedimiento voy a analizar dos casos:

- Análisis mediante Femm:  $p_{\text{estator}}=p_{\text{rotor}}=6$  y  $n=500\text{rpm}$ .
- Análisis mediante Femm:  $p_{\text{estator}}=p_{\text{rotor}}=6$  y  $n=3000\text{rpm}$ .

#### 14.1.2.1 Análisis mediante Femm: $p$ estator= $p$ rotor =6 y $n=500$ rpm.

Siguiendo el procedimiento explicado en el apartado 14.1.2 para solo una fase y para distintos instantes a lo largo del giro del rotor obtenemos los siguientes resultados:

grados rotados geométricos	tiempo (s)	$\Delta t$ (s)	$\Delta\Phi$ (Wb)	fluke linkage (Wb)	femm (V)
0	0,0000			-1,497E-08	
5	0,0017	0,0017	-3,078E-04	-3,078E-04	-0,185
10	0,0033	0,0017	-2,011E-04	-5,089E-04	-0,121
15	0,0050	0,0017	-5,698E-05	-5,659E-04	-0,034
20	0,0067	0,0017	6,304E-05	-5,028E-04	0,038
25	0,0083	0,0017	1,972E-04	-3,056E-04	0,118
30	0,0100	0,0017	3,057E-04	1,482E-08	0,183
35	0,0117	0,0017	3,078E-04	3,078E-04	0,185
40	0,0133	0,0017	2,011E-04	5,089E-04	0,121
45	0,0150	0,0017	5,218E-05	5,611E-04	0,031
50	0,0167	0,0017	-5,314E-05	5,079E-04	-0,032
55	0,0183	0,0017	-2,523E-04	2,556E-04	-0,151
60	0,0200	0,0017	-2,556E-04	-1,497E-08	-0,153
65	0,0217	0,0017	-3,078E-04	-3,078E-04	-0,185
70	0,0233	0,0017	-2,011E-04	-5,089E-04	-0,121
75	0,0250	0,0017	-5,698E-05	-5,659E-04	-0,034
80	0,0267	0,0017	6,304E-05	-5,028E-04	0,038
85	0,0283	0,0017	1,972E-04	-3,056E-04	0,118
90	0,0300	0,0017	3,057E-04	1,482E-08	0,183
95	0,0317	0,0017	3,078E-04	3,078E-04	0,185
100	0,0333	0,0017	2,011E-04	5,089E-04	0,121
105	0,0350	0,0017	5,218E-05	5,611E-04	0,031
110	0,0367	0,0017	-5,314E-05	5,079E-04	-0,032
115	0,0383	0,0017	-2,523E-04	2,556E-04	-0,151
120	0,0400	0,0017	-2,556E-04	-1,497E-08	-0,153

Tabla 14.1: Fem para generador en vacío  $p$  estator= $p$  rotor y  $n=500$ rpm.

Como se puede observar en la tabla 14.1 los datos se repiten cada 60 grados de rotación del rotor, es decir los grados eléctricos para esta máquina son 60. O como es lo mismo, su frecuencia es 50Hz es decir cada 0.02s deberá pasar un ciclo.

Los grados eléctricos indican el ciclo que abarca la Fem. Este se puede calcular dividiendo los 360º de un giro entre el número de pares de polos. En este caso al coincidir  $p$  estator=  $p$  rotor no tenemos ningún problema en la elección de los grados eléctricos de esta situación.

Para observar visualmente la variación de Fem como generador en vacío la representamos en la figura 14.3:

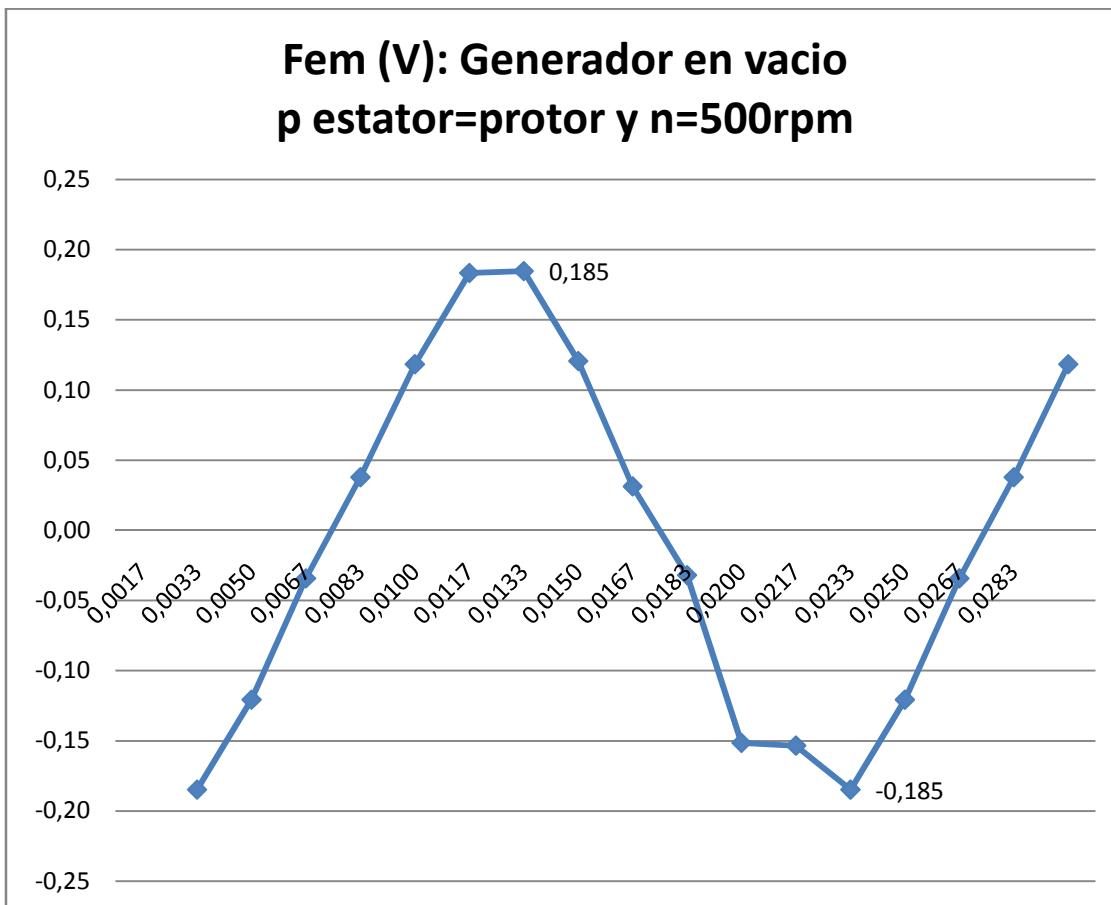


Figura 14.8: Fem para generador en vacío  $p$  rotor =  $p$  estator y  $n=500\text{rpm}$

Observamos una onda armónica con unos valores máximos y mínimos de 0.185V y -0.185V respectivamente. Realmente este valor es el valor de fase ya que en la simulación se obtiene el valor entre los bornes del devanado.

A continuación voy a representar los casos más relevantes explicados anteriormente incorporando las simulaciones de FEMM donde se han obtenido todos los datos. De este modo podremos observar el comportamiento de las líneas de campo en cada caso.

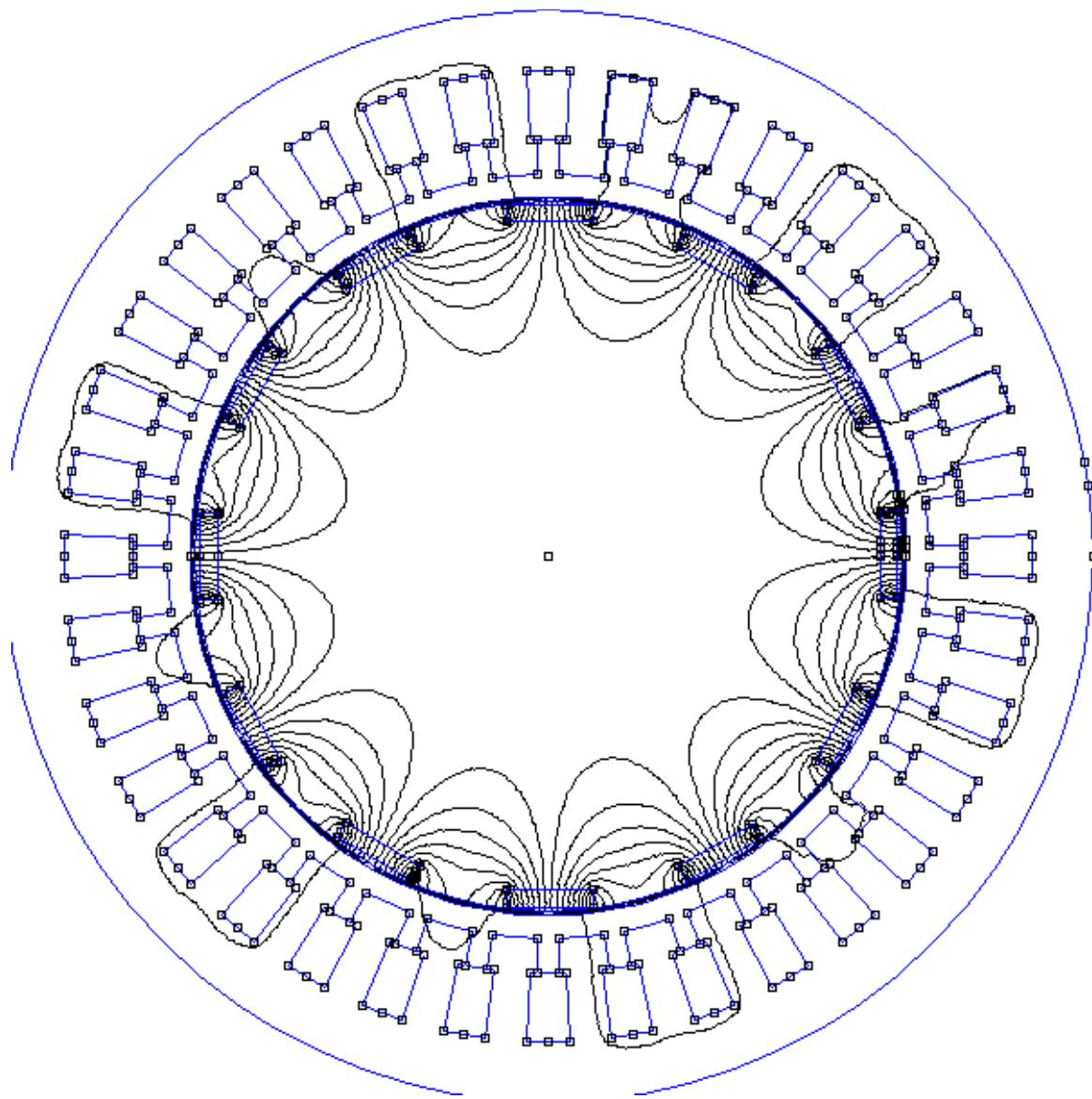


Figura 14.9: Líneas de campo magnético en la posición inicial caso generador en vacío para protor=pestator=6. Punto de mínima Fem

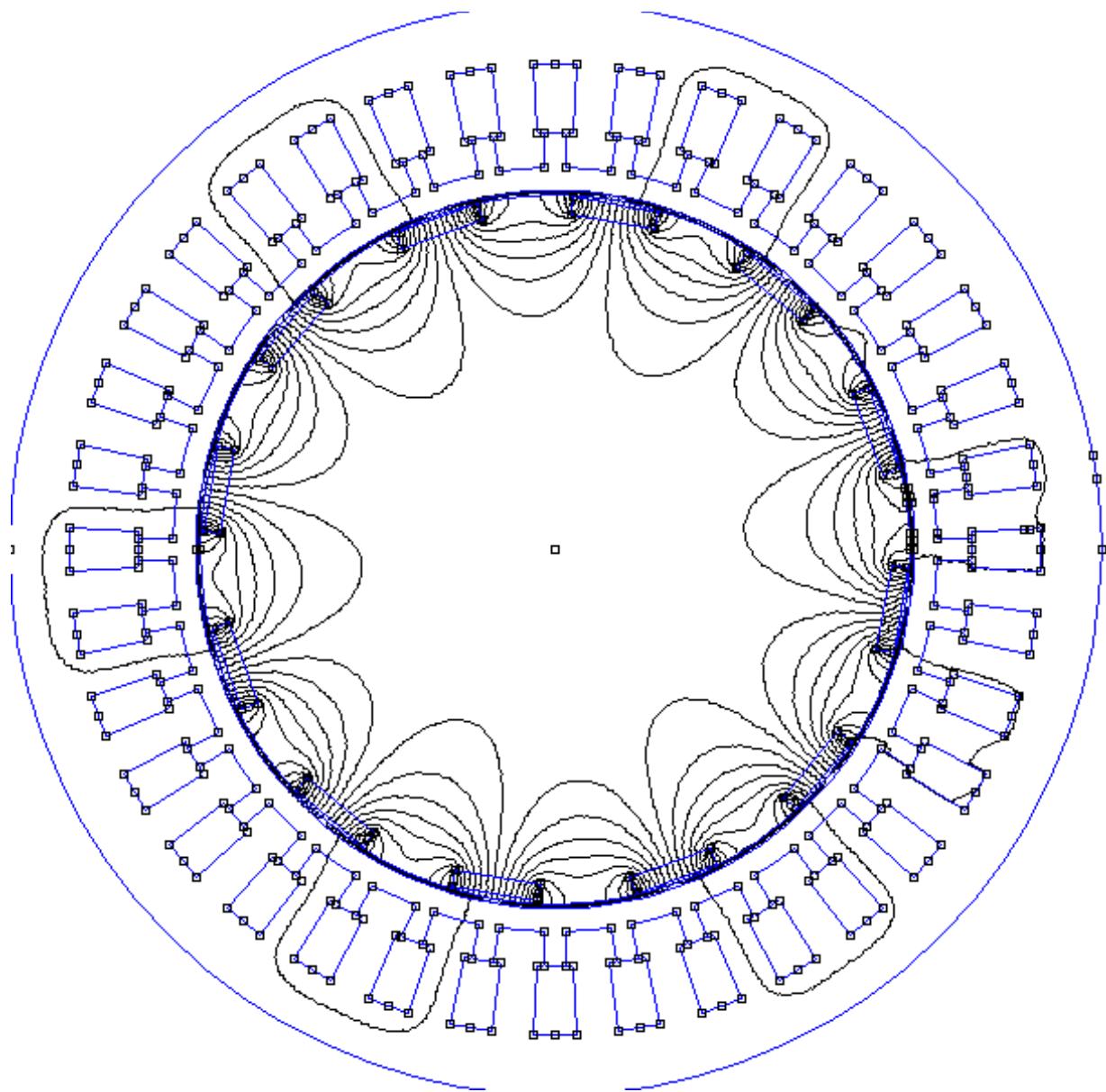


Figura 14.10: Líneas de campo magnético cuando el rotor ha girado 20º geométricos respecto a su posición inicial caso de generador en vacío para protor=pestator=6:  
Punto con valor 0 de Fem.

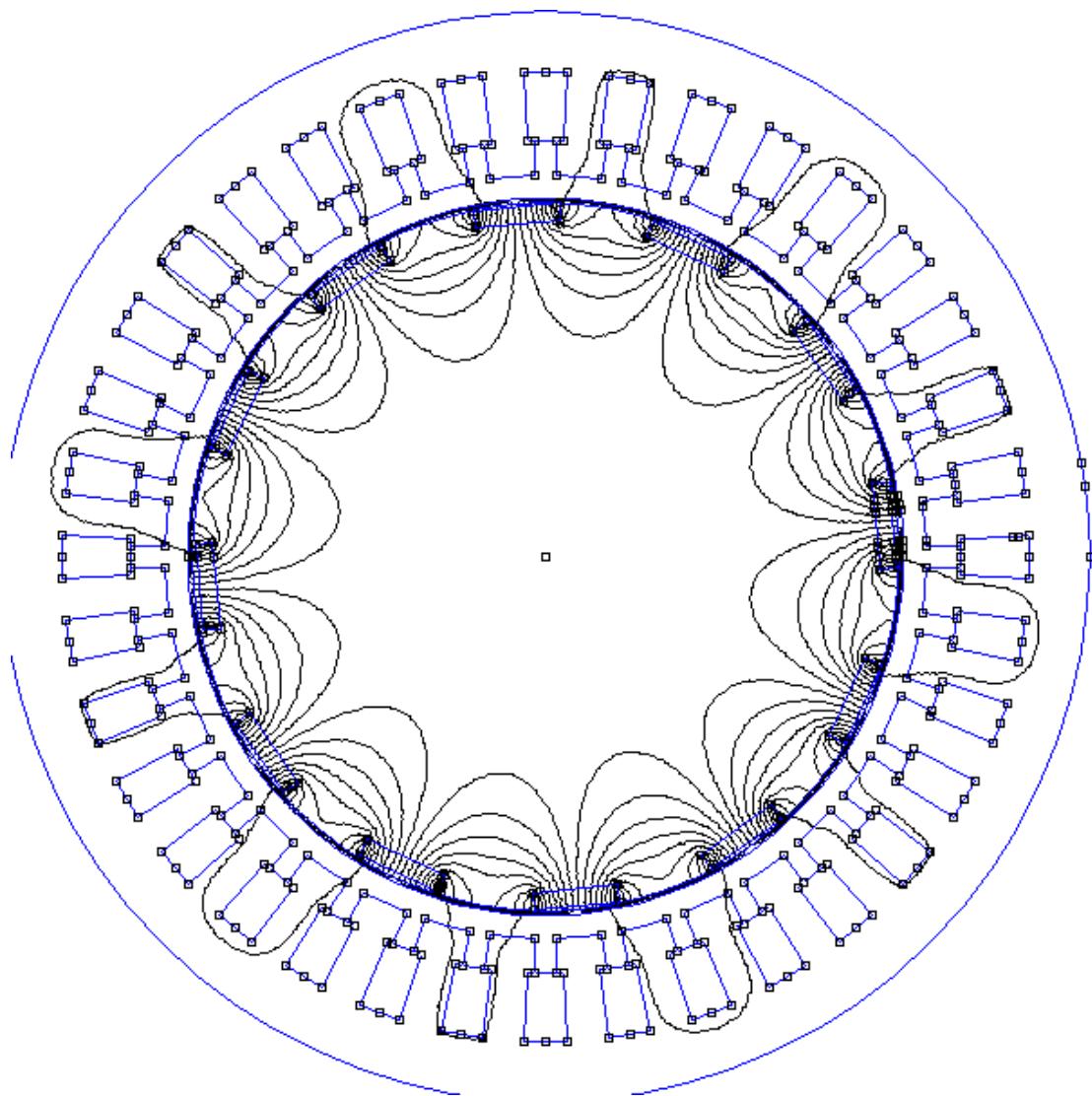


Figura 14.11: Líneas de campo magnético cuando el rotor ha girado 35º geométricos respecto a su posición inicial caso de generador en vacío para protor=pestator=6:  
Punto de máxima Fem.

#### 14.1.2.2 Análisis mediante femm: $p$ estator= $p$ rotor =6 y $n=3000\text{rpm}$ .

Se procede a simular del mismo modo que se ha explicado en el apartado 14.1.2

En este caso lo que cambia respecto al apartado 14.1.2.1 es la velocidad de giro, en este caso es  $n=3000\text{rpm}$ . Por tanto su nueva frecuencia será de 300Hz y el incremento temporal al depender de dicha frecuencia variara.

grados rotados geométricos	tiempo (s)	$\Delta t$ (s)	$\Delta\Phi$ (Wb)	fluke linkage (Wb)	femm (V)
0	0,0000			-1,497E-08	
5	0,0003	0,0003	-3,078E-04	-3,078E-04	-1,108
10	0,0006	0,0003	-2,011E-04	-5,089E-04	-0,724
15	0,0008	0,0003	-5,698E-05	-5,659E-04	-0,205
20	0,0011	0,0003	6,304E-05	-5,028E-04	0,227
25	0,0014	0,0003	1,972E-04	-3,056E-04	0,710
30	0,0017	0,0003	3,057E-04	1,482E-08	1,100
35	0,0019	0,0003	3,078E-04	3,078E-04	1,108
40	0,0022	0,0003	2,011E-04	5,089E-04	0,724
45	0,0025	0,0003	5,218E-05	5,611E-04	0,188
50	0,0028	0,0003	-5,314E-05	5,079E-04	-0,191
55	0,0031	0,0003	-2,523E-04	2,556E-04	-0,908
60	0,0033	0,0003	-2,556E-04	-1,497E-08	-0,920

Tabla 14.2: Fem para generador en vacío  $p$  estator= $p$  rotor y  $n=3000\text{rpm}$

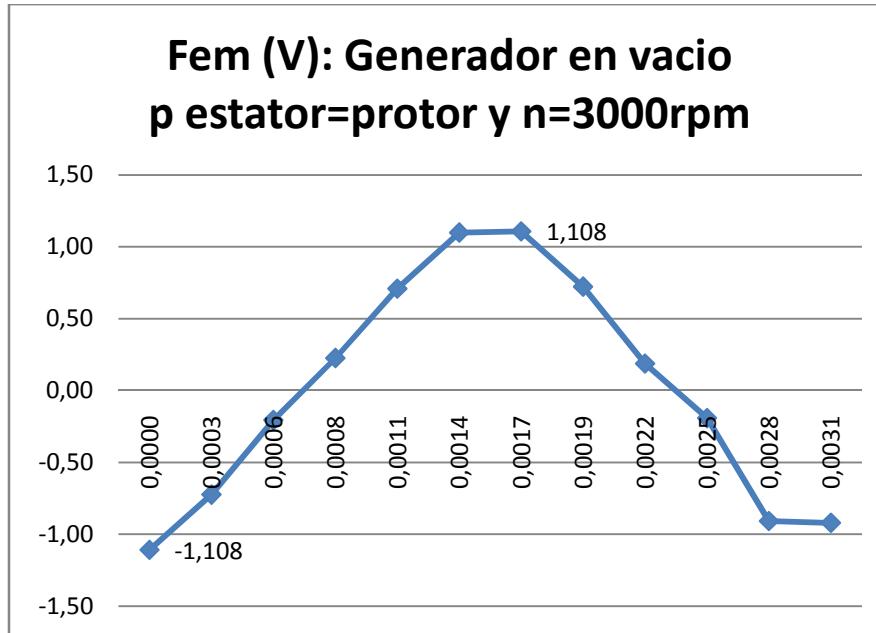


Figura 14.12: Fem para generador en vacío p rotor = p estator y n=3000rpm

#### 14.1.3 Conclusiones

Teniendo en cuenta una de las formulas principales en las máquinas eléctricas expresadas anteriormente con la numeración 9.3.9 cabe destacar que cuando trabaje como generador esperamos que se cumpla la siguiente fórmula:

$$n \text{ estator} = \frac{60*f}{p \text{ rotor}} \quad (14.2)$$

A continuación empleamos la fórmula 14.2 para la obtención de la frecuencia y la comparemos con la observada en las figuras del apartado 14.1.1.

p rotor	n(rpm)	f calculada	
		formula 10,2 (Hz)	f experimental (Hz)
6	500	50	47,35
	1000	100	99,6
	1500	150	148,8
	3000	300	306,4

Tabla 14.3: Comparación de frecuencia calculada y experimental p estator=p rotor.

Como vemos la diferencia entre la frecuencia calculada y la observada experimentalmente, tanto con el tacómetro como por las figuras del apartado 14.1.1, es mínima dando por válida la fórmula 10.2.

En la parte experimental obtenemos un valor máximo de  $\text{femm}= 1 \text{ V}$ , como valor de línea, y en la simulación su valor máximo es de  $0.185\text{V}$ , como valor de fase. Para

comparar necesitamos que los dos valores sean de línea o de fase, quedando de la siguiente forma:

	Fem línea experimental (V)	Fem línea simulador(V)
500rpm	1	0.32
3000rpm	6.8	1.91

Tabla 14.4: Comparación de fem experimental y la obtenida por el simulador Femm.

Observamos en la tabla 14.4 que hay una variación considerable de Fem entre el caso experimental y la parte del simulador fem. Puede deberse a dos motivos, el primero que nuestro modelo de fem es demasiado perfecto para nuestro prototipo y el segundo motivo a nuestro error de colocar un material equivocado en la lata en el modelo de femm.

Realizando comprobaciones y cambiando la permeabilidad de la lata, nos damos cuenta que los incrementos de grados girados en el rotor, 5º, pasa de una situación en la cual se encuentra un diente del estator con flujo máximo a otra situación donde el flujo magnético es la mitad que el flujo máximo. Al cambiar el material de la lata en el simulador femm se observa visualmente lo anteriormente explicado, debido a que al reducir la permeabilidad las líneas de campo magnético atraviesan la lata

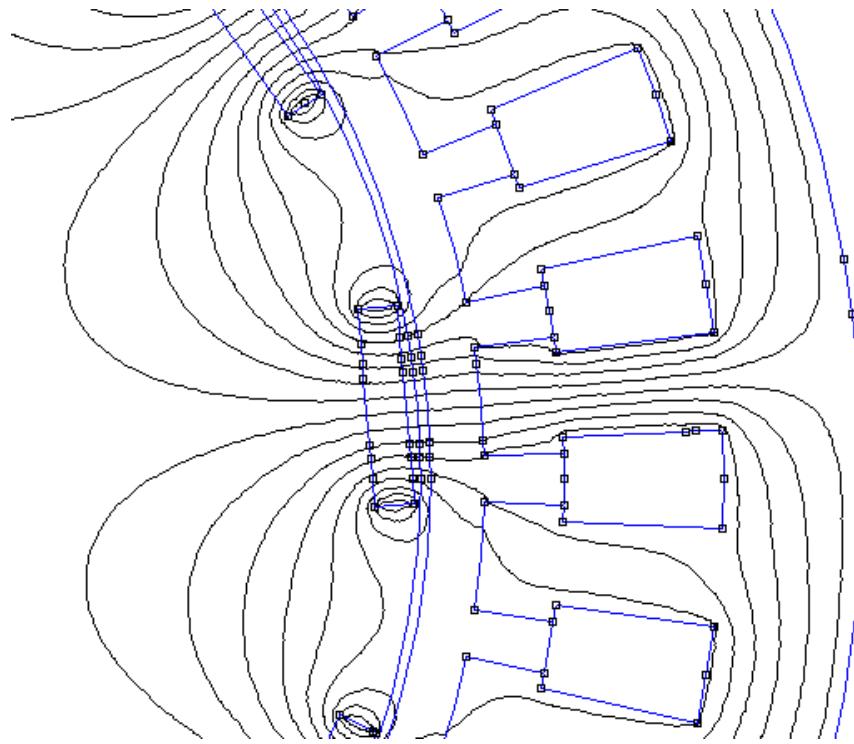


Figura 14.13: Líneas de campo magnético en un diente para  $t=0$  y rotor en la posición inicial. Permeabilidad de la lata suponemos igual que la del aire.

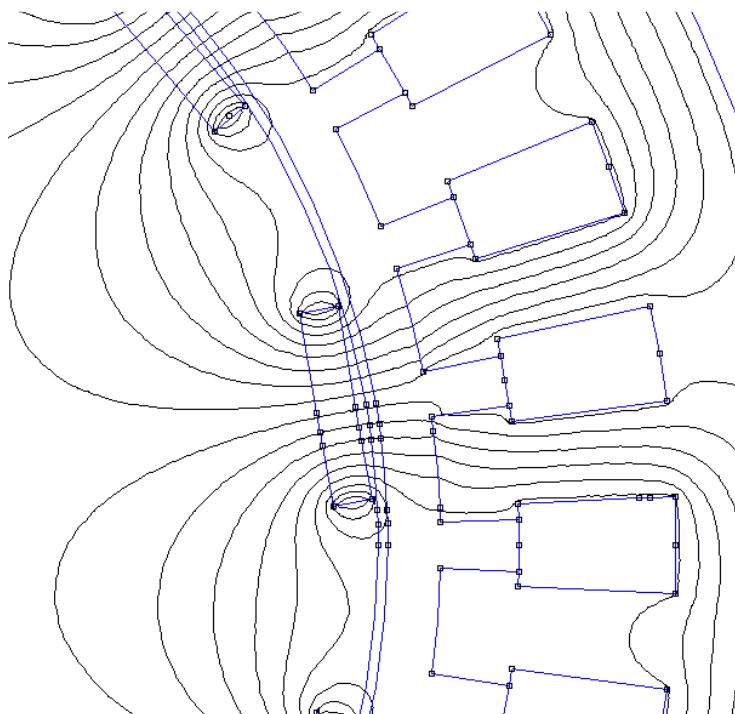


Figura 14.14: Líneas de campo magnético en un diente para  $t=0.0017s$  y el rotor girado  $5^\circ$  geométricamente respecto la posición inicial. Permeabilidad de la lata suponemos igual que la del aire.

Por tanto se decide realizar una simulación cuando el rotor está en su posición de máxima Fem, es decir cuando el rotor a girado 35 grados, e incrementar en 2.5 grados el rotor en sus inmediaciones e incorporando a la lata la permeabilidad del aire para aproximarla a la realidad de nuestro prototipo. Los datos obtenidos en estas aproximaciones se observan en la tabla 14.5

grados rotados geométricos	tiempo (s)	$\Delta t$ (s)	$\Delta\Phi$ (Wb)	fluke linkage (Wb)	femm (V)
30	0,0100			1,258E-06	
32,5	0,0108	0,0008	1,409E-03	1,410E-03	1,691
35	0,0117	0,0008	1,243E-03	2,653E-03	1,492
37,5	0,0125	0,0008	8,502E-04	3,504E-03	1,020
40	0,0133	0,0008	3,484E-04	3,852E-03	0,418

Tabla 14.5: Fem para generador en vacío p estator=p rotor y n=500rpm. Con lata permeabilidad del aire.

grados rotados geométricos	tiempo (s)	$\Delta t$ (s)	$\Delta\Phi$ (Wb)	fluke linkage (Wb)	femm (V)
30	0,0017			1,258E-06	
32,5	0,0018	0,0001	1,409E-03	1,410E-03	10,144
35	0,0019	0,0001	1,243E-03	2,653E-03	8,952
37,5	0,0021	0,0001	8,502E-04	3,504E-03	6,121
40	0,0022	0,0001	3,484E-04	3,852E-03	2,508

Tabla 14.6: Fem para generador en vacío p estator=p rotor y n=3000rpm. Con lata permeabilidad del aire.

Incorporamos las figuras de máximo Fem para ambos casos analizados.

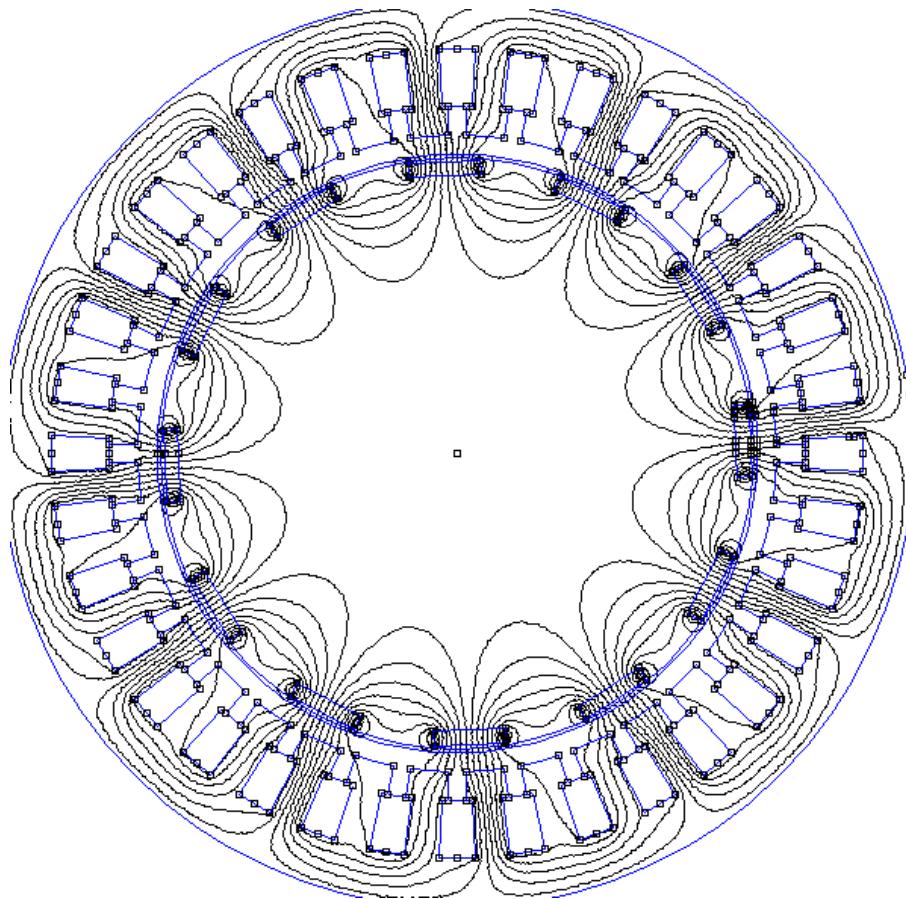


Figura 14.15: Líneas de campo magnético cuando el rotor ha girado  $32.5^\circ$  geométricamente respecto la posición inicial y  $\mu_{\text{rotor}} = \mu_{\text{estator}}$ . Momento en que  $\text{Femm}$  en máxima. Lata con permeabilidad igual que el aire.

Una vez analizado las tablas 14.5 y 14.6 observamos que la fem máxima aparece cuando el rotor a girado  $32.5^\circ$  geométricos. Estos datos son valores de tensión de fase por tanto hay que convertirlos a valores de línea para compararlos con la Fem experimental.

	Fem línea experimental (V)	Fem línea simulador(V)
500rpm	1	2.92
3000rpm	6.8	10.14

Tabla 14.7: Comparación de fem experimental y la obtenida por el simulador Femm con la lata permeabilidad aire.

Como nuestro modelo en Fem es tan perfecto y nuestro prototipo es muy rustico deducimos que puedan existir diferencias en los resultados.

## 14.2 GENERADOR $p_{\text{estator}} \neq p_{\text{rotor}}$

### 14.2.1 Ensayos y estudio metrológico

A tener en cuenta que las formas de ondas están realizadas con la sonda del osciloscopio atenuada por 10. Por tanto, para obtener la medida real hay que multiplicar por 10 los valores que necesitemos conocer de la figuras 14.16, 14.17 y 14.18.

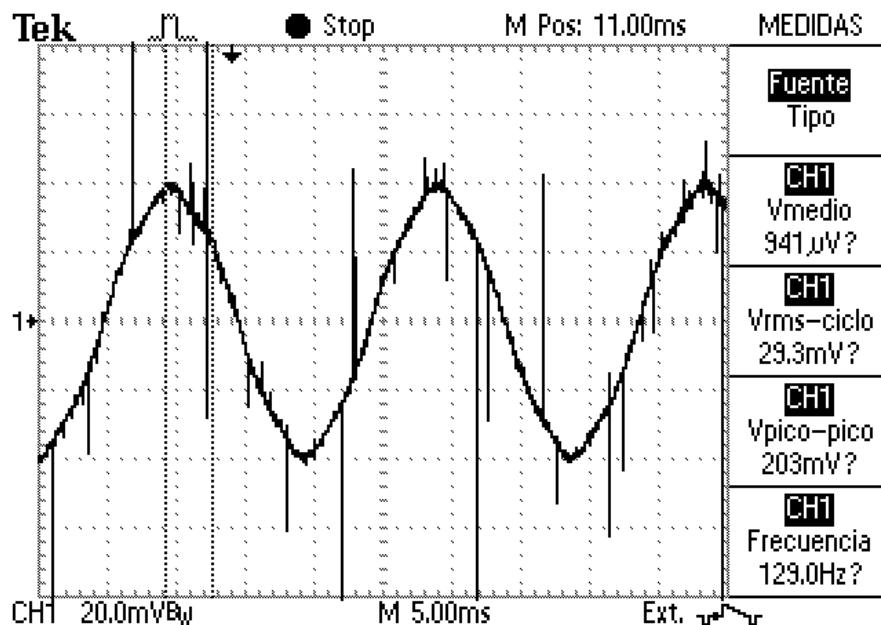


Figura 14.16: Fem inducida en vacío: Generador  $p=2$  y  $n=500\text{rpm}$

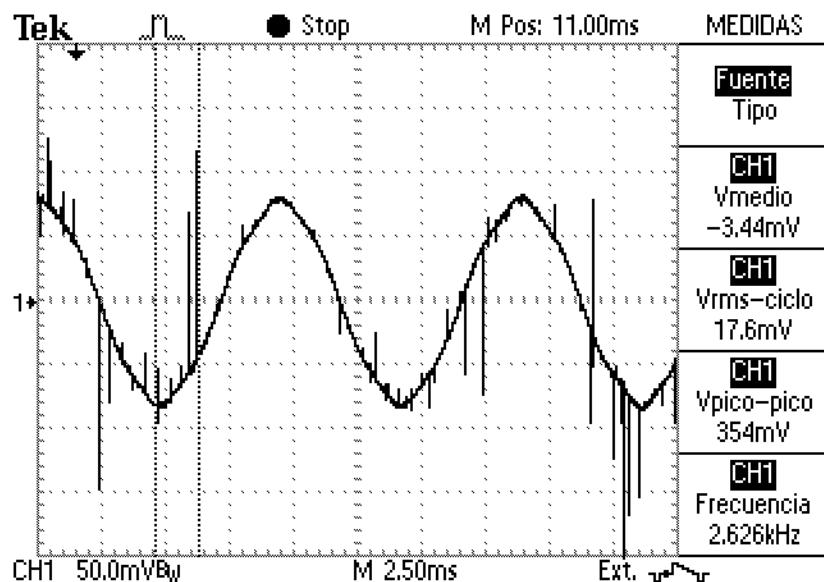


Figura 14.17: Fem inducida en vacío: Generador  $p=2$  y  $n=1000\text{rpm}$

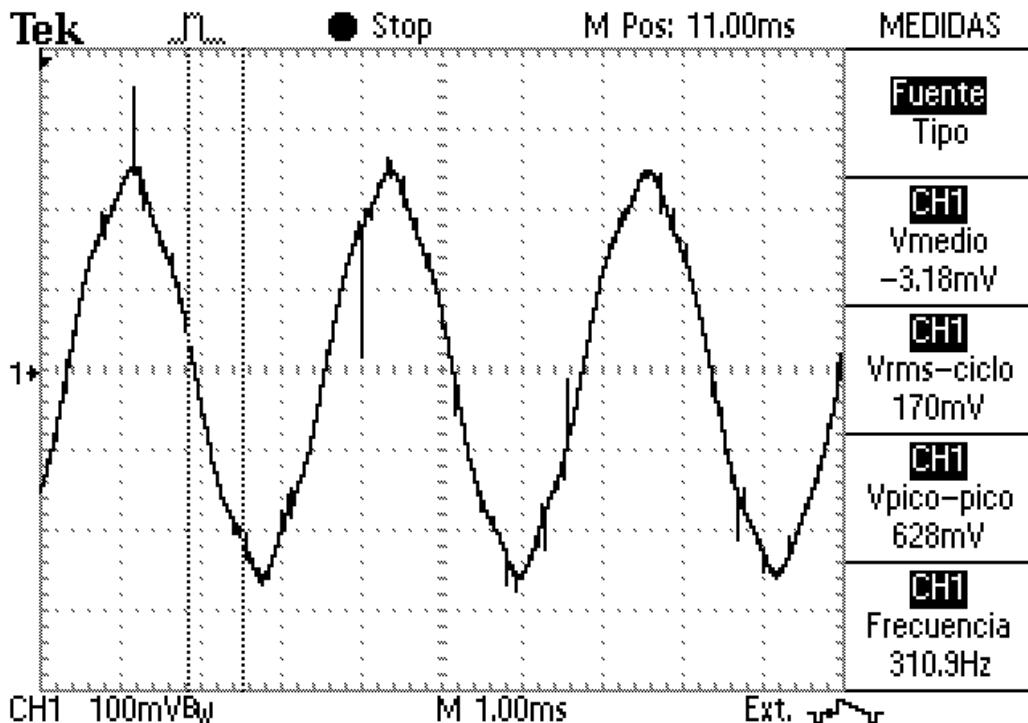


Figura 14.18: Fem inducida en vacío: Generador  $p=2$  y  $n=3000\text{rpm}$

#### 14.2.1.1 Conclusiones estudio metrológico

Teniendo en cuenta una de las fórmulas principales en las máquinas eléctricas expresadas anteriormente con la numeración 9.3.9 cabe destacar que cuando trabaje como generador esperamos que se cumpla la siguiente fórmula 14.2:

$p$ rotor	$n(\text{rpm})$	$f$ calculada formula 10,2 (Hz)	$f$ experimental (Hz)
2	500	16,67	50
	1000	33,33	100
	3000	100,00	333,33

Tabla 14.8: Comparación de frecuencia calculada con fórmula 14.2 y experimental  $p$  estator  $\neq p$  rotor.

Primero de todo explicamos que la frecuencia experimental no la obtenido directamente de las imágenes del apartado 14.2.1, ya que al poseer picos de tensión, el osciloscopio proporciona una lectura errónea de la frecuencia, por tanto la frecuencia experimental se calcula sabiendo cuánto vale cada división del eje x y multiplicándolo por los cuadrados que ocupa un ciclo de la Fem.

La primera y llamativa observación en la tabla 14.5 se produce al comparar los valores de frecuencia experimental con la calculada por la fórmula 14.2., ya que no coinciden ni

se aproximan. Por tanto alguna hipótesis inicial o los casos experimentales están razonados incorrectamente.

Se vuelven a repetir la parte experimental, apartado 14.2.2, con los mismos resultados; por tanto se desecha que en estos casos este el error.

Entonces desecharmos la hipótesis de la fórmula 10.2 y calculamos otra vez la frecuencia pero con la siguiente fórmula 11.1:

$$n = \frac{60*f}{p_{estator}} \quad (14.3)$$

En este caso se obtiene la tabla 14.6:

<b>p estator</b>	<b>n(rpm)</b>	<b>f calculada formula 11.1 (Hz)</b>	<b>f experimental (Hz)</b>
6	500	50,00	50
	1000	100,00	100
	3000	300,00	333,33

Tabla 14.6: Comparación de frecuencia calculada con formula 14.3 y experimental  
 $p_{estator} \neq p_{rotor}$

La primera conclusión importante que observamos es que la frecuencia la impone siempre el estator de la máquina, si trabaja como generador, dando por errónea la fórmula 14.2 que esperábamos utilizar y dando como correcta la fórmula 14.3.

#### 14.2.2 Análisis por femm

Se realiza las simulaciones como se ha explicado en el apartado 14.1.2 teniendo en consideración las conclusiones en el apartado de 14.2.1.1

Voy a analizar dos casos:

- Análisis mediante Femm:  $p_{estator} \neq p_{rotor} = 6$  y  $n=500\text{rpm}$ .
- Análisis mediante Femm:  $p_{estator} \neq p_{rotor} = 6$  y  $n=3000\text{rpm}$ .

#### 14.2.2.1 Análisis mediante femm: $p$ estator $\neq$ p rotor y $n=500$ rpm.

Siguiendo el procedimiento explicado en el apartado 14.1.2 para solo una fase y para distintos instantes a lo largo del giro del rotor obtenemos los siguientes resultados:

grados rotados geométricos	tiempo (s)	$\Delta t$ (s)	$\Delta\Phi$ (Wb)	fluke linkage (Wb)	femm (V)
0				-1,201E-07	
5	0,0017	0,0017	-9,145E-05	-9,157E-05	-0,055
10	0,0033	0,0017	-5,863E-05	-1,502E-04	-0,035
15	0,0050	0,0017	-1,611E-05	-1,663E-04	-0,010
20	0,0067	0,0017	1,679E-05	-1,495E-04	0,010
25	0,0083	0,0017	5,970E-05	-8,982E-05	0,036
30	0,0100	0,0017	8,990E-05	7,366E-08	0,054
35	0,0117	0,0017	9,107E-05	9,114E-05	0,055
40	0,0133	0,0017	5,930E-05	1,504E-04	0,036
45	0,0150	0,0017	1,580E-05	1,662E-04	0,009
50	0,0167	0,0017	-1,585E-05	1,504E-04	-0,010
55	0,0183	0,0017	-5,933E-05	9,105E-05	-0,036
60	0,0200	0,0017	-9,113E-05	-7,492E-08	-0,055

Tabla 14.8: Fem para generador en vacío  $p$  estator $\neq$ p rotor y  $n=500$ rpm.

Como se puede observar en la tabla 14.1 los datos se repiten cada 60 grados rotado el rotor, es decir los grados eléctricos para esta máquina son de 60. O como es lo mismo, su frecuencia es 50Hz es decir cada 0.02s deberá pasar un ciclo.

Para observar visualmente la variación de Fem como generador en vacío la representamos en la figura 14.3:

**Femm (V):  $p$  estator =6 y  $p$  rotor=2;  
 $f=50$  Hz**

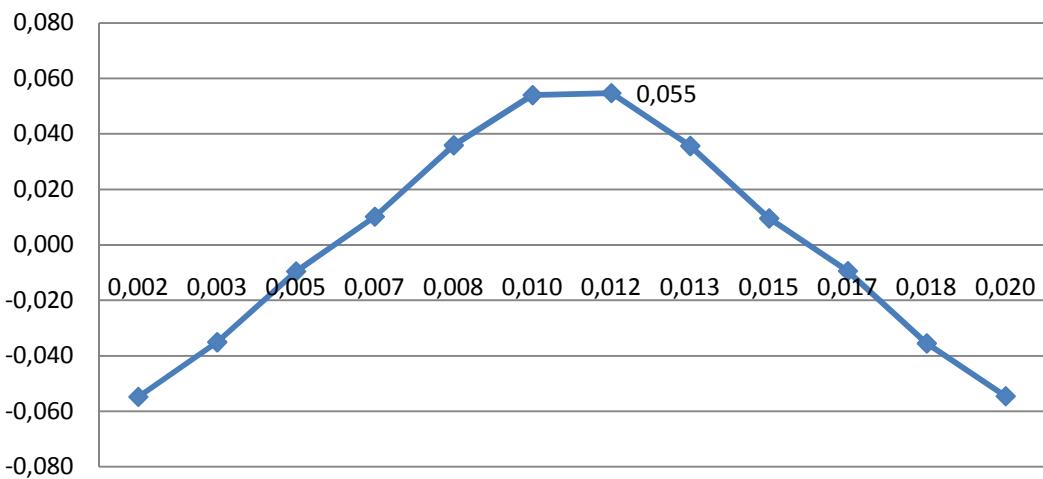


Figura 14.19: Fem para generador en vacío  $p$  rotor  $\neq$   $p$  estator y  $n=500$  rpm

**14.2.2.2 Análisis mediante femm:  $p$  estator  $\neq$   $p$  rotor y  $n=3000$  rpm.**

Se procede a simular del mismo modo que se ha explicado en el apartado 14.1.2

En este caso lo que cambia respecto al apartado 14.2.2.1 es la velocidad de giro, en este caso es  $n=3000$  rpm. Por tanto su nueva frecuencia será de 300Hz y el tiempo al depender de dicha frecuencia variara.

grados rotados geométricos	tiempo (s)	$\Delta t$ (s)	$\Delta\Phi$ (Wb)	fluke linkage (Wb)	femm (V)
0				-1,201E-07	
5	0,0003	0,0003	-9,145E-05	-9,157E-05	-0,329
10	0,0006	0,0003	-5,863E-05	-1,502E-04	-0,211
15	0,0008	0,0003	-1,611E-05	-1,663E-04	-0,058
20	0,0011	0,0003	1,679E-05	-1,495E-04	0,060
25	0,0014	0,0003	5,970E-05	-8,982E-05	0,215
30	0,0017	0,0003	8,990E-05	7,366E-08	0,324
35	0,0019	0,0003	9,107E-05	9,114E-05	0,328
40	0,0022	0,0003	5,930E-05	1,504E-04	0,213
45	0,0025	0,0003	1,580E-05	1,662E-04	0,057
50	0,0028	0,0003	-1,585E-05	1,504E-04	-0,057
55	0,0031	0,0003	-5,933E-05	9,105E-05	-0,214
60	0,0033	0,0003	-9,113E-05	-7,492E-08	-0,328

Tabla 14.8: Fem para generador en vacío  $p$  estator  $\neq$   $p$  rotor y  $n=3000$  rpm.

Visualizamos los datos en la figura 14.10 para observar la forma de la Fem.

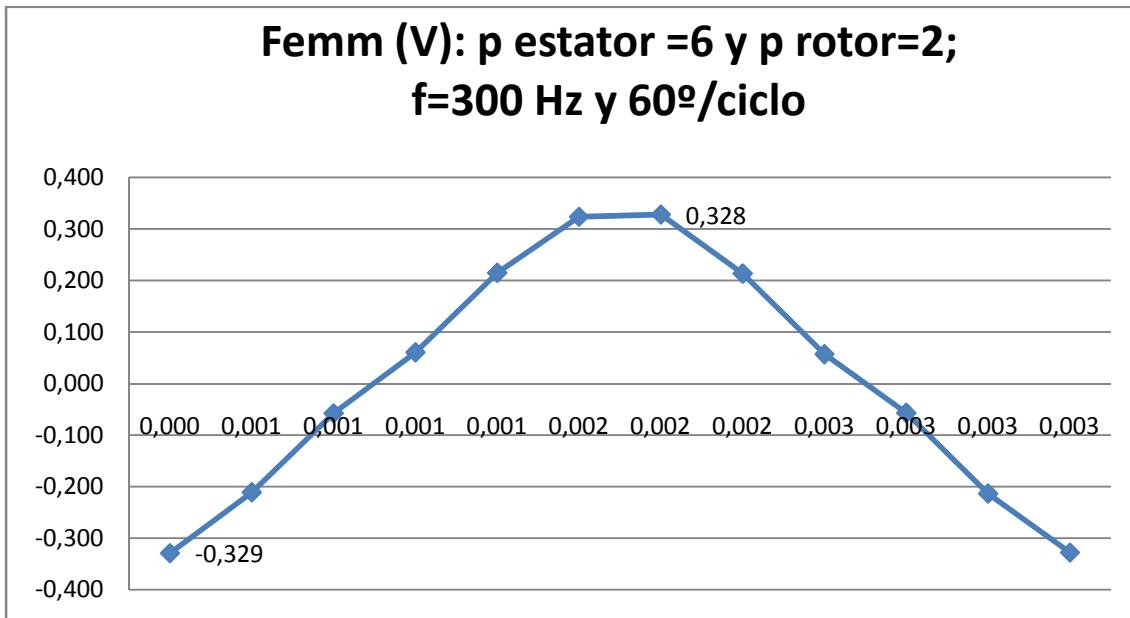


Figura 14.20: Fem para generador en vacío  $p$  rotor  $\neq$   $p$  estator y  $n=500\text{rpm}$

#### 14.2.2.3 Conclusiones simulación femm

Debido a las conclusiones del apartado 12.3 y 14.1.3. Voy a reinterpretar estos datos para una situación idónea.

Por tanto se decide simular cuando el rotor está en su posición de máxima Fem, es decir cuando el rotor a girado 35 grados, e incrementar en 2.5 grados el rotor en sus inmediaciones e incorporando a la lata la permeabilidad del aire para aproximarla a la realidad de nuestro prototipo. Los datos obtenidos en estas aproximaciones se observan en la tabla 14.5

grados rotados geométricos	tiempo (s)	$\Delta t$ (s)	$\Delta\Phi$ (Wb)	fluke linkage (Wb)	femm (V)
30	0,0100			6,384E-09	
32,5	0,0108	0,0008	4,766E-04	4,766E-04	0,572
35	0,0117	0,0008	4,080E-04	8,847E-04	0,490
37,5	0,0125	0,0008	2,852E-04	1,170E-03	0,342
40	0,0133	0,0008	1,165E-04	1,286E-03	0,140

Tabla 14.9: Fem para generador en vacío  $p$  estator  $\neq$   $p$  rotor y  $n=500\text{rpm}$ . Con lata permeabilidad del aire

grados rotados geométricos	tiempo (s)	$\Delta t$ (s)	$\Delta\Phi$ (Wb)	fluke linkage (Wb)	femm (V)
30	0,0017			6,384E-09	
32,5	0,0018	0,0001	4,766E-04	4,766E-04	3,432
35	0,0019	0,0001	4,080E-04	8,847E-04	2,938
37,5	0,0021	0,0001	2,852E-04	1,170E-03	2,054
40	0,0022	0,0001	1,165E-04	1,286E-03	0,839

Tabla 14.10: Fem para generador en vacío p estator ≠ p rotor y  $n=3000\text{rpm}$ . Con lata permeabilidad del aire.

Incorporamos las figuras de máximo Fem para ambos casos analizados.

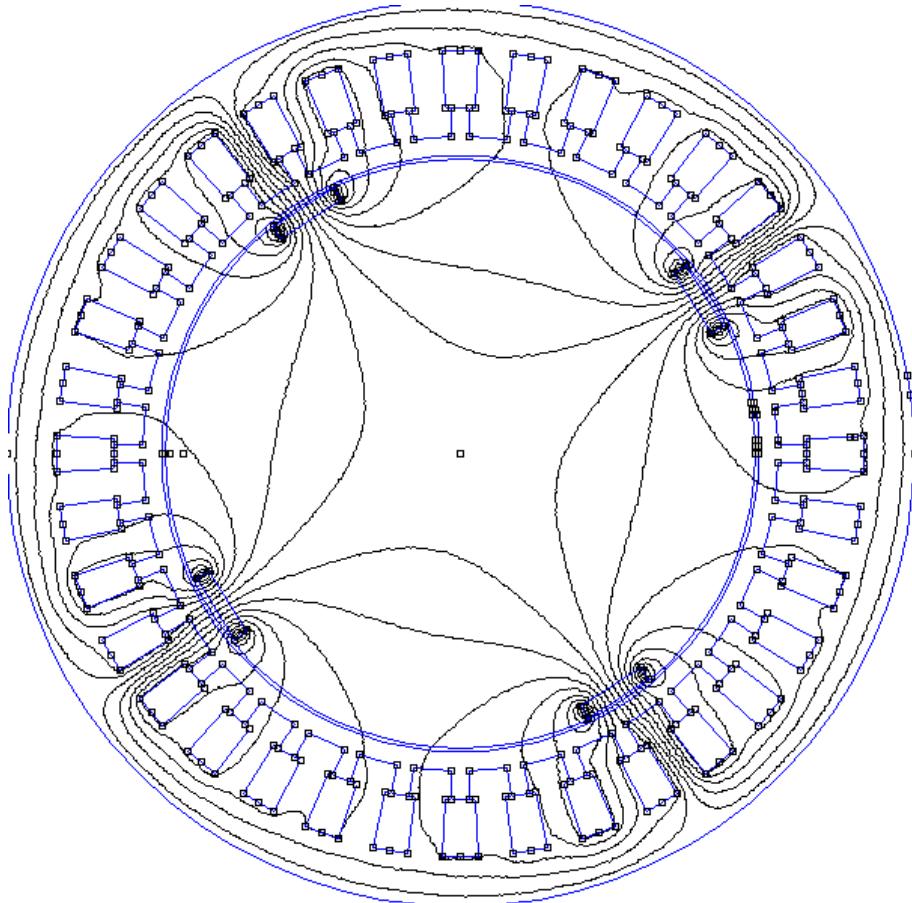


Figura 14.21: Líneas de campo magnético cuando el rotor ha girado  $32.5^\circ$  geométricamente respecto la posición inicial y  $p_{\text{rotor}} \neq p_{\text{estator}}$ . Momento en que Femm en máxima. Lata con permeabilidad igual que el aire.

Una vez analizado las tablas 14.9 y 14.10 observamos que la fem máxima se observa cuando el rotor a girado 32.5º geométricos. Estos datos son valores de tensión de fase por tanto hay que convertirlos a valores de línea para compararlos con la Fem experimental.

	Fem línea experimental (V)	Fem línea simulador(V)
<b>500rpm</b>	0.4	0.99
<b>3000rpm</b>	2.5	5.94

*Tabla 14.11: Comparación de fem experimental y la obtenida por el simulador Femm con la lata permeabilidad aire.*

Como nuestro modelo en Fem es tan perfecto y nuestro prototipo es muy rustico deducimos que puedan existir diferencias en los resultados.

## 15 ENSAYO EN VACIO: MOTOR SINCRONO

Como se ha explicado en el apartado 10, al ser un motor síncrono necesita para arrancar un motor auxiliar o un pequeño par que haga que el rotor gire y se sincronice con el campo magnético giratorio del devanado estatórico. Para ello en algún caso empleamos la ayuda del motor de arrastre, solo hasta la sincronización, y en otros casos con la simple ayuda de un pequeño empujón con la mano.

Empleando la fórmula 10.1 y conociendo que los polos del estator es una dato fijo ( $p_{\text{estator}}=6$ ), tenemos que la velocidad en todos los casos será de  $n=500\text{rpm}$ .

## 15.1 MOTOR $p_{\text{estator}}=p_{\text{rotor}}$ ; $n=500\text{rpm}$

### 15.1.1 Ensayos y estudio metrológico

A tener en cuenta que el canal 1 siempre se visualizará la corriente de línea y en el canal 2 la tensión de línea. Sin sonda atenuada.

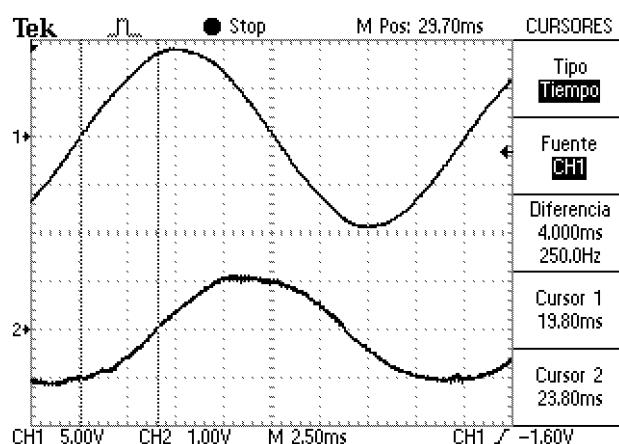


Figura 15.1: Formas de onda motor síncrono en vacío  $p=6$  y  $500\text{rpm}$

Observando la gráfica podemos analizar que la frecuencia es 50Hz ya que en un ciclo corresponde a 0.02 segundos, por tanto esto implica que la velocidad de giro es de 500rpm utilizando la fórmula 10.1 para obtener dicho resultado.

### 15.1.2 Análisis por Femm

En este caso observamos el par en vacío conocido como "cogging torque" y el par existente. Es importante conocer el par ya que este es un parámetro básico en el funcionamiento como motor.

El par de vacío se calcula con la opción del postprocesador de femm "torque via weighted stress tensor", previamente seleccionando el rotor o el estator en el postprocesador. Además los resultados los compararemos con la energía del sistema. Esta energía se obtiene mediante la opción "magnetic field energy", previamente seleccionando todo el sistema.

Las corrientes serán trifásicas y desfasadas 120º como se explico en la figura 3.5. A continuación se procede a analizar el motor a lo largo de un periodo, fijando una serie de instantes en distintos momentos el sistema, por lo tanto tendremos que calcular las intensidades en esos instantes e imponerlas en el programa. Por otro lado esto implica que el rotor también habrá girado y estará en una posición diferente a la inicial, que también habrá que tener en cuenta.

Para comenzar de una forma simple e ir aproximándonos a lo que buscamos empezamos a analizar el rotor en un ciclo de la intensidad. Debido a su velocidad,  $n=500 \text{ rpm}$ , pasa 3 veces por posición inicial. Además al poseer simetría el rotor podemos obtener con un solo dibujo 6 instantes en el ciclo de la intensidad.

En la tabla 12.2.1 se puede observar los 12 instantes y el dato para cada instante de las intensidades trifásicas.

grados rotados geométricamente	tiempo (s)	i1 (A)	i2 (A)	i3 (A)
0	0,0000	7,00	-3,50	-3,50
15	0,0050	6,76	-4,95	-1,81
30	0,0100	6,06	-6,06	0,00
45	0,0150	4,95	-6,76	1,81
60	0,0200	3,50	-7,00	3,50
75	0,0250	1,81	-6,76	4,95
90	0,0300	0,00	-6,06	6,06
105	0,0350	-1,81	-4,95	6,76
120	0,0400	-3,50	-3,50	7,00
135	0,0450	-4,95	-1,81	6,76
150	0,0500	-6,06	0,00	6,06
165	0,0550	-6,76	1,81	4,95
180	0,0600	-7,00	3,50	3,50
195	0,0650	-6,76	4,95	1,81
210	0,0700	-6,06	6,06	0,00
225	0,0750	-4,95	6,76	-1,81
240	0,0800	-3,50	7,00	-3,50
255	0,0850	-1,81	6,76	-4,95
270	0,0900	0,00	6,06	-6,06
285	0,0950	1,81	4,95	-6,76
300	0,1000	3,50	3,50	-7,00
315	0,1050	4,95	1,81	-6,76
330	0,1100	6,06	0,00	-6,06
345	0,1150	6,76	-1,81	-4,95
360	0,1200	7,00	-3,50	-3,50

Tabla 15.1: Datos para introducir en el simulador Femm en el caso de motor en vacío

Con un solo dibujo en femm se puede simular distintos instantes con sus respectivas intensidades calculadas para cada momento y el resultado de energía mínima y par en vacío son los siguientes:

grados rotados geométricamente	tiempo (s)	i1 (A)	i2 (A)	i3 (A)	cogging torque (N*m)	Energía (Joules)
0	0,0000	7,00	-3,50	-3,50	-0,0253	2,5786
60	0,0200	3,50	-7,00	3,50	0,0019	2,5756
120	0,0400	-3,50	-3,50	7,00	0,0281	2,5785
180	0,0600	-7,00	3,50	3,50	0,0265	2,5785
240	0,0800	-3,50	7,00	-3,50	0,0132	2,5734
300	0,1000	3,50	3,50	-7,00	-0,0275	2,5786
360	0,1200	7,00	-3,50	-3,50	-0,0253	2,5786

Tabla 15.2: Datos obtenidos en el simulador, energía sistema y cogging torque, en el caso de motor en vacío, caso  $p$  rotor= $p$  estator=6

Los resultados están degradados en una escala de color en la cual el valor mínimo es de color rojo y el valor máximo de color amarillo.

Los resultados los representamos en una gráfica conjunta, figura 12.2.1, para que se observe su evolución:

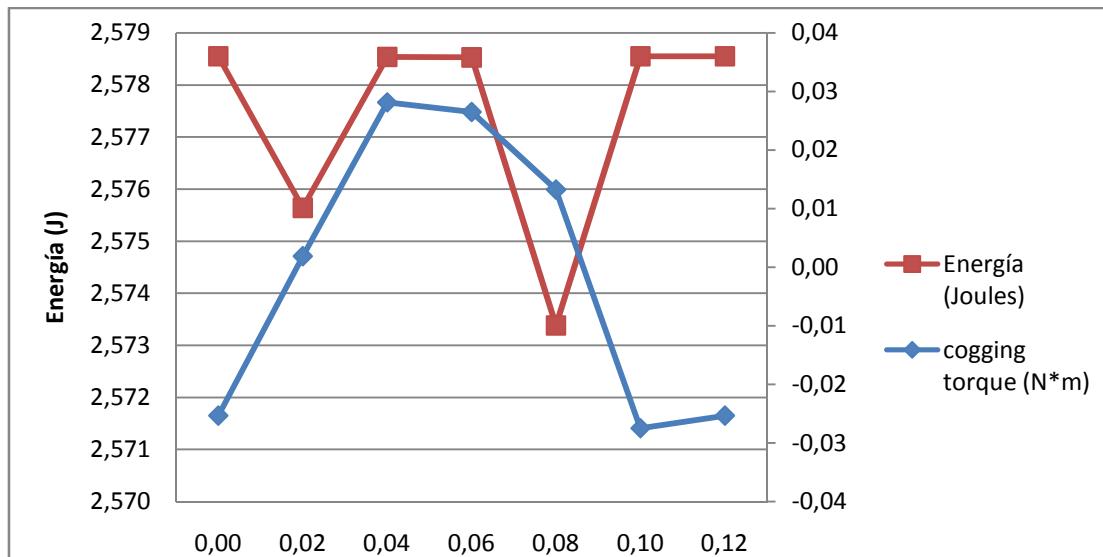


Figura 15.2: Representación gráfica de los datos obtenidos en el simulador en el caso de motor en vacío, energía sistema y cogging torque, caso  $p$  rotor= $p$  estator=6.

Analizando la figura 12.2.1 nos damos cuenta que tanto el par en vacío y la energía fluctúan. Para observar más detenidamente este comportamiento realizamos simulaciones en intervalos menores de tiempo, es decir cada 0.005 segundos.

grados rotados geométricamente	tiempo (s)	i1 (A)	i2 (A)	i3 (A)	cogging torque (N*m)	Energía (Joules)
0	0,0000	7,00	-3,50	-3,50	-0,0253	2,5786
15	0,0050	6,76	-4,95	-1,81	-0,0214	2,5775
30	0,0100	6,06	-6,06	0,00	0,0141	2,5766
45	0,0150	4,95	-6,76	1,81	0,0226	2,5766
60	0,0200	3,50	-7,00	3,50	0,0019	2,5756
75	0,0250	1,81	-6,76	4,95	-0,0055	2,5758
90	0,0300	0,00	-6,06	6,06	-0,0171	2,5766
105	0,0350	-1,81	-4,95	6,76	0,0009	2,5738
120	0,0400	-3,50	-3,50	7,00	0,0281	2,5785
135	0,0450	-4,95	-1,81	6,76	0,0147	2,5791
150	0,0500	-6,06	0,00	6,06	-0,0304	2,5795
165	0,0550	-6,76	1,81	4,95	-0,0166	2,5755
180	0,0600	-7,00	3,50	3,50	0,0265	2,5785
195	0,0650	-6,76	4,95	1,81	0,0209	2,5775
210	0,0700	-6,06	6,06	0,00	-0,0136	2,5766
225	0,0750	-4,95	6,76	-1,81	-0,0167	2,5722
240	0,0800	-3,50	7,00	-3,50	0,0132	2,5734
255	0,0850	-1,81	6,76	-4,95	0,0059	2,5758
270	0,0900	0,00	6,06	-6,06	0,0171	2,5766
285	0,0950	1,81	4,95	-6,76	-0,0005	2,5739
300	0,1000	3,50	3,50	-7,00	-0,0275	2,5786
315	0,1050	4,95	1,81	-6,76	-0,0161	2,5791
330	0,1100	6,06	0,00	-6,06	0,0316	2,5795
345	0,1150	6,76	-1,81	-4,95	0,0159	2,5755
360	0,1200	7,00	-3,50	-3,50	-0,0253	2,5786

Tabla 15.3: Datos obtenidos, energía sistema y cogging torque, en el simulador cada 15 ° girados geométricamente el rotor, caso  $p$  rotor= $p$  estator=6

Lo represento en una gráfica, figura 15.3, para ver visualmente cómo evolucionan la energía mínima del sistema y el par en vacío.

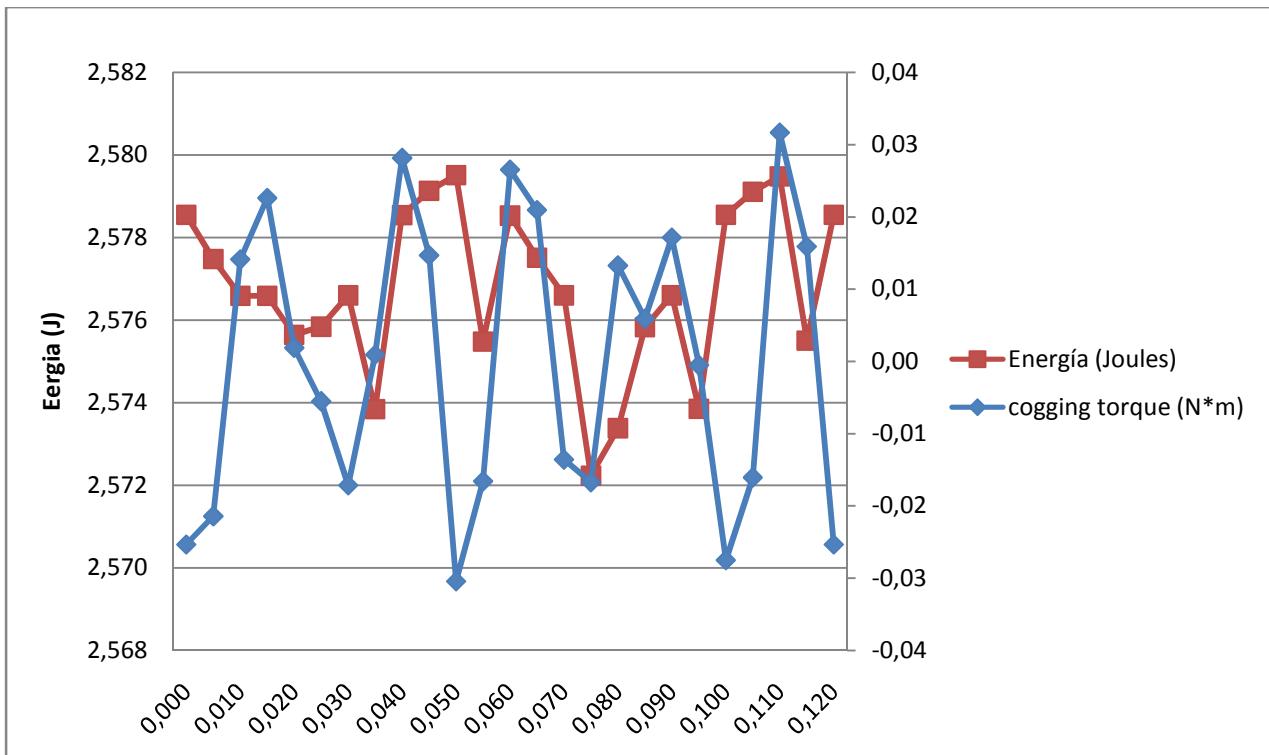


Figura 15.3: Representación gráfica de los datos obtenidos en el simulador en el caso de motor en vacío en las proximidades de energía mínima, caso  $p$  rotor= $p$  estator=6.

Observamos que el par en vacío y la energía fluctúa y se irá repitiendo esta secuencia a lo largo del tiempo. Extrapolando datos observamos los valores máximos y mínimos en la tabla 15.4.

cogging torque (N*m)		Energía (Joules)
Máximo	0,0316	2,5795
Mínimo	-0,0304	2,5722

Tabla 15.4: Valores máximos y mínimos obtenidos para energía sistema y cogging torque, caso  $p$  rotor= $p$  estator=6

Teniendo en cuenta el artículo "Steady State Performance Evaluation of a Permanent Magnet Synchronous Motor Based on FEA", ya que nos interesa las explicaciones para obtener el par electromagnético máximo en una máquina de dimensiones similares a la nuestra:

Par = 12N/m

Intensidad = 15A

Diámetro máquina =145 mm

Longitud = 30 cm

Peso = 14kg

Desfase entre estator y rotor = 39 grados

Par máximo nominal se produce a los 39 grados

Relatan que existe par en un sistema cuando hay un determinado desfase entre el campo magnético del estator y el del rotor. Este se puede calcular conociendo los incrementos de coenergía y dividiendo estos, por el incremento de rotación del rotor, en radianes. Para calcular la coenergía hay que fijar las corrientes en un determinado instante e ir rotando el rotor. Su representación gráfica es en forma de campana de gauss donde el eje X es el desfase y el eje Y el par.

La coenergía se puede calcular en el post-procesador de femm a través de la opción "magnetic field coenergy".

Realicé varias simulaciones en diversos instantes para observar cómo se comparte nuestro par electromagnético en nuestra máquina.

grados rotados geométricamente	magnetic field coenergy (J)	eletromagnetic torque (N*m)
-20	1,1531	
-15	1,1552	0,0244
-10	1,1566	0,0157
-5	1,1563	-0,0028
0	1,1548	-0,0180
5	1,1524	-0,0274
10	1,1495	-0,0330
15	1,1473	-0,0257
20	1,1513	0,0466
25	1,1459	-0,0619
30	1,1477	0,0198
35	1,1509	0,0372
40	1,1531	0,0249
45	1,1594	0,0730

Tabla 15.5: Datos obtenido, coenergía del sistema y par electromagnético, en el simulador cada 5º girados geométricamente el rotor para  $p=6$ .

Lo representamos en una en una gráfica, figura 15.4, y observamos como varia el par electromagnético.

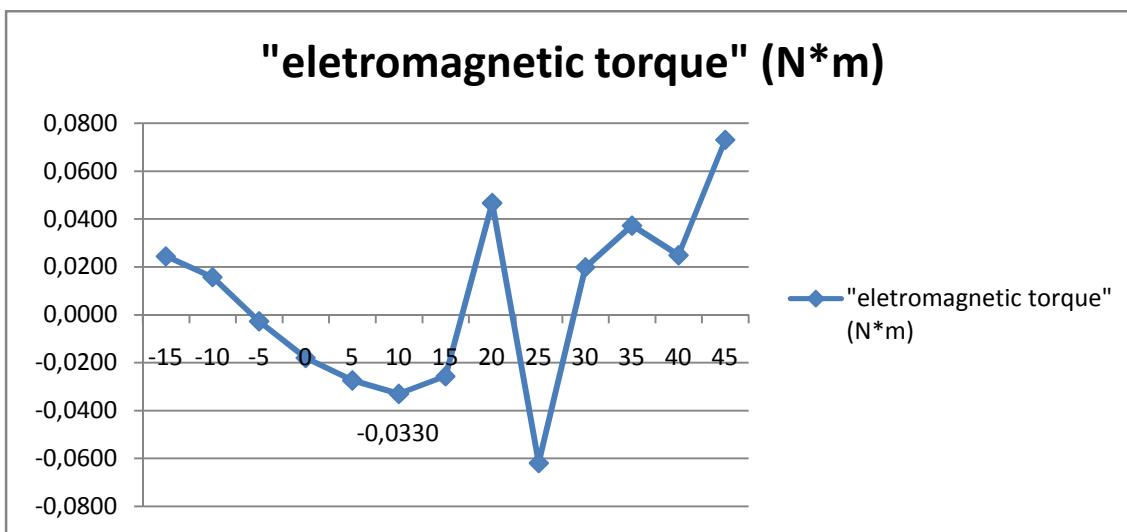


Figura 15.4: Representación gráfica: par electromagnético, caso  $p$  rotor= $p$  estator=6.

Observando la figura 15.4 hay una parte que se parece a una campana de gauss invertida, desde -5º grados a 15º. Por tanto suponemos que el valor máximo de par en este caso es de 0.033 N\*m en valor absoluto.

Este valor es pequeño debido a que el material de la lata en el modelo de femm es supermalloy, como hemos explicado en un anterior apartado 12.3.

## 15.2 MOTOR $p_{\text{estator}} \neq p_{\text{rotor}}$ ; $n=500\text{rpm}$

### 15.2.1 Ensayos y estudio metrológico

A tener en cuenta que el canal 1 siempre se visualizará la tensión de línea y en el canal 2 la intensidad de línea. Sin la sonda atenuada.

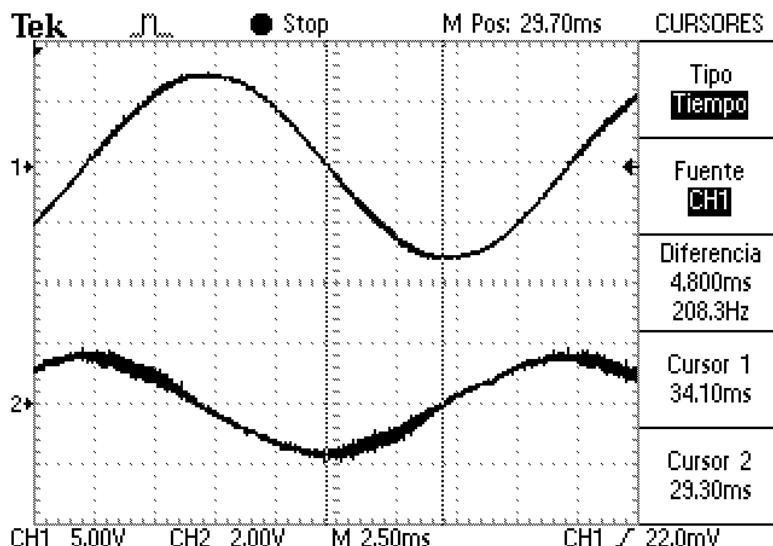


Figura 15.5: Formas de onda motor síncrono en vacío  $p=2$  y  $500\text{rpm}$

Observando la gráfica podemos analizar que la frecuencia es 50Hz ya que en un ciclo corresponde a 0.02 segundos, por tanto esto implica que la velocidad de giro es de 500rpm utilizando la fórmula 10.1 para obtener dicho resultado.

### 15.2.2 Análisis por Femm

Se analiza como se ha explicado en el apartado 15.1.2.

Las intensidades impuestas para realizar las simulaciones y obtener el par en vacío y la energía son las mismas que se observan en la tabla 15.1, para este caso concreto.

Una vez realizad varias simulaciones obtenemos los siguientes datos:

grados rotados geométricamente	tiempo (s)	i1 (A)	i2 (A)	i3 (A)	cogging torque (N*m)	Energía (Joules)
0	0,0000	7,00	-3,50	-3,50	-0,0073	0,8938
15	0,0050	6,76	-4,95	-1,81	-0,0064	0,8928
30	0,0100	6,06	-6,06	0,00	0,0043	0,8908
45	0,0150	4,95	-6,76	1,81	0,0047	0,8909
60	0,0200	3,50	-7,00	3,50	0,0003	0,8931
75	0,0250	1,81	-6,76	4,95	-0,0015	0,8933
90	0,0300	0,00	-6,06	6,06	-0,0049	0,8918
105	0,0350	-1,81	-4,95	6,76	-0,0018	0,8927
120	0,0400	-3,50	-3,50	7,00	0,0083	0,8928
135	0,0450	-4,95	-1,81	6,76	0,0038	0,8943
150	0,0500	-6,06	0,00	6,06	-0,0085	0,8971
165	0,0550	-6,76	1,81	4,95	-0,0066	0,8968

Tabla 15.5: Datos obtenidos, energía sistema y cogging torque, en el simulador cada 15 ° girados geométricamente el rotor, caso  $p$  rotor  $\neq$   $p$  estator.

Su representación gráfica se observa en la figura 15.6.

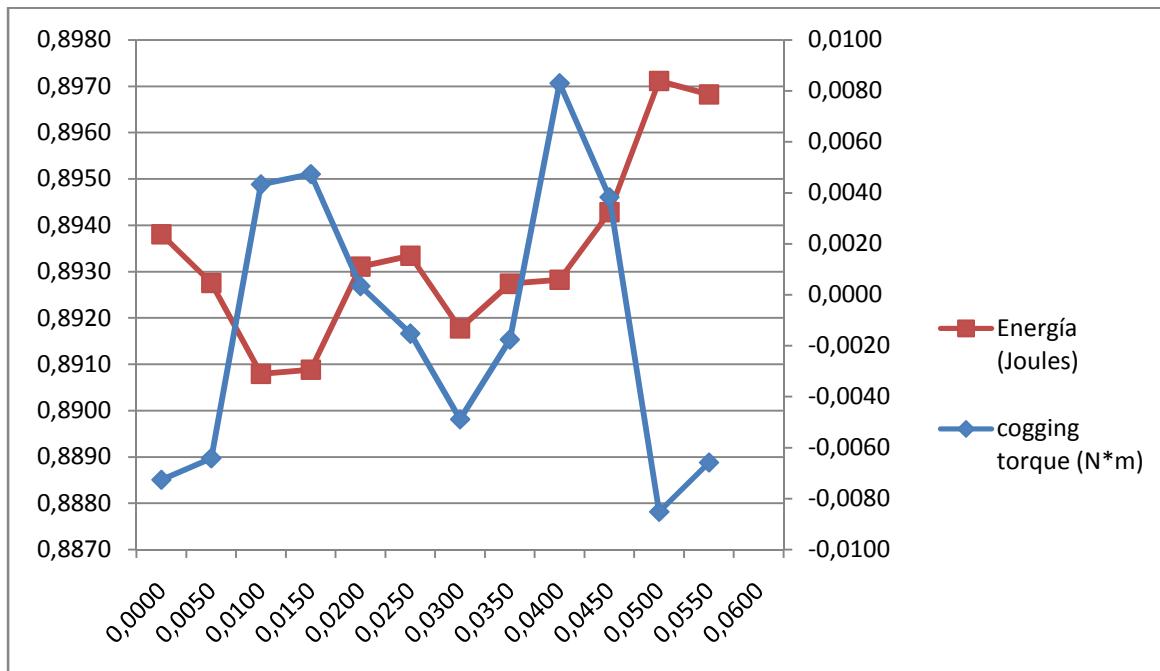


Figura 15.6: Representación gráfica de los datos obtenidos en el simulador en el caso de motor en vacío en las proximidades de energía mínima, caso  $p$  rotor  $\neq$   $p$  estator.

Analizando la figura 15.6 y comparándola con el caso de  $p$  estator= $p$  rotor, la energía del sistema y el par de vacío a descendido 3 veces con respecto al otro caso. Además se observa que la evolución de la energía y el par de vacío respecto al tiempo es similar al caso  $p$  estator= $p$  rotor.

Observamos que el par en vacío y la energía fluctúa. Extrapolando datos observamos los valores máximos y mínimos en la tabla 15.6.

		cogging torque (N*m)	Energía (Joules)
	Máximo	0,0083	0,8971
	Mínimo	-0,0085	0,8908

Tabla 15.6: Valores máximos y mínimos obtenidos para energía sistema y cogging torque, caso  $p$  rotor  $\neq$   $p$  estator.

A continuación calculamos el par electromagnético como lo hemos explicado en el apartado 15.1.2. Y se obtiene la siguiente tabla 15.8.

grados rotados geométricamente	magnetic field coenergy (J)	"electromagnetic torque" (N*m)
-20	0,3623	
-15	0,3629	0,0064
-10	0,3633	0,0044
-5	0,3632	-0,0015
0	0,3651	0,0225
5	0,3646	-0,0054
10	0,3635	-0,0127
15	0,3630	-0,0065
20	0,3626	-0,0045
25	0,3626	0,0007
30	0,3640	0,0163

Tabla 15.7: Datos obtenido, coenergía del sistema y par electromagnético, en el simulador cada 5 ° girados geométricamente el rotor, caso  $p$  rotor  $\neq$   $p$  estator.

Lo representamos en una en una gráfica, figura 15.4, y observamos que varia el par electromagnético.

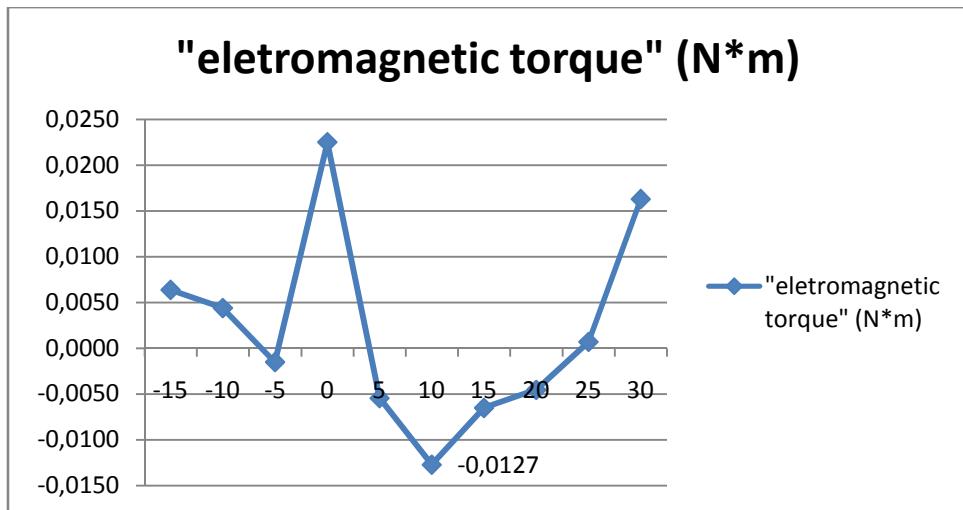


Figura 15.4: Representación gráfica: par electromagnético, caso  $p$  rotor  $\neq$   $p$  estator.

Observando la figura 15.4 hay una parte que se parece a una campana de gauss invertida, desde 5º grados a 25º. Por tanto suponemos que el valor máximo de par en este caso es de 0.0127 N\*m en valor absoluto.

Este valor es pequeño debido a que el material de la lata en la simulación es supermalloy, como hemos explicado en un anterior apartado 12.3.

### 15.3 CONCLUSIONES

Los datos obtenidos en los apartados 15.1.2 y 15.2.2 no son los esperado en la realidad para nuestra máquina. Debido al error de colocar un material equivocado en la lata en el modelo de femm.

Por tanto se decide simular variando la permeabilidad de la lata para  $p$  rotor=6 y observar los resultados de par de vacío que se obtiene:

grados rotados geométricamente	cogging torque (N*m)
0	-0.22
15	-0.17

Tabla 15.8: Datos obtenido par en vacío, en el simulador cada 5º girados  
geométricamente el rotor, caso  $p$  rotor =  $p$  estator.

Comparándolo con la tabla 15.3 estos resultados son bastante superiores. Lógico, ya en la parte experimental observamos que la lata gira, aunque posee más par en el caso de  $p$  rotor  $\neq$   $p$  estator que en el caso  $p$  rotor =  $p$  estator. En cambio con los resultados obtenidos en los apartados 15.1.2 y 15.2.2, par pequeño, el rotor apenas giraría.

## 16 BIBLIOGRAFÍA

Reparación y bobinados de Motores Eléctricos Fernando Martínez Dominguez

Teoría y cálculo de los bobinados eléctricos. J. Rapp. Edición 9. Editorial Vagma.

Manual de automóviles. Arias Paz. Edición 49. Editorial Dossat.

Manual de motocicletas. Arias Paz. Edición 49. Editorial Dossat.

Apuntes de Máquinas II

Apuntes de Máquinas I

Cálculo industrial de máquinas eléctricas. J. Corrales Martín. Tomo II. Editorial Marcombo.

Artículo: "Steady State Performance Evaluation of a Permanent Magnet Synchronous Motor Based on FEA" Lidija Petkovska, Senior Member IEEE and Goga Cvetkovski, Member IEEE. 9º Congreso Hispano-Luso de Ingeniería Eléctrica (9CHLIE), Marbella, Spain , 2005