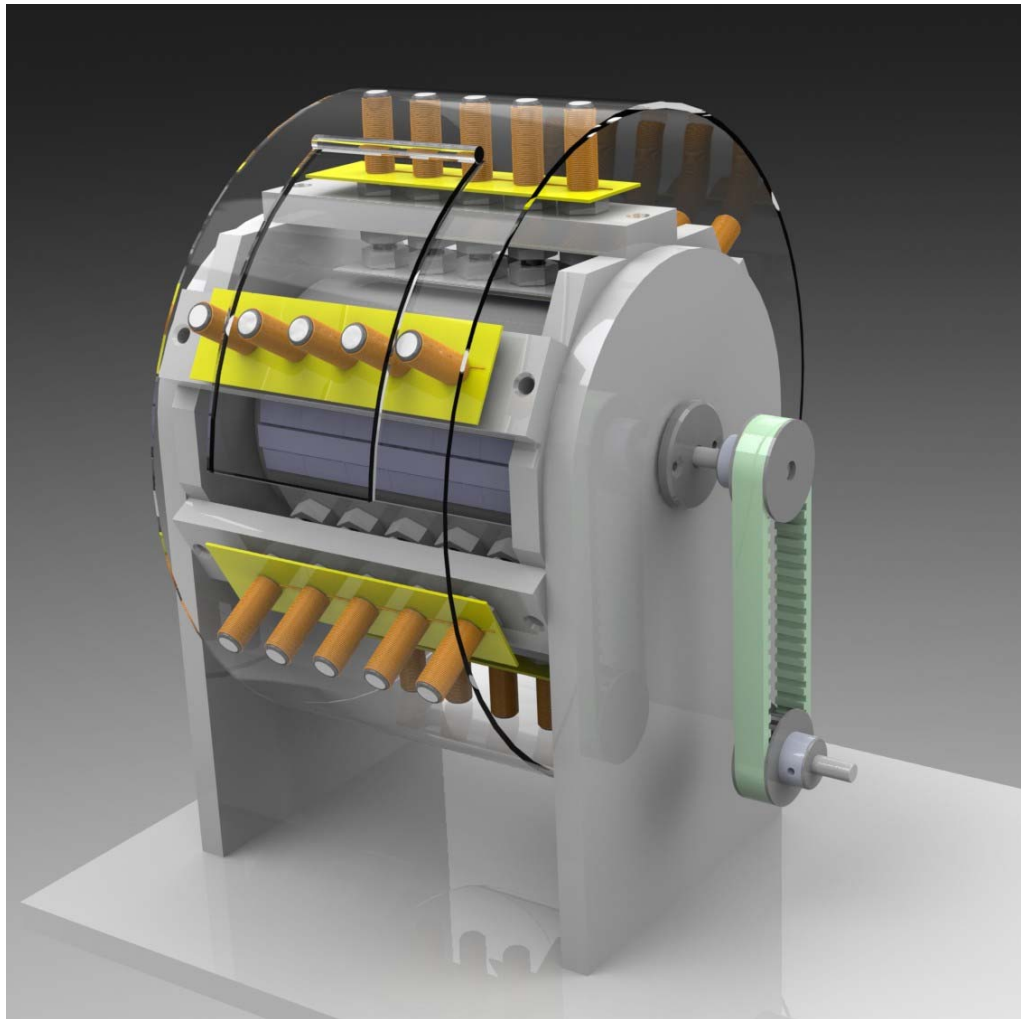


ALTERNADOR TRIFÁSICO DE IMANES DE TIERRAS RARAS CON FINALIDAD DOCENTE



Ingeniería Técnica Industrial, Electrónica Industrial

EINA

Director: Antonio Usón

Alumno: Aiman Fuertes El-Musa

INDICE

1. Antecedentes.....	3
1.1 Edemuz.....	3
1.2 Fases previas al proyecto actual.....	4
2. Objetivo del proyecto.....	5
2.1 Pares de polos.....	5
2.2 Forma sinusoidal de imanes.....	6
2.3 Sustituir piezas defectuosas.....	7
2.4 Eficiencia en polea.....	9
2.5 Representación gráfica del prototipo.....	9
2.6 Aspecto real de la lata de conservas.....	10
2.7 Regulador de velocidad para el motor.....	10
3. Principios físicos y eléctricos del generador.....	11
3.1 Imanes de tierras raras.....	11
3.1.1 Descripción.....	11
3.1.2 Explicación de su comportamiento.....	11
3.1.3 Tipos de imanes.....	12
3.2 Diagrama de bloques del conjunto.....	13
4. Dificultades encontradas	14
5. Posibles mejoras.....	19
5.1 Motor de arrastre.....	19
5.2 Sección semicircular de imanes.....	19
5.3 Material del rotor.....	19
6. Conceptos importantes en el alternador.....	19
7. Formas de onda de fem inducida en vacío.....	21
7.1 Tensiones de fase individuales.....	22
7.1.1 Justificación de la forma de onda obtenida.....	26
7.2 Tensiones compuestas conexión en estrella.....	28
8. V eficaz de línea y fase en estrella.....	31
9. Explicación teórica posterior de forma de onda.....	35
9.1 Justificación.....	36
9.2 Valores de fem y B con una de las barras del estator giradas.....	37
9.3 Adición de un par de hileras de imanes por cada polo.....	39
9.4 Adición de dos pares de hileras de imanes en polo Norte.....	40
10. Funcionamiento como motor síncrono.....	41
11. Rectificación a continua.....	44
12. Planos y dibujos del alternador.....	45
13. Bibliografía.....	49
14. Agradecimientos.....	49

1. ANTECEDENTES

1.1. Edemuz

Este trabajo está incluido dentro del programa de innovación docente de la Universidad de Zaragoza, formado por los profesores del Departamento de Ingeniería Eléctrica y constituyendo el grupo Edemuz, que tiene como objetivo desarrollar proyectos de divulgación científica en los que participa activamente el alumno.

Edemuz tiene su origen hacia 1996, cuando un grupo de profesores del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Zaragoza, adscritos a la Escuela Universitaria de Ingenieros Técnicos Industriales (actualmente integrada en la Escuela de Ingeniería y Arquitectura) comienzan sus actividades de innovación docente en asignaturas de Electromagnetismo impartidas en el primer curso.



Fig. 1. Profesores y colaboradores de Edemuz en Taller de Electricidad

El Equipo Docente de Electromagnetismo de la Universidad de Zaragoza (EDEMÚZ) ha desarrollado durante más de una década recursos docentes en cursos técnicos de electromagnetismo y otras asignaturas relativas a la ingeniería eléctrica. También ha implantado procedimientos activos y cooperativos de enseñanza/aprendizaje en estas materias, tratando de adelantarse a los cambios que ha traído el plan Bolonia.

En este periodo ha desarrollado, en colaboración con los propios estudiantes, recursos para mejorar la docencia y ha llevado a cabo numerosos ensayos de innovación docente orientados a los primeros cursos de ingenierías técnicas.

Las principales acciones del grupo se resumen así: obtención de ayudas de la Universidad de Zaragoza para trece proyectos de innovación docente, realización de una evaluación externa de los resultados de aprendizaje de los estudiantes y del procedimiento docente, publicación de diez comunicaciones a congresos docentes nacionales y cuatro a

congresos internacionales, implantación de una metodología docente basada en procedimientos activos y cooperativos en dos especialidades de ingeniería técnica.

Entre los recursos docentes desarrollados hay que destacar los 53 experimentos disponibles para realizar en clase o en los laboratorios, organizados en un portal web que describe las demostraciones y muestra vídeos de las mismas, los prototipos de grandes máquinas electrostáticas, las preguntas de test disponibles online, las páginas web de las asignaturas que orientan al estudiante y facilitan su autoaprendizaje.

1.2. Fases previas al proyecto actual

El proyecto realizado constituye la cuarta fase de un trabajo conjunto que tuvo su comienzo en el curso 2005/06 en la asignatura de Electricidad y Electrometría de la titulación de Ingeniería Técnica Electrónica.

Los objetivos en cada fase fueron diferentes, haciendo alguna modificación de un diseño a otro y abarcando mayor uso progresivamente. La idea principal es realizar un generador de imanes permanentes que alimentase a un motor trifásico de inducción.



Fig. 2. Primer prototipo

Las fases en las que se ha dividido este proyecto, realizándose cada una de ellas por diferentes compañeros, son las siguientes:

- 1) Usar el sistema planteado como motor trifásico de inducción. El planteamiento físico es el mismo para el generador y el motor, con la diferencia que el primero tendrá el objetivo de generar energía eléctrica y el segundo energía mecánica.

2) Crear dos alimentadores para el motor citado anteriormente. El primero será un sistema electrónico y el segundo consistirá en un generador de imanes permanentes.

3) Esta fase es la previa a la mía y es la creación de un generador de imanes permanentes con 3 pares de polos.

El aspecto del prototipo anterior se puede ver en la fotografía de la Fig. 3:



Fig. 3. Segundo prototipo

2. OBJETIVO DEL PROYECTO

2.1. Pares de polos

Como he citado anteriormente, la fase anterior a este proyecto consiste en la realización de un generador de imanes permanentes a base de un rotor construido con una lata de conservas y un estator en el que se encuentran un conjunto de bobinas por las que circulará la corriente generada por el sistema. Estas bobinas están colocadas en dirección axial ligeramente por encima de la lata y enroscadas sobre tornillos y tuercas.

El objetivo era alimentar el motor trifásico de inducción realizado en la fase anterior. La señal que debía generar este alternador debía ser trifásica para lograr una correcta alimentación del motor. Debido a la colocación de tres pares de polos en el rotor en la fase anterior a este proyecto no se logra el objetivo buscado de conseguir tres señales monofásicas desfasadas 120 grados entre ellas, que es la base de un sistema trifásico.

Distribuyendo los imanes de esta manera el resultado final fue la aparición de tres señales monofásicas que pulsaban en fase y por tanto no tenían el desfase necesario para formar una señal trifásica. De este modo, no era posible alimentar adecuadamente el motor trifásico de inducción, por lo que se ha tenido que hacer ligeras modificaciones.

Por ello la modificación sustancial era lograr una correcta señal, que se consigue colocando solo un par de polos. Este proceso ha consistido en desmontar el sistema y colocar los imanes adecuadamente.

2.2. Forma sinusoidal de imanes

Además de eliminar los otros dos pares de polos del motor, también se consideró necesario colocar el polo norte y sur de tal modo que consiguiéramos una señal lo más sinusoidal posible. Para ello se puso una fila central de imanes en dos pisos y a sus laterales dos filas de un solo piso tratando además de colocarlas ligeramente curvadas, consiguiendo así que la forma que tuviera esa zona fuera lo más semejante posible a una senoide.

El proceso realizado manualmente es complejo pero se consiguió un efecto sinusoidal en la forma de los imanes de considerable calidad. En la siguiente foto se muestra la vista frontal de esta forma semicircular que se trató de lograr con la mayor precisión posible.



Fig. 4. Forma de imanes

Con una sola fila de imanes, el aspecto que tiene la señal obtenida se observa en la Fig. 5.

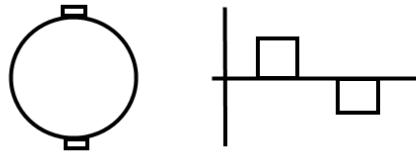


Fig. 5. Una sola hilera de imanes

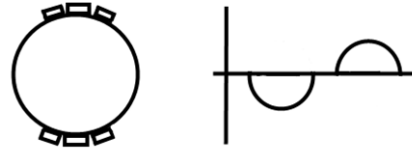


Fig. 6. Varias filas de imanes

Añadiendo dos filas en los laterales tratando de curvar la zona de imanes, el nuevo aspecto que adquiere la señal queda reflejado en la Fig. 6.

2.3. Sustituir piezas defectuosas

En fases anteriores, el prototipo del proyecto se había realizado con materiales como el metacrilato y la madera. Con el tiempo y el uso del generador, estos materiales se han ido deteriorando por lo que se consideró práctico el sustituir los elementos desgastados por otros nuevos, en mejor estado y utilizando material más resistente para el uso que debería tener.

Las piezas de metacrilato presentan notables signos de deterioro y con posibilidades de quebrarse con el uso, como se observa en la Fig. 7.



Fig. 7. Piezas usadas en prototipos anteriores

Para darle mejor aspecto y robustez al prototipo se ha tratado de dejarlo lo más estético posible y con un acabado adecuado.

El material que se escogió para realizar el soporte del sistema fue la madera debido a su mayor consistencia en comparación con el metacrilato. Se eligió un grosor para cada pieza casi similar al que se usó en el anterior diseño aunque tratando de dejar las piezas lo más estéticas posibles.

Para conseguir la forma de dichas piezas se usó principalmente la caladora y el taladro. Con la caladora se iba recortando la madera según el dibujo que previamente se había realizado en la misma y con las medidas que se consideraron oportunas.

En las imágenes de la Fig. 8 y siguientes se ve como se fue cortando cada una de las piezas.



Fig. 8. Realización de piezas de soporte



Fig. 9. Figura octogonal del soporte



Fig. 10. Proceso de corte



Fig. 11. Repasado de agujero

Para lograr los agujeros centrales de los soportes en los que irá colocado el eje del rotor se usó un taladro. No se disponía de brocas de tamaño tan grande necesario para ese agujero pero pudo mecanizarse con otras herramientas.

El proceso de taladrado se muestra en las Fig. 12 y 13.



Fig. 12. Taladros realizados



Fig. 13. Mecanización del soporte del rodamiento

Para lograr el tamaño necesario de agujero que permitiese colocar la pieza que sujeta el eje se usó una herramienta de precisión realizando con cuidado y paciencia la tarea de ir aumentando su diámetro. Esta función llevo más tiempo del que costaría realizarlo con taladro, pero unas brocas de tal tamaño son difíciles de disponer para uso doméstico.

2.4. Eficiencia en polea

Para mover el rotor del generador usamos el motor de un taladro, y el nexo de unión entre éste y el generador es una polea. Para que esta última trabaje eficientemente es importante que tenga la mayor tensión posible. Dicha cualidad se consiguió añadiendo unas piezas de madera extra en la base del taladro que permitiesen ajustar lo mejor posible la distancia óptima entre la broca del taladro y el rotor del alternador.

2.5. Representación gráfica del prototipo

Con el objetivo de facilitar la fabricación de las nuevas piezas y también para mostrar con mayor precisión el prototipo del proyecto se decidió realizar un dibujo 3D con las mismas medidas.

Gracias a este dibujo se puede acceder fácilmente a todos los ángulos y perspectivas del generador, lo cual nos permite mayor exactitud a la hora de diseñar cada pieza y observar dónde puede haber fallos.

2.6. Aspecto real de la lata de conservas

La lata estaba previamente pintada de verde para mostrar un aspecto más uniforme y algo más semejante a un rotor clásico. El objetivo principal de este proyecto es mostrar el carácter divulgativo de este diseño, por lo que la mejor opción escogida es representar la lata de conservas con su aspecto original y sin añadiduras de pintura ni ningún elemento que oculte lo que es.

Para este proceso se utilizó disolvente untado en una gasa y dejado varios minutos sobre la lata con el fin de que se empape y la pintura se ablande. Con los pequeños restos que no pudieron eliminarse se utilizó cuidadosamente el cúter llegando así a zonas más complejas.



Fig. 14. Proceso de eliminación de pintura

2.7. Regulador de velocidad para el motor

El motor del taladro usado en este proyecto es universal, de corriente alterna y realiza bien la función para la que está encomendado pero no tiene la posibilidad de regular la velocidad, por lo que no nos permitiría observar diferentes ondas en los oscilogramas.

Para ello las posibles soluciones valoradas fueron:

- Conseguir un motor más nuevo que ya tuviese incorporado dicha regulación de velocidad.

- Comprar un circuito que realizase esa función y que permitiese conectarse a la potencia requerida por el taladro y también para valores superiores. De este modo se tendría la posibilidad de usar dicho regulador para otras funciones en el laboratorio.

El regulador de velocidad consiste básicamente en un tiristor al que variando su ángulo de disparo consigue que la tensión que llegue a la salida sea de diferente valor medio. Esto significa que podemos lograr una velocidad variable. El ángulo de disparo lo vamos modificando a través de un potenciómetro.

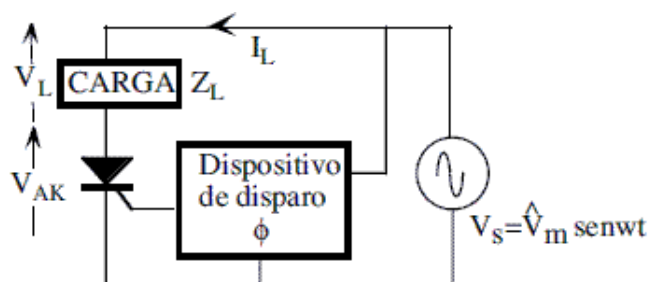


Fig. 15. Reg. Velocidad A.C (www.fadisel.es) Fig. 16. Esquema regulador (www.unicrom.com)

3. PRINCIPIOS FÍSICOS Y ELÉCTRICOS DEL GENERADOR

3.1. Imanes de tierras raras

3.1.1. Descripción

Un imán de tierras raras es un poderoso imán permanente hecho con aleaciones de elementos químicos conocidos como tierras raras. Desarrollados en los años 1970 y 1980, los imanes de tierras raras son el tipo más fuerte de imanes permanentes, produciendo campos magnéticos significativamente más intensos que otros tipos tales como imanes de ferrita o de alnico. El campo magnético típicamente producido por los imanes de tierras raras puede ser superior a 1,4 T, mientras que los imanes de ferrita o los cerámicos exhiben típicamente campos magnéticos de 0,5 a 1 T. Existen dos tipos: imanes de neodimio e imanes de samario-cobalto. Los imanes de tierras raras son extremadamente quebradizos y también vulnerables a la corrosión, así que son usualmente recubiertos con una capa de metal o de pintura para protegerlos de la rotura o astillamiento.

3.1.2. Explicación de su comportamiento

Los elementos de tierras raras (lantánidos) son metales ferromagnéticos, lo que significa que al igual que el hierro pueden ser magnetizados, pero sus temperaturas de Curie están debajo de la temperatura ambiente, así que en su forma pura su magnetismo

solo aparece a bajas temperaturas. Sin embargo, forman compuestos con los metales de transición tales como el hierro, níquel, y cobalto, y algunos de estos compuestos tienen temperaturas de Curie superiores a la temperatura ambiente. Los imanes de tierras raras están hechos de estos compuestos.

La ventaja de los compuestos de tierras raras sobre otros imanes es que sus estructuras cristalinas tienen una muy alta anisotropía magnética. Esto significa que un cristal del material es fácil de magnetizar en una dirección particular, pero se resiste a ser magnetizado en cualquier otra dirección.

Los átomos de elementos de tierras raras pueden retener altos momentos magnéticos en el estado sólido. Esta es una consecuencia del llenado incompleto de la subcapa electrónica f , que puede contener hasta 7 electrones desapareados con espines alineados. Los electrones en esos orbitales están fuertemente localizados y por tanto retienen fácilmente sus momentos magnéticos y funcionan como centros paramagnéticos. Los momentos magnéticos en otros orbitales están ocasionalmente perdidos debido al fuerte traslape con los vecinos; por ejemplo, los electrones que participan en enlaces covalentes forman pares con espín neto cero.

Los altos momentos magnéticos a nivel atómico en combinación con un alineamiento estable (alta anisotropía) resultan en una alta capacidad de magnetización.

3.1.3. Tipos de imanes

Samario-cobalto

Los imanes de samario-cobalto (fórmula química: SmCo_5), la primera familia de imanes de tierras raras desarrollados, son menos usados que los imanes de Neodimio debido a su alto costo y una intensidad de campo magnético más débil en comparación a estos. Sin embargo, los imanes de samario-cobalto tienen una mayor temperatura de Curie, creando un nicho para estos imanes en aplicaciones donde se necesita alta intensidad de campo a elevadas temperaturas de operación. Son altamente resistentes a la oxidación, pero los imanes de samario-cobalto sinterizados son frágiles y propensos a astillarse y agrietarse, y pueden fracturarse cuando son sujetos a choque térmico.

Neodimio

Los imanes de neodimio, desarrollados en los años 1980, son los más fuertes y más asequibles imanes de tierras raras. Están hechos de una aleación de neodimio, hierro y boro: ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$). Estos imanes tienen mayor intensidad de campo magnético pero menor temperatura de Curie, además son más vulnerables a la oxidación que los imanes de samario-cobalto. El uso de tratamientos protectores de superficie tales como laminado con oro, níquel, cinc y estaño y revestimiento con resina epoxi, puede proveer protección contra la corrosión cuando sea requerida. Los imanes de neodimio son utilizados en numerosas aplicaciones que requieren imanes fuertes y compactos, tales como motores

eléctricos para herramientas inalámbricas, discos duros, y sujetadores y broches magnéticos de joyería.

Originalmente, el alto costo de estos imanes limitaba su uso para aplicaciones que requerían compactibilidad junto con un alto campo. Tanto las materias primas como las licencias de patentes eran caras. A comienzos de los años 1990 los imanes de neodimio se abarataron, pero la alta demanda y el monopolio de China en la extracción de tierras raras los ha encarecido mucho en los cinco últimos años.

3.2. Diagrama de bloques del conjunto

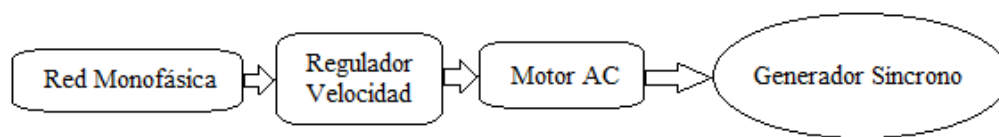


Fig. 17. Diagrama de bloques

El objetivo original del proyecto es que, gracias a las modificaciones oportunas realizadas en el generador síncrono, completemos un sistema realizado por nosotros mismos en el que se genere una tensión alterna con la finalidad de aprovecharla para alimentar un motor trifásico.

El único elemento de este sistema que colocamos ya de fábrica es el motor AC. El movimiento mecánico podría haberse conseguido a través de otro accionamiento o realizado directamente por nosotros, pero es evidente que el motor nos da más posibilidades y una mayor velocidad angular que permita lograr una tensión alterna de suficiente calidad.

Si observamos la Ley de Faraday aplicadas a las máquinas eléctricas rotativas [J.Chapman, Stephen] de corriente alterna:

$$\varepsilon = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot N \cdot m \cdot \phi \cdot f = 4.44 \cdot N \cdot m \cdot f \cdot \phi$$

donde:

\mathcal{E} = fem inducida (V)

N = número de espiras

M = nº de bobinas en serie

ϕ = 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
- Acercar los tornillos a los imanes todo lo que sea posible
- Aumentar la f aumentando la velocidad del motor.

También hay que tener en cuenta que cuanto mejor esté realizada la construcción de las piezas del generador, más eficiente será el sistema y se conseguirá una mejor forma de onda. Uno de estos ejemplos para perfeccionar la señal es la idea de hacer que tengamos en la medida de lo posible una forma semicircular en los imanes que se encuentran en el rotor. De este modo sabemos que cuando pasen por cada hilera de bobinas del estator generarán en las mismas una onda lo más cercana posible a la sinusoide típica de la tensión alterna.

4. DIFICULTADES ENCONTRADAS

En este apartado paso a describir aquellas partes de mi trabajo que me han resultado más complicadas de resolver:

- Al desmontar el prototipo anterior, algunas de las piezas habían sido encajadas con fuerza y no disponía de las herramientas necesarias para sacarlas fácilmente.



Fig. 18. Despiece del proyecto anterior



Fig. 19. Piezas anteriores y deterioradas

- Otras piezas del proyecto anterior ya presentaban signos de deterioro y al tener que manipularlas en el desmontaje algunas de ellas se quedaron en desuso.
- Al quitar las filas de imanes que sobraban para conseguir la señal adecuada (como he explicado anteriormente), la lata quedó ligeramente dañada ya que contenía gran cantidad de pegamento extra fuerte para conseguir fijar los imanes de Neodimio. Los restos de pegamento que quedaron sellados en la lata se quitaron tratando de dejar un resultado lo más eficiente y estético posible.



Fig. 20. Restos de pegamento adheridos



Fig. 21. Pegamento extra a eliminar

- Las filas centrales, que es donde se iba a situar el polo norte y el sur necesario para generar la señal trifásica correcta, presentaban también gran cantidad de pegamento en sus laterales y debido a que este último al secarse presenta muchísima adherencia y gran dureza se tuvo que emplear un cúter para eliminar la parte no necesaria.
- Una de las tareas que presentó más dificultad fue el pegar las filas laterales que nos permitiesen conseguir una señal más sinusoidal. Debido al gran magnetismo de estos imanes, si intentamos pegar dos de ellos en paralelo en la misma posición respecto a sus polos, lo más fácil es que salte instantáneamente uno sobre el otro uniendo sus polos opuestos. Además de su gran magnetismo, hay otra dificultad que se presentó a la hora de fijar estos imanes y es que el pegamento Araldit es de secado lento. Esto quiere decir que debemos mantener los imanes en esa posición durante aproximadamente un día para que queden correctamente unidos. Para poder hacer esta operación se ideó un sistema con un gato y unos trozos de cartón que permitiesen fijar los imanes en esa zona durante el tiempo necesario sin moverse. Las etapas de esta operación se muestran en las Fig. 22 y 23.



Fig. 22. Sistema ideado con el gato



Fig. 23. Amarre del sistema y posición de pegado

El sistema de gato y lata quedaba fijo en una posición durante al menos un día. El cartón impedía que los imanes se desplazaran hacia abajo buscando una zona de la lata en la que unirse con mayor facilidad.

A pesar de idear este sistema para conseguir pegar los imanes, en algunas ocasiones pudiera ser que uno de los imanes que no hubiese quedado bien colocado saltase y se tuviese que volver a realizar el proceso.

En la gráfica de la Fig. 24 se puede observar como dos imanes de una misma hilera han quedado correctamente pegados y el último ha saltado de su posición dejando su zona únicamente con el pegamento ya seco.

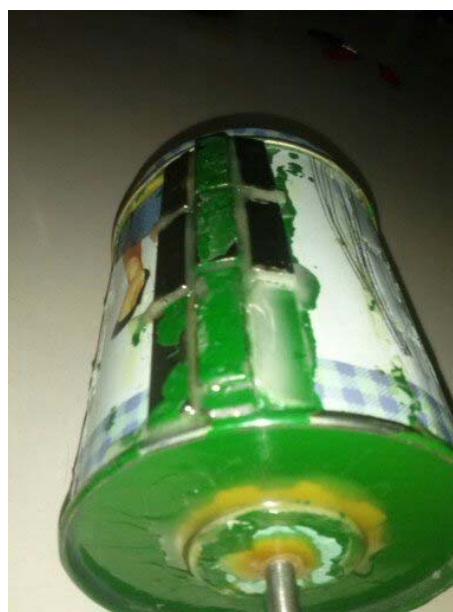


Fig. 24. Salto de imán después del secado

- Es importante resaltar que el pegamento necesario para unir los imanes a la lata tuvo que usarse de gran calidad y fuerza de pegado porque otros pegamentos también buenos, no conseguían pegar con efectividad y lograr el objetivo deseado.

Anteriormente se usó otro pegamento que consistía también en masilla de dos componentes pero no era tan fuerte y tuvo que emplearse otro superior.

El pegamento utilizado en el comienzo fue Araldit, pero una gama inferior. En la Fig. 26 se observa cómo quedaba el pegamento anterior después del proceso de secado y en el que ya tenía el efecto máximo en su pegada.



Fig. 25. Pegamento usado anteriormente



Fig. 26. Inefectividad de pegamento

Al final, el pegamento que consiguió unir los imanes y sellarlos permanentemente fue también araldit, pero en su gama más alta. Fue el modelo extra fuerte. En la Fig. 27 aparece el pegamento con el que se consiguió los objetivos planteados de pegar los imanes.



Fig. 27. Pegamento final y efectivo



Fig. 28. Eliminación de pintura con disolvente

El tiempo de trabajo con el pegamento era elevado, entorno a unos 90 minutos, por lo que en el caso de que no se colocase bien a la primera los imanes, el pegamento seguía en perfecto estado para continuar trabajando con él y repetir el proceso.

Cuando ya estaba todo el sistema preparado para dejar el pegamento haciendo su efecto, este último necesitaba unas 8 horas para que cogiese firmeza y pegase aunque el fabricante advertía que después de 14 horas es cuando su efecto es máximo.

Al haber realizado tantas pruebas y modificado errores, se llegó a comprobar que cuando adquiere un aspecto sólido en el que da una clara impresión de poder sujetar estos imanes de tierras raras es cuando han pasado más de dos días. En tiempos inferiores el pegamento hace efecto pero su consistencia es más blanda y se nota claramente que no tiene ese aspecto consistente que posteriormente adquiere.

- También se quiso dar un aspecto natural a la lata de conservas que actúa de rotor por lo que se decidió utilizar disolvente para eliminar la capa de pintura que se le había dado previamente. El disolvente necesita estar un tiempo en contacto con la pintura para que la reblandezca y pueda eliminarse con facilidad. Para ello se empaparon unas gasas con disolvente y se dejó un rato colocadas sobre la lata hasta que poco a poco se fue ablandando. A pesar de realizar este proceso, quedaron algunas zonas en las que fue complicado eliminar la pintura. Para solucionar este problema, se utilizó el cúter quitando suavemente esos pequeños restos adheridos a la lata. En la Fig. 28 se observa el proceso de eliminación de la pintura.

- A la hora de realizar las piezas de madera para el soporte del alternador se necesitaba realizar un agujero de determinado diámetro difícil de conseguir con una sola broca. Se disponía de una broca de gran envergadura pero no era suficiente para conseguir el agujero necesario. Como se describió anteriormente el objetivo se logró aumentando pacientemente el agujero con una herramienta de precisión.

- El motor usado en el laboratorio es muy antiguo y no posee regulación de velocidad. En este proyecto es aconsejable poder variar la velocidad para ir comprobando los diferentes valores que aparecen en la tensión de salida, viendo si realmente es proporcional la amplitud a la salida con la velocidad de giro del taladro. Al colocar el regulador de velocidad aparece otro problema nuevo. El mecanismo de variar el ángulo de disparo y por tanto la velocidad, consiste básicamente en apagar y arrancar el motor en cada semiciclo con la consecuencia de que el valor medio final de tensión es de diferente amplitud y permite esa regulación deseada. La cuestión es que dicho arranque y corte del motor produce un sonido mucho más fuerte del que haría en un funcionamiento constante y por tanto según en qué situaciones y para qué motores, este tipo de regulador no es adecuado, más todavía en lugares en los que debe vigilarse el nivel de ruido.

5. POSIBLES MEJORAS

5.1. Motor de arrastre

Una de las mejoras más fácil de llevar a cabo y que seguramente diera un resultado más satisfactorio es el tipo de motor empleado para generar la energía mecánica. El usado en este proyecto es de gran antigüedad y no posee regulación de la velocidad. Además su arranque es bastante brusco y si a ello le sumamos el regulador externo que se introdujo, el resultado es un nivel de ruido elevado que sería conveniente solucionar.

A la hora de realizar las piezas del soporte de madera, se probó a efectuar el giro con un taladro de gran calidad y que dispone de esas características nombradas anteriormente. El movimiento del rotor era mucho más preciso y fácilmente variable. El problema es que este tipo de taladros suele ser de costes elevados y quizás para un proyecto en el que no va a ser usado permanentemente durante el año no es útil tener una herramienta así infrautilizada.

5.2. Sección semicircular de imanes

Otra posible mejora podría ser la forma de los imanes permanentes que se colocan en el rotor. En este proyecto se disponía de un conjunto de imanes de forma rectangular y reducido espesor con los cuales era francamente difícil lograr una sección semicircular que permitiese alcanzar la mayor exactitud posible en la sinusoide de salida de la señal trifásica. A pesar de la dificultad en la consecución de estos objetivos y gracias a ideas que fueron surgiendo entre el tutor del proyecto y el alumno se consiguió una forma lo más semejante posible a la buscada.

5.3. Material del rotor

También es opción de mejora el elemento usado como rotor del generador. Al ir realizando tareas en las distintas fases que ha tenido este proyecto, la lata de conservas ha ido perdiendo algo de precisión en su forma cilíndrica. Hay que tener en cuenta que no es un material muy consistente por lo que es normal que algún deterioro o desperfecto aparezca con el tiempo y su manipulación. Podría ser una buena idea realizar esta pieza en un taller señalando las medidas necesarias para el sistema que hemos creado y usando un material que aguantase mejor en el tiempo.

6. CONCEPTOS IMPORTANTES EN EL ALTERNADOR

En mi opinión, y para poder interpretar las formas de onda que se obtienen en el alternador, la clave es entender que la fuerza electromotriz que se crea en las bobinas del estator no aumenta o disminuye dependiendo de la cantidad de flujo que la atraviesa sino

de la variación de flujo que surge en la misma. Es decir, la fuerza electromotriz será máxima y por tanto se encontrará en el punto más alto de la onda, cuando la variación de flujo a través de la misma sea máxima. Esto ocurre en el momento en que los imanes permanentes están situados perpendiculares al plano formado por las bobinas que conforman la fase que queremos estudiar.

El caso opuesto ocurre cuando los imanes están situados justamente en el mismo plano que forman las bobinas de esa fase. En esta situación ocurre que el flujo que atraviesa la bobina es el máximo y por lo tanto hay un instante en el que no hay variación de flujo. Esto sucede en el momento en el que por la bobina va llegando su flujo máximo y después empieza a disminuir.

Para que quede claro este concepto, a continuación se explica detalladamente la Ley de Faraday-Lenz para calcular la fem inducida en una espira fija:

La variación temporal del flujo del vector inducción magnética \vec{B} a través de la superficie definida por una espira o bobina, Φ_B , da lugar a una fuerza electromotriz inducida, \mathcal{E} , asociada a un campo eléctrico inducido, \vec{E}_g . La espira o bobina se comporta como una región generadora; si está cerrada o cortocircuitada, circulará por ella una corriente eléctrica que creará un campo magnético inducido, $\vec{B}_{\text{inducido}}$, que se opondrá a la variación del flujo de \vec{B} . Esta corriente eléctrica saldrá de la bobina por el terminal positivo (el de mayor potencial).

$$\mathcal{E} = \int_C^-^+ \vec{E}_g \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \Phi_B = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

“La fuerza electromotriz, circulación del vector intensidad de campo eléctrico, \vec{E}_g , a lo largo de una línea C, es igual a la variación temporal, cambiada de signo, del flujo del vector inducción magnética \vec{B} a través de la superficie definida por C.”

El flujo del vector \vec{B} , Φ_B , variará en el intervalo de tiempo considerado, cuando:

- el módulo y el sentido del vector \vec{B} varíen, y/o
- la superficie S cambie de tamaño, y/o
- se modifique la posición de la superficie S respecto de la dirección del vector \vec{B} (cambie el valor del $\cos \alpha$ asociado al producto escalar de $\vec{B} \cdot d\vec{s}$)

El terminal de la espira o bobina por donde saldría la corriente eléctrica inducida (terminal de mayor de potencial de la región generadora) es aquél al que apunta el vector \vec{E}_g .

El fenómeno de inducción electromagnética queda totalmente descrito cuando se ha determinado el terminal positivo de la región generadora y se ha calculado el valor absoluto de la fuerza electromotriz \mathcal{E} . El signo negativo queda incluido en el razonamiento para determinar el terminal positivo de la región generadora, y solo debe usarse cuando se analiza el fenómeno de inducción localmente (ecuación diferencial o análisis vectorial mediante la regla de la mano derecha).

El flujo del vector \vec{B}, Φ_B , asociado a una bobina de N espiras elementales o vueltas, será igual al flujo que atraviesa una espira elemental multiplicado por N.

7. FORMAS DE ONDA DE FEM INDUCIDA EN VACÍO

A continuación mostraré las formas de onda de fem inducida cuando no circula corriente eléctrica por las bobinas. Las obtuve mediante un Osciloscopio Tektronic TDS 210 conectado a un PC mediante puerto RS-232 y usando el programa KCapOsc elaborado por el profesor y miembro del Edemuz, Miguel Samplón. Para saber a qué velocidad angular estábamos trabajando, se usó un tacómetro digital.

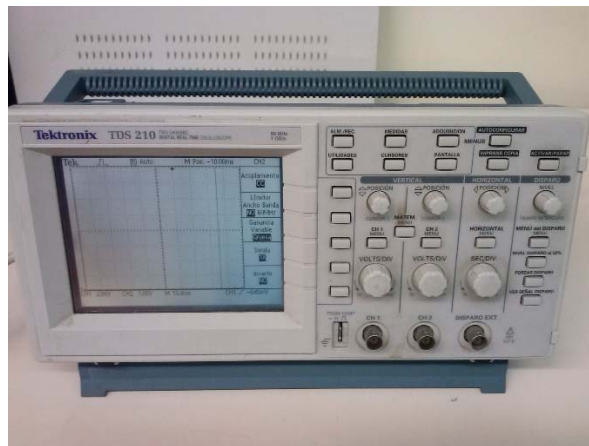


Fig. 29. Osciloscopio usado para obtener las formas de onda

El esquema de terminales es el mostrado en la Fig. 30.

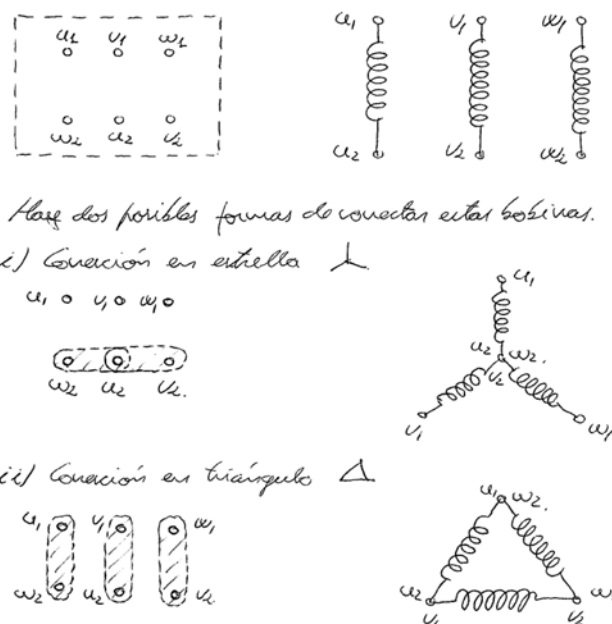


Fig. 30. Conexión de los terminales

7.1. Tensiones de fase individuales

Fases UU'y VV'

Tensión U (canal 1) y Tensión V (canal 2) 1300 r.p.m

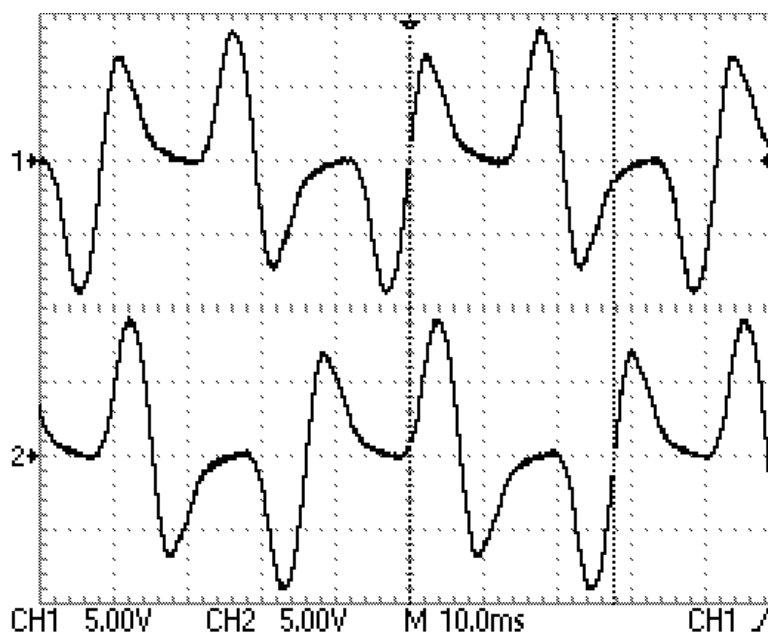


Fig. 31. Tensión U y V Fase 1300 rpm

En la Fig. 31 se puede observar diferentes cosas:

1) La señal está dividida claramente en parte positiva y parte negativa cumpliendo perfectamente la simetría entre ambas polaridades. La razón por la cual las dos partes son muy similares, prácticamente iguales, es porque la colocación de los imanes Norte y Sur tienen una forma muy semejante y eso hace que los campos que crean los mismos sea casi igual en los dos polos.

Otra de las razones por la cual es simétrica la onda es porque el entrehierro del alternador tiene mayor distancia y, a diferencia de otras máquinas en las que hay mayor precisión en el montaje y menor entrehierro, aquí no llega a aparecer una precisión muy detallada de la diferencia de campo que crea polo norte y sur.

2) La onda no es totalmente sinusoidal y se puede ver claramente como en cada una de las partes positiva y negativa se divide en dos ciclos de ascenso y descenso. La razón que en principio se pensó que era la causante de esta forma en la señal fue que, debido a que el estator está dividido en 5 bobinados en hilera que se repiten 6 veces para lograr el desfase necesario entre cada fase. En cada bobina se crea una fem diferente a las del resto y dentro de cada bobina también ocurre un proceso diferente para cada espira. Esto lleva a que sumando todas las fem de cada espira, bobina y placas el resultado de la superposición no sea concretamente un proceso en el que la onda crece hasta un máximo y disminuye acercándose al cambio de polaridad. Ocurre que el proceso de crecimiento se divide en dos tramos habiendo un descenso en la zona media.

Parecía observarse que en el momento en el que la variación del flujo debería ser máxima, que es cuando la línea que une el polo norte y sur del rotor se encuentra posicionada un ángulo de 90° respecto a la línea imaginaria que une las dos hileras de una fase, hay un decrecimiento que impide que se alcance ese valor máximo deseado. Posteriormente se encontró la respuesta a dicha duda sobre el tipo de gráfica obtenida.

En la Fig.32 se observa la pantalla empleada para la medida de tiempos de desfase entre ambas señales

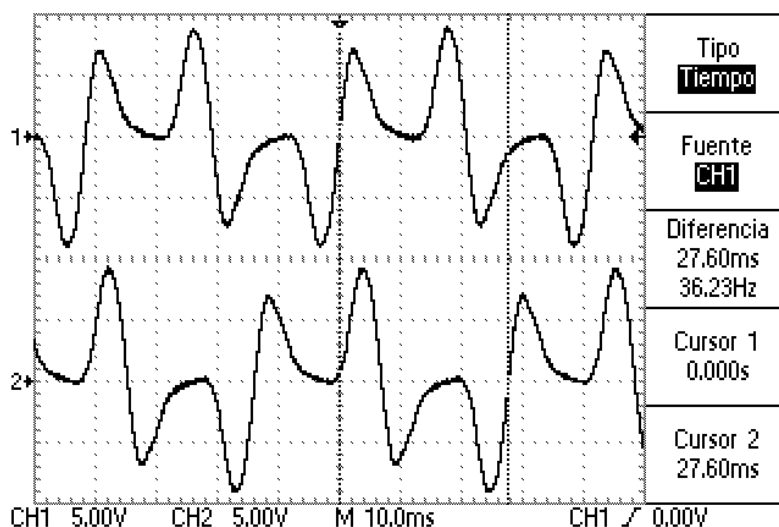


Fig. 32. Tensión U y V Fase cursores 1300rpm

En esta gráfica podemos observar el desfase de tiempos entre ambas para pasarlo posteriormente a grados. Como podemos ver, el time/div lo tenemos a 10 ms y eso significa que el periodo de esta onda es de 42 ms. Podemos comprobar que nuestro desfase entre las dos ondas es de 27,6 ms y su frecuencia 36,23 Hz lo que equivale a 236° .

En este caso los ciclos que comparamos no son los que van seguidos sino uno con respecto al siguiente más lejano, en la que la distancia en grados es de 236° . Eso quiere decir que el que medimos es de doble distancia y por tanto, no sale el desfase aproximado de 120° que buscamos.

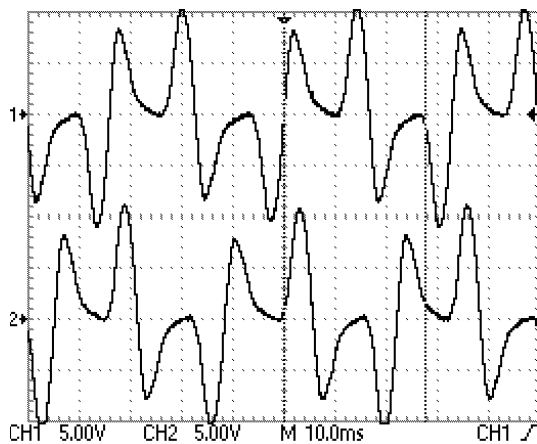


Fig. 33. Tensión U y V Fase 1850 rpm

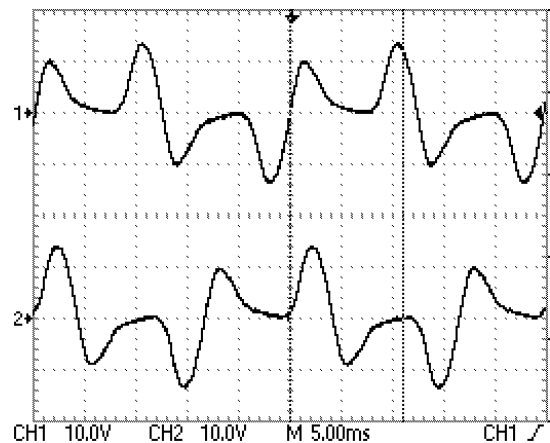


Fig. 34. Tensión U y V Fase 2400 rpm

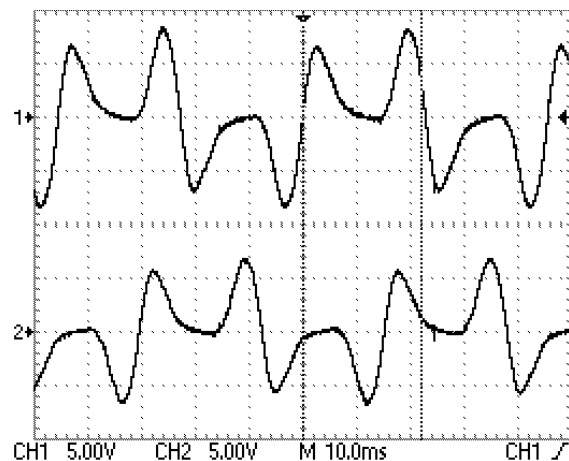


Fig. 35. Tensión U y W Fase 1300 rpm

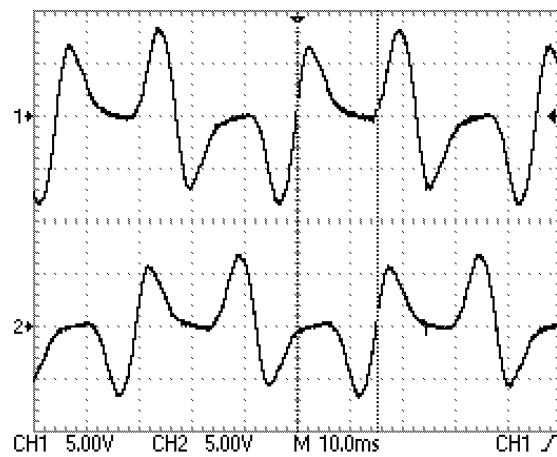


Fig. 36. Tensión U y W Fase 1300 rpm Cursores

El time/div lo tenemos a 10 ms y eso significa que el periodo de esta onda es de 45 ms. Podemos comprobar que nuestro desfase entre las dos ondas es de 15,2 ms, lo que equivale a 121° .

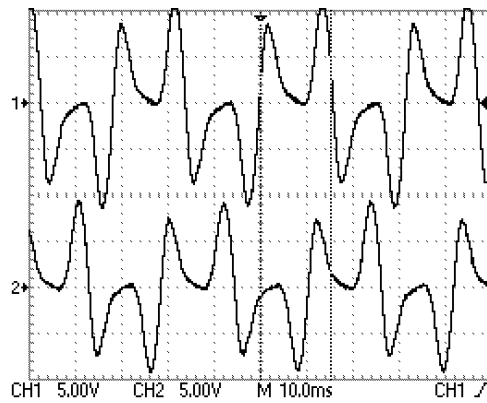


Fig. 37. Tensión U y W Fase 1850 rpm

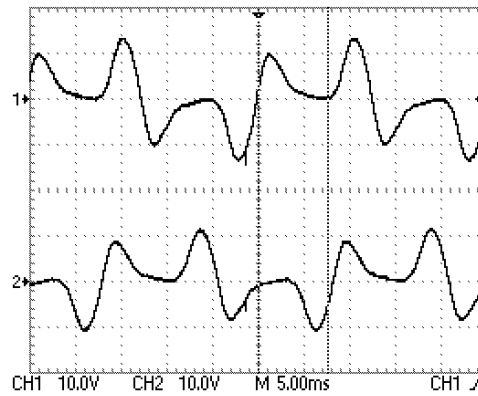


Fig. 38. Tensión U y W Fase 2400 rpm

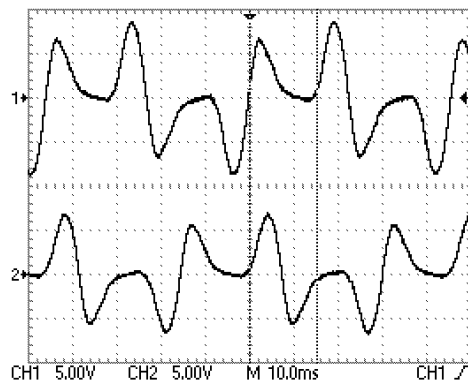


Fig. 39. Tensión V y W Fase 1300 rpm

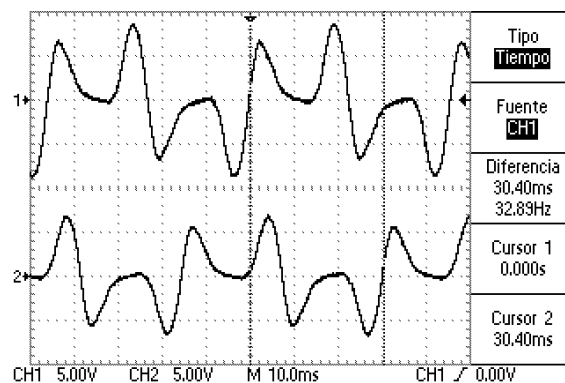


Fig. 40. Tensión V y W Fase 1300 rpm Cursores

El time/div lo mantenemos a 10 ms y eso significa que el periodo de esta onda es de 45 ms. Podemos comprobar que nuestro desfase entre las dos ondas es de 30,4 ms, lo que equivale a una diferencia de grados de 243°.

En este caso los ciclos que comparamos no son los que van seguidos sino uno con respecto al siguiente más lejano, en la que la distancia en grados es de 243°. Eso quiere decir que el que medimos es de doble distancia y por tanto, no sale el desfase aproximado de 120° que buscamos.

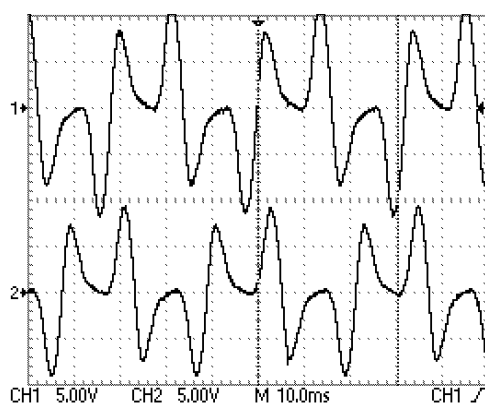


Fig. 41. Tensión V y W Fase 1850

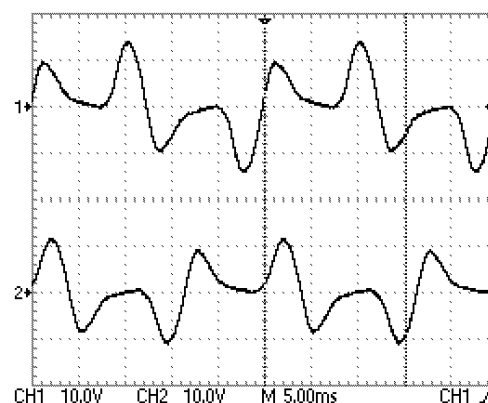


Fig. 42. Tensión V y W Fase 2400

Primeras posibles soluciones planteadas de la deformación observada en la senoide. Se podrían idear diferentes sistemas que pudiesen mejorar la forma de la onda, algunos de ellos serían:

- Poner un condensador que permitiese filtrar esa bajada de tensión a mitad de cada semiciclo y así conseguir que la onda fuese más sinusoidal.
- Si analizásemos nuestro sistema con un programa de elementos finitos en el que plasmásemos con la mayor exactitud el mecanismo físico, podríamos comprobar cómo se distribuyen las líneas de campo magnético y cuál podría ser el motivo al que se debe estas formas de onda.
- Seguramente el modo en el que están colocadas y enrolladas las bobinas a lo largo del estator hacen que la distribución del campo que va atravesándolas y la fem que se genera en ellas, al sumarlas no nos den una onda que sea totalmente sinusoidal.
- Si consiguiésemos un entrehierro de menor distancia en el que el campo magnético creado por el rotor alcanzase las bobinas del estator con mayor eficacia tendríamos más posibilidades, no solo de conseguir una señal más sinusoidal, sino también alcanzar mayores valores de tensión a la salida. Si a eso le añadimos que el estator puede mejorarse colocando un material que sea más ferromagnético, que ajuste con mayor precisión todavía las bobinas y que la conducción del campo magnético a través de él sea todavía mayor, estamos consiguiendo de ese modo los objetivos que buscamos de mayor amplitud posible de tensión a la salida y forma sinusoidal de gran calidad.

7.1.1. Justificación de la forma de onda obtenida

Haciendo un análisis basado en la ley de inducción de Faraday, paso a justificar la forma de onda de tensión obtenida en mi alternador. En la Fig. 43 se observa el ciclo completo en el que el rotor da una vuelta entera y los imanes norte y sur actúan sobre una misma bobina.

En el comienzo en T_1 la fem debería ser máxima, con polaridad negativa, ya que el imán se encuentra en el punto más alejado de la espira y por tanto la variación de campo que le llega debería ser máxima. Este proceso no ocurre así debido a que la configuración del sistema diseñado hace que en ese punto la bobina no reciba efecto del campo magnético del imán.. Desde T_1 ya superado a T_2 el polo Norte tiende a crear flujo magnético en la bobina de los tornillos de la Fase UU', dando lugar a la aparición de una fem inducida con el terminal positivo en u' (la corriente inducida, de sentido circular, lo haría saliendo de la bobina por el terminal u').

Desde T_2 a T_3 ese flujo tiende a debilitarse haciendo que la variación de flujo aumente hasta un máximo. Igual que antes, este máximo no llega a mitad de semiciclo sino que lo hace antes y es debido al motivo descrito en el que la espira deja de recibir efecto del imán antes de lo necesario.

Desde T_3 hasta T_4 el polo Sur tiende a crear un flujo magnético de signo distinto y por último, desde T_4 hasta T_5 ese flujo tiende a debilitarse.

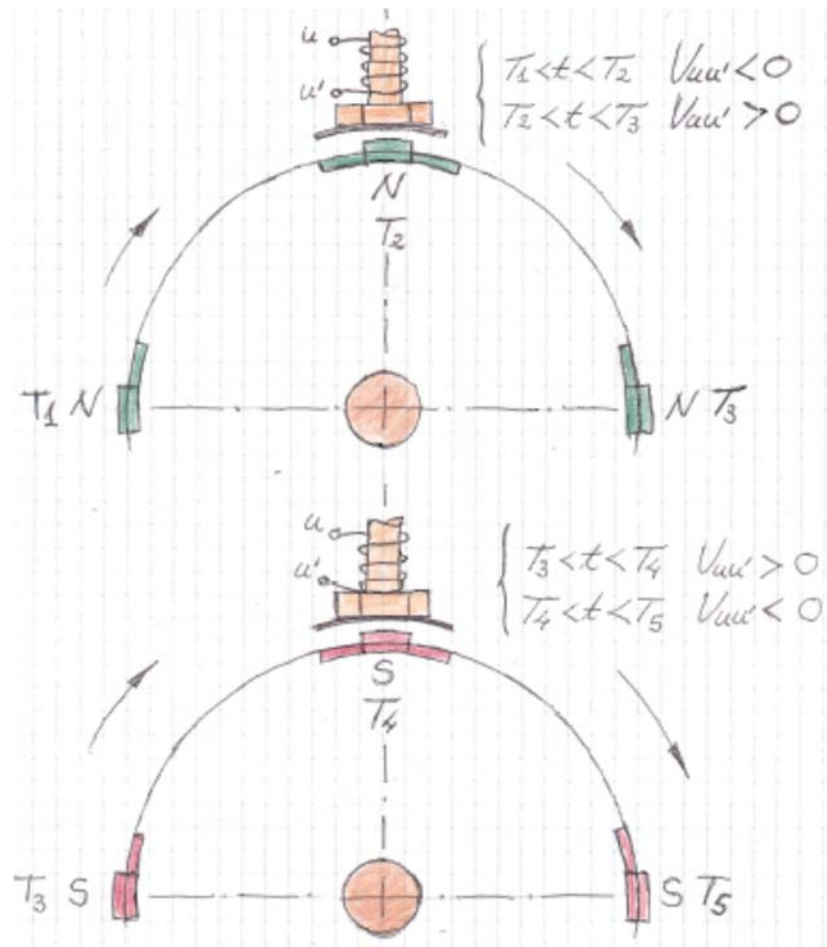


Fig. 43 . Representación gráfica de un ciclo completo

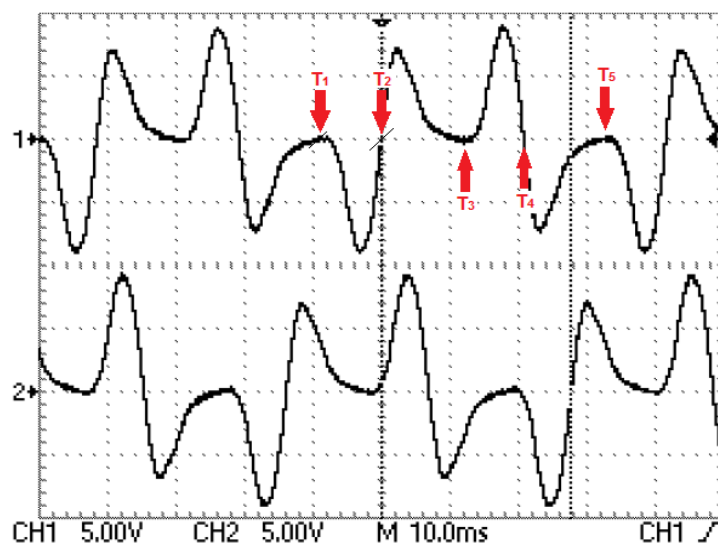


Fig. 44. Intervalos de tiempo en un periodo completo

7.2. Tensiones compuestas conexión en estrella

U y V (la referencia es W)

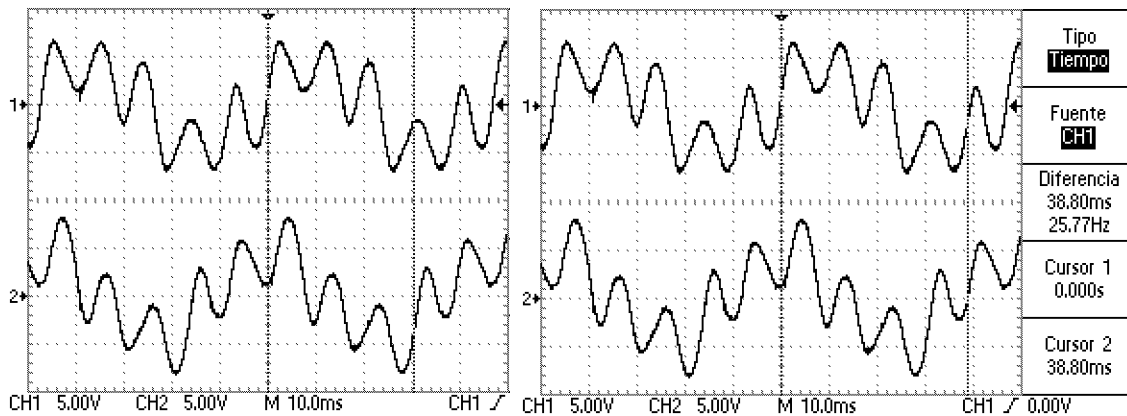


Fig. 45. *U y V (ref W) 1300r.p.m*

Fig. 46. *U y V (ref W) 1300 rpm Cursores*

Como podemos ver, el time/div lo tenemos a 10 ms y eso significa que el periodo de esta onda es de 47 ms. Podemos comprobar que nuestro desfase entre las dos ondas es de 38,8 ms lo que nos da la diferencia de grados de 297° , resultado coherente ya que la forma de onda de U-W debería estar invertida.

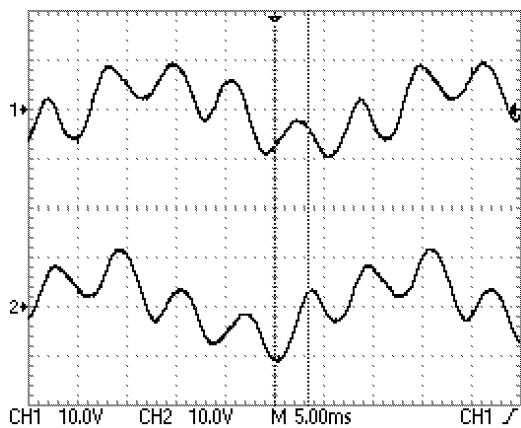


Fig. 47. *Tensión U y V (ref W) 1850 r.p.m*

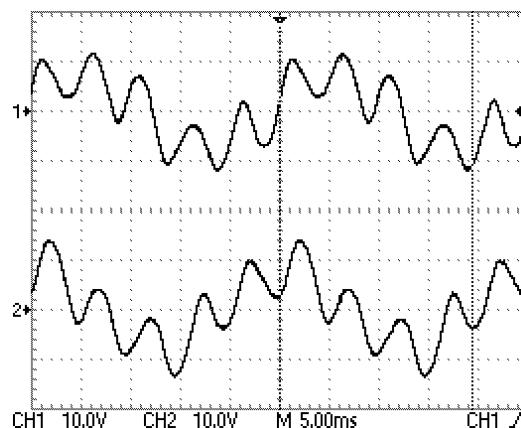


Fig. 48. *Tensión U y V (ref W) 2400 r.p.m*

Como se puede observar en estas gráficas, la onda adquiere una forma más sinusoidal que en el anterior caso en el que las tensiones eran de fase. El motivo principal es porque ahora la señal obtenida es la superposición de dos tensiones de fase con un ángulo de desfase entre ellas y con un valor eficaz resultante $\sqrt{3}$ veces mayor.

Posteriormente se observará que el valor eficaz medido en estrella no cumple el $\sqrt{3}$ veces mayor que debería ser con respecto al de fase. La explicación se hace junto a los valores eficaces medidos.

También se puede diferenciar claramente como en cada semiciclo la onda llega a sobrepasar el límite entre cada polaridad y hay un momento en el que se hace positiva cuando debería ser negativa y viceversa. La razón por la que ocurre esto es principalmente porque al superponer las ondas de fase adecuadamente para poder medir la tensión de línea conectada en estrella, llega a haber un momento en que su suma es negativa en un intervalo en que debería ser completamente positiva. Lo mismo ocurre para el polo negativo. Al ser un espacio mínimo en el que ocurre esto, nos permite aun así lograr un buen valor eficaz resultante.

U y W (la referencia es V)

Tensión UV (canal 1) y Tensión WV (canal 2) 1300 r.p.m

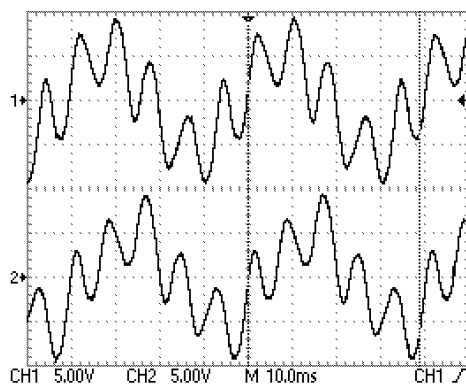


Fig. 49. U y W (ref V) 1300 r.p.m

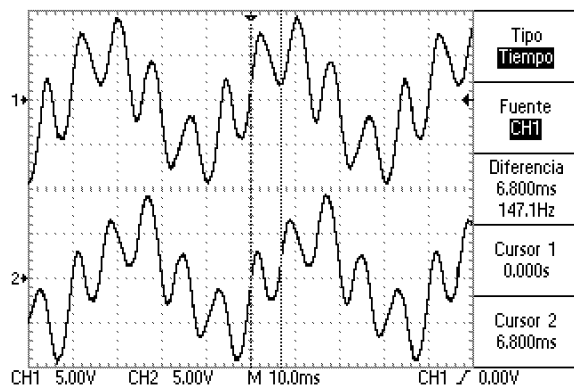


Fig. 50. U y W (ref V) 1300 r.p.m cursores

Medida de tiempos de desfase entre ambas

Como podemos ver, el time/div lo tenemos a 10 ms y eso significa que el periodo de esta onda es de 40 ms. Podemos comprobar que nuestro desfase entre las dos ondas es de 6,8 ms y esto da lugar a que la diferencia de grados sea $61,2^\circ$, resultado coherente ya que la forma de onda de W-V debería estar invertida.

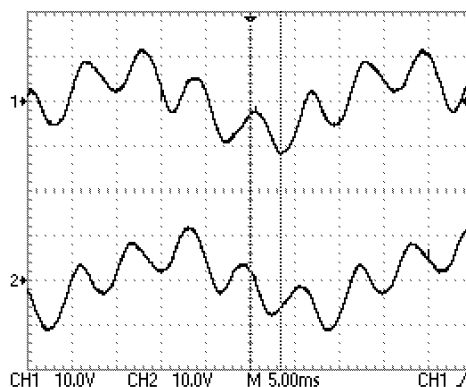


Fig. 51. Tensión U y W (ref V) 1850 r.p.m

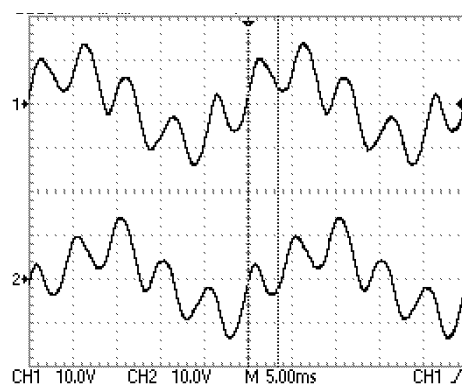


Fig. 52. Tensión U y W (ref V) 2400 r.p.m

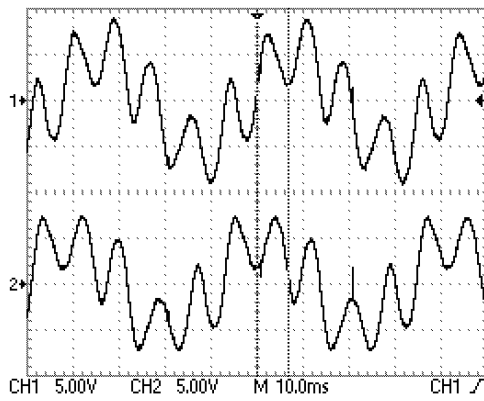


Fig. 53. Tensión V y W (ref U) 1300 r.p.m

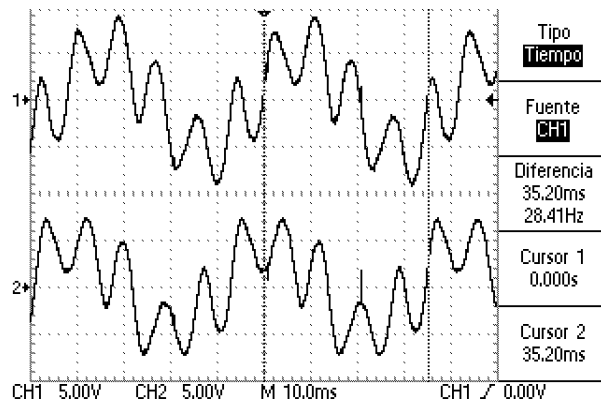


Fig. 54. V y W (ref U) 1300 r.p.m cursores

Como podemos ver, el time/div lo tenemos a 10 ms y eso significa que el periodo de esta onda es de 42 ms. Podemos comprobar que nuestro desfase entre las dos ondas es de 35,2 ms y esto nos da lugar a una diferencia de 301° , resultado coherente ya que la forma de onda de W - U debería estar invertida.

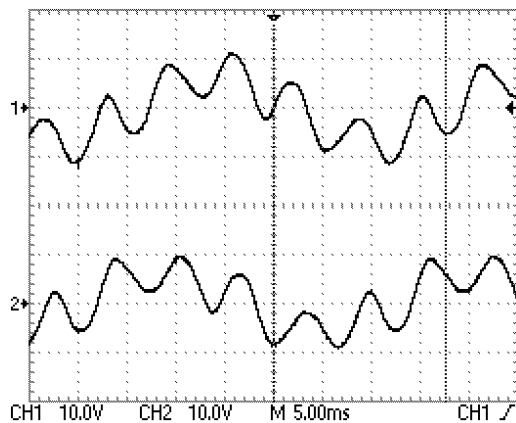


Fig. 55. Tensión V y W (ref U) 1850 r.p.m

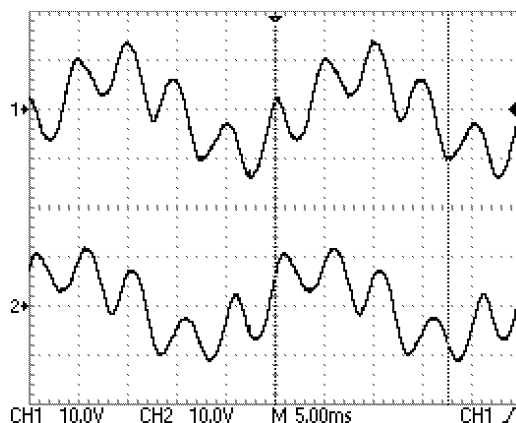


Fig. 56. Tensión V y W (ref U) 2400 r.p.m

8. Vef DE LÍNEA Y FASE EN ESTRELLA

El voltímetro usado es Agilent 34401A 6 $\frac{1}{2}$ dígitos, Fig. 57.



Fig. 57. Voltímetro digital

Valores eficaces de las tensiones individuales de fase

En las Tablas 1,2 y 3 compararé los valores de tensión eficaz en cada fase con la velocidad en r.p.m que en ese momento tiene el taladro. La velocidad la medimos con un tacómetro digital LT Lutron DT-2234B disponible en el laboratorio, Fig. 58.



Fig. 58.. Tacómetro digital para medir la velocidad

Tensión UU'

$V_{RMS}(V)$	4,1	4,48	5	5,68	6,2	6,6
w (r.p.m)	1340	1500	1700	2000	2220	2400

Tabla. 1. Tensión eficaz y velocidad angular

Tensión VV'

$V_{RMS}(V)$	4,2	4,7	5,2	5,75	6,2	6,8
w (r.p.m)	1300	1500	1720	1995	2200	2400

Tabla. 2. Tensión eficaz y velocidad angular

Tensión WW'

$V_{RMS}(V)$	3,35	3,8	4,2	4,8	5,3	5,6
w (r.p.m)	1300	1500	1700	2000	2220	2400

Tabla. 3. Tensión eficaz y velocidad angular

Como se puede observar los valores son similares en cada fase para mismas velocidades. Claramente se puede diferenciar como el aumento de la tensión eficaz está en relación directa con el aumento de la velocidad. El valor máximo que alcanzamos de tensión eficaz es algo menor que 7 V. En teoría, al conectar el generador en estrella, deberíamos lograr unos valores más elevados de tensión pero en nuestro caso no ocurre.

A continuación se muestran la gráfica incluyendo los valores de las tensiones eficaces de cada fase en función de la velocidad de giro del motor.

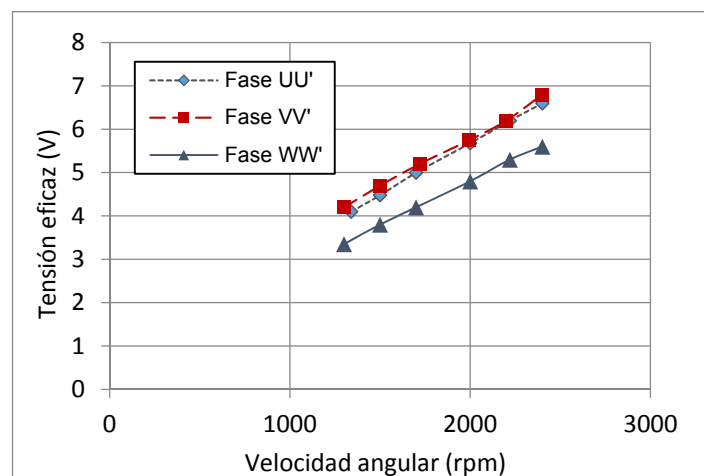


Fig. 59. Gráfica de las tensiones de fase individuales

Valores eficaces de las tensiones compuestas

A continuación se muestran los valores de tensión eficaz de línea en conexión estrella para velocidades mínima, media y máxima. La medida es semejante para cada línea por lo que solo se ha visualizado una de ellas.

V_{RMS} (V)	7,24	5,92	4,62
w (r.p.m)	2400	1850	1400

Tabla. 4. Tensión eficaz y velocidad angular

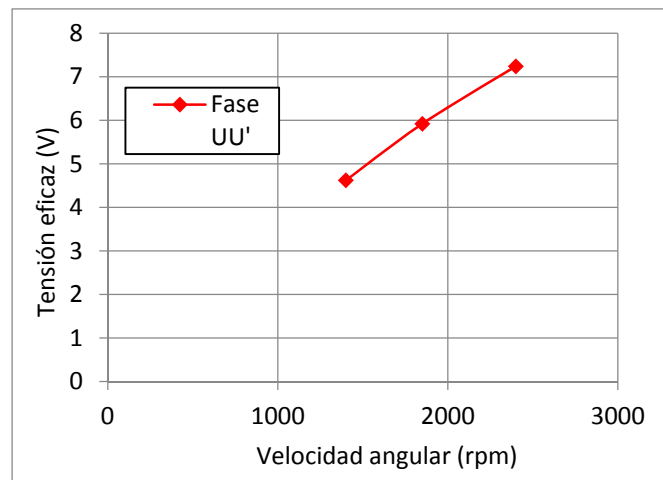


Fig. 60. Gráfica de las tensiones compuestas

En las siguientes figuras aparece el voltímetro en cada una de sus medidas para este tipo de conexión



Fig. 61. Voltímetro digital 2400 rpm



Fig. 62. Voltímetro digital 1850 rpm



Fig. 63. Voltímetro digital 1400 rpm

Como se puede comprobar, el valor máximo en estrella es algo más de 7 V, que se obtiene a la velocidad máxima alcanzada por el taladro. Supuestamente debería haber mayor diferencia entre los valores obtenidos de fase con respecto a los de línea en estrella. La razón por la cual no cumple ese concepto teórico es porque al superponerse los valores de fase no perfectamente sinusoidales y sumarse, su valor resultante no cumple un aumento en $\sqrt{3}$.

El voltaje obtenido a la salida tanto en fase como conexión estrella no es de un valor muy elevado. El máximo supera ligeramente los 7 V. Las razones principales son las siguientes:

- El sistema mecánico creado para diseñar el generador es realizado manualmente, las medidas se trataron de hacer del modo más eficiente y preciso posible pero tiene las características de construcción manual.
- Dentro de estas razones se encuentra que el estator, formado por un material ferromagnético para facilitar la circulación del campo magnético a través de él no encaja con total precisión para que llegue con gran efectividad el campo magnético generado en las bobinas.
- Otro aspecto mecánico es la forma de la lata. Esta última no presenta un aspecto completamente cilíndrico ya que en el desarrollo del proyecto ha ido surgiendo algunos desperfectos que hacen que pierda exactitud su forma. Por supuesto, sigue manteniendo una forma adecuada para cumplir la función buscada en el alternador pero estos pequeños detalles son los que hacen que vaya perdiendo ligeramente efectividad en la generación de voltaje a la salida.
- A todo esto también hay que sumarle el espacio del entrehierro. Para lograr un buen aprovechamiento del campo magnético generado por los imanes, es un aspecto importante que el entrehierro sea de escasa anchura. En nuestro caso

esto podría dar problemas porque dada la situación en la que el rotor se desvíe un poco de su giro perfecto habitual o tenga una zona en la que sobresalga algo más los imanes podría destruirse el sistema al girarlo a gran velocidad.

- La colocación de los imanes también influye en la calidad y amplitud de la señal de salida. A pesar de colocarlos de la manera más precisa posible, la no exactitud de la forma semicircular que deberían formar los imanes en el polo norte y sur en todo el eje del rotor añade otro detalle que resta precisión.
- Y por último la razón principal y fácilmente modificable para lograr mayor voltaje a la salida del alternador es realizar el giro con un taladro de mayor potencia y velocidad. Sin duda, independientemente de la falta de eficiencia en el diseño, con un taladro más potente podríamos lograr altos valores de voltaje. Esto deberíamos hacerlo con cierta cautela ya que una velocidad muy elevada podría dañar el sistema en el caso de funcionar mucho tiempo.

9. EXPLICACIÓN TEÓRICA POSTERIOR DE FORMA DE ONDA

Hasta ahora he nombrado los motivos por los que la forma de onda podía tener esas características. Después de varios intentos, comprobaciones con sensor de efecto Hall, estudios con el programa FEMM y visualización en el osciloscopio de formas de onda se ha podido descubrir claramente cuál es el motivo por el que no logramos una onda sinusoidal y por qué hay un gran cambio a mitad de ciclo que lleva el valor de la fem a valores cercanos a cero.

- En principio se pensó que quizás al pegar los imanes hubiese habido un error en la polaridad. Esta duda se resolvió cuando medimos con el sensor de efecto Hall la polaridad que había en cada zona de imanes y qué ocurría exactamente en esas áreas. Se pudo observar como en toda el área formada por los imanes pegados en polo norte y sur se cumplía que tenía bien definida esa polaridad. Por tanto quedó descartado este error.
- También, después de pensar en las posibilidades de esa forma de onda se valoró que quizás se saturaban los tornillos y no podían soportar mayor campo magnético y por ello la fem disminuía rápidamente a cero. Para comprobar esto, se torció una de las barras y se midió a la vez el valor del campo en un tornillo de la barra torcida para diferentes velocidades.

En la siguiente gráfica muestro los valores de la fem y del campo magnético en la barra habiéndola torcido unos pocos grados.

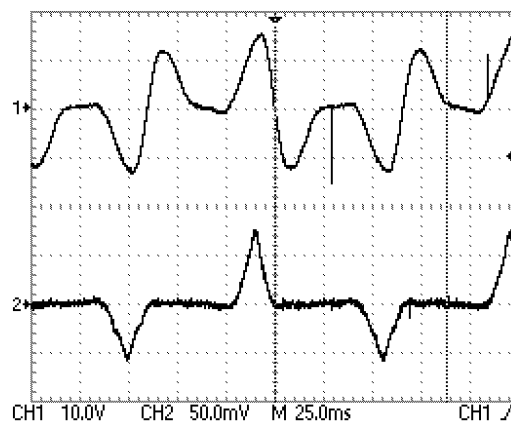


Fig. 64. 1300 rpm barra torcida CH1 Fem, CH2 B

En esta gráfica se observa que el campo no se satura pero que sí que hay dos momentos durante el ciclo que se hace cero y por tanto la fem cae en un momento en el que no debería ocurrir.

9.1. Justificación

Al medir la forma de onda de la variación del campo en un tornillo a través de un sensor de efecto Hall se pudo observar detalladamente cómo era la variación del campo durante todo el ciclo.

Se veía claramente que había una zona de variación de campo en positivo y otra en negativo, haciendo claramente formas sinusoidales. Al mismo tiempo se observaba que había otra zona en la que la variación era cero y coincidía, al simultanear la onda con la fem en la misma fase, que los valores donde no había variación de campo eran los que en la fem hacían llegar a 0 a mitad de semiciclo. Por tanto, en los momentos en los que había variación de campo, la fem tenía una forma adecuada y de gran precisión pero esto no ocurría durante todo el ciclo.

Al comprobar a la vez la fem inducida de una fase y el campo magnético en un tornillo se vio que el momento donde no había variación de campo era cuando el plano que forman los imanes norte y sur estaban formando un ángulo de 90° con el tornillo en el que medimos el campo y la fem de esa fase. Cuando los imanes se encuentran alejados de la bobina en la que se debe inducir una fem, estos no tienen la capacidad suficiente para aplicar una variación de campo y entonces se hace cero. Esto ocurre dos veces por ciclo y coincide con las dos veces en la que la forma sinusoidal de la onda pierde su valor preciso.

Con esta deducción se comprobó que el problema no radicaba ni en la saturación de los tornillos ni en la colocación defectuosa de los imanes en polo norte y sur sino que era puramente del propio diseño de la máquina y la eficiencia de la misma. Con casi total seguridad, el modo en el que está diseñado el estator a través de bobinas colocadas en

serie enroscadas en tornillos, no nos permite obtener una inducción totalmente adecuada en las mismas debida al campo magnético de los imanes y por ellos hay zonas de la onda que salen defectuosas y lejanas a la sinusoide ideal. A pesar de ello se logra una señal medianamente buena y con el desfase buscado de 120° entre cada fase para lograr la señal trifásica.

9.2. Valores de Fem y B con una de las barras del estator giradas

En las siguientes dos gráficas muestro los valores de las fems inducidas en la barra que anteriormente habíamos torcido respecto del eje del generador y otra que se encuentra en posición normal. Se observa como a esta velocidad hay una pequeña diferencia entre las dos barras pero sin llegar a solucionar el tema sinusoidal de la gráfica. El objetivo buscado era descubrir si se saturaban los tornillos y si se suavizaba la onda y adoptaba una forma más sinusoidal.

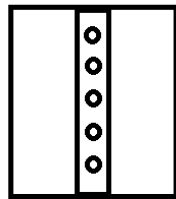


Fig. 65. Barra sin girar

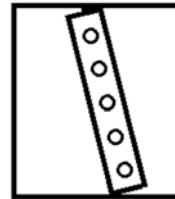


Fig. 66. Barra girada

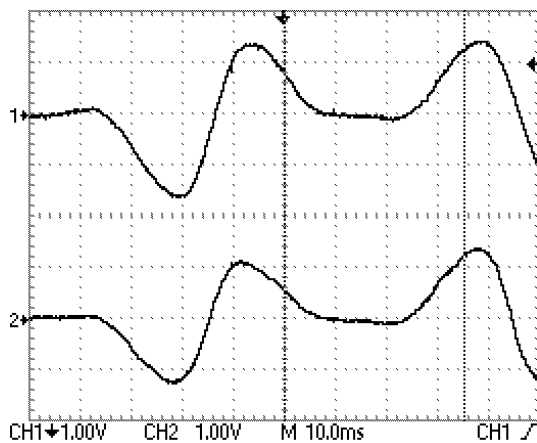


Fig. 67. Fem CH1 girada, CH2 normal

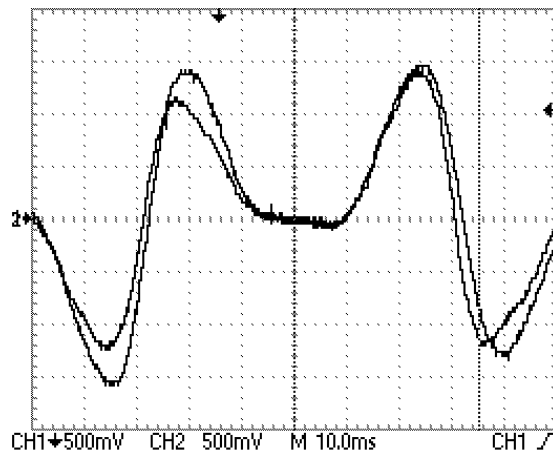


Fig. 68. Fem CH1 girada, CH2 normal

En esta última gráfica se observa cómo la onda adquiere una mejor forma en una de ellas que es la que hemos girado. A pesar de ello no logramos un valor que se parezca a la sinusoide, solo la mejoramos ligeramente.

Para observar los cambios cogemos las mismas gráficas pero a la máxima velocidad que nos permite el motor que es a 2400 rpm. En estos casos repetimos las 3 gráficas.

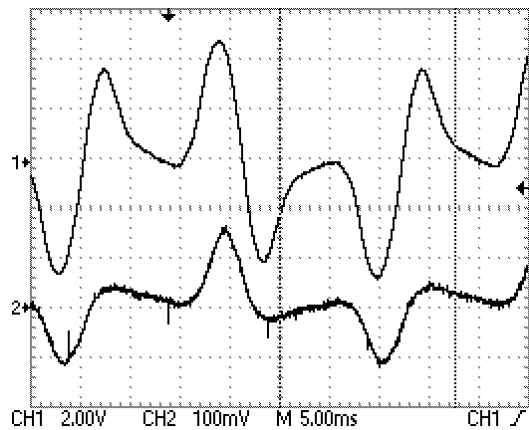


Fig. 69. CH1 fem girada, CH2 B torcida

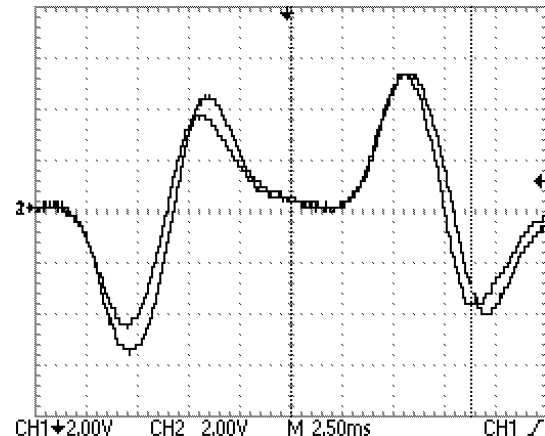


Fig. 70. CH1 fem girada, CH2 fem normal

Para ver la comparación de la gráfica cuando movemos la barra respecto a la misma con la barra sin torcer mostramos las siguientes gráficas con los valores de la fem y el campo en la misma barra pero en posición normal.

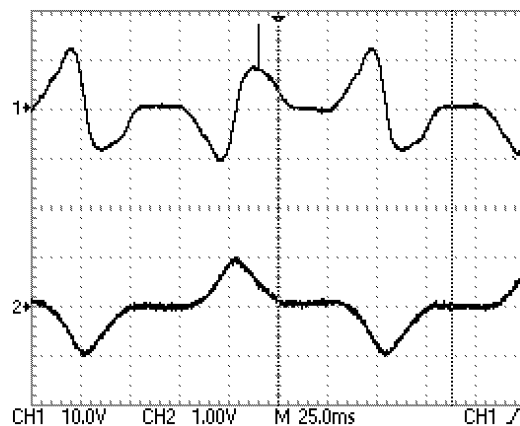


Fig. 71. 1300 CH1 fem, CH2 B normal

De estas gráficas se pudo deducir que el problema de nuestras formas de onda no era que se saturase el campo sino que había dos momentos en los que se hacía cero y se mantenía allí un tiempo.

Observando detenidamente las gráficas se veía claramente que el campo se mantiene en valor cero en los momentos en que los imanes se encuentran alejados de la barra a la que deben inducir campo magnético en sus bobinas. Esto significa que los imanes y el sistema diseñado no tiene tanto alcance para que los polo norte y sur de

nuestros imanes actúen sobre una misma barra durante un ciclo completo, es decir, 180° el polo norte y 180° el sur. De este modo sí que lograríamos una señal sinusoidal.

9.3. Adición de un par de hileras de imanes por cada polo

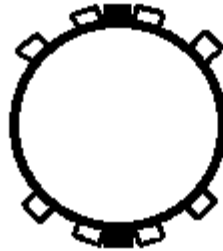


Fig. 72. 4 hileras añadidas

Colocamos una hilera más de imanes en cada polo para ver qué reacción tenía y el resultado fue que nos aumentaba el valor del campo y por tanto de la fem pero la onda seguía teniendo el mismo aspecto.

La gráfica resultante del valor del campo inducido y la fem en una barra se muestra en las Fig. 73 y 74.

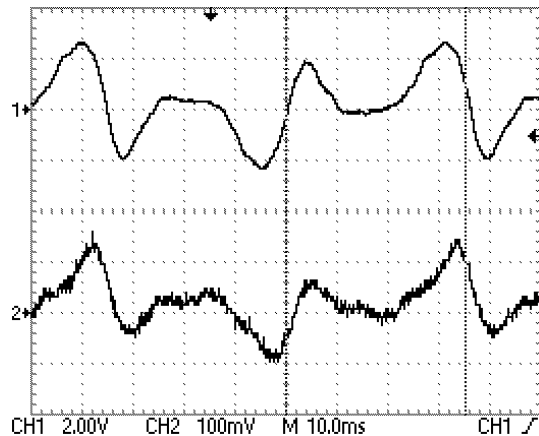


Fig. 73. CH1 Fem , CH2 B con 4 hileras

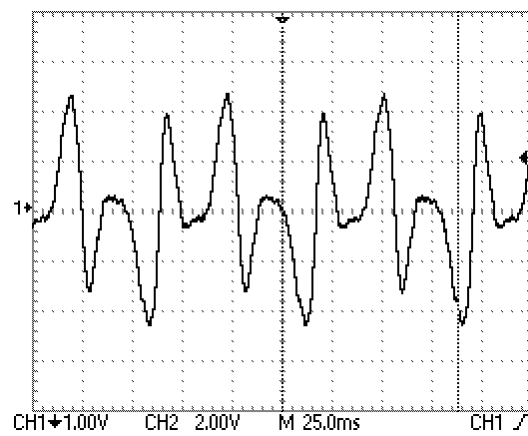


Fig. 74. Fem U con 4 hileras añadidas

En esta gráfica vemos como el campo ahora se divide en dos pulsos para el lado negativo y dos para el positivo, esto es debido a que ahora actúan otras hileras de imanes a diferente distancia.

Observamos que ahora la onda permanece menos espacio de tiempo en el valor cero pero aún dista mucho de la forma sinusoidal que buscamos. Incluso se observa como en algún momento invade el polo opuesto cuando no debería hacerlo.

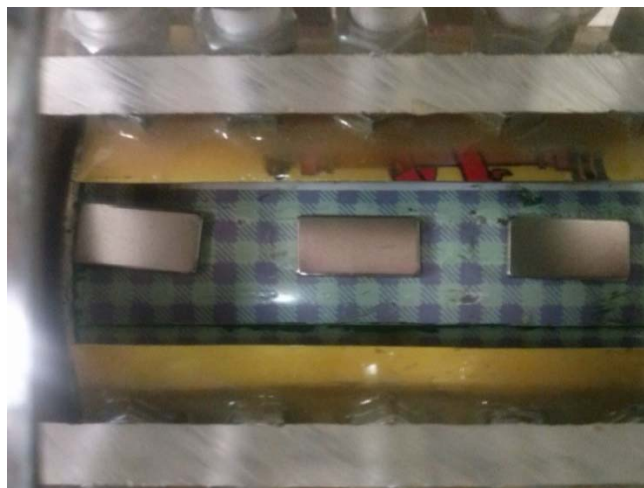


Fig. 75. Hilera de imanes añadida en un polo

9.4. Adición de dos pares de hileras de imanes en polo Norte

Si ahora añadimos 4 hileras de imanes en un solo polo la onda se rectifica y mejora algo aunque no es la solución perfecta a nuestro problema. La forma de la lata y la potencia del campo magnético creado por estos imanes hacen que solo sea posible realizar el proceso con 4 hileras añadidas en un solo polo y a una determinada velocidad. Si la superamos los imanes saltan ya que no los teníamos pegados y la posición en la que están no es una muy estable y está sujeta a las fuerzas creadas por los imanes cercanos.

En la Fig. 76 vemos claramente como en el polo norte el valor del campo magnético es mayor ya que hemos aumentado el número de imanes colocados y que la fem se divide en diferentes secciones logrando que tengo mucho menos espacio de tiempo su valor en cero y por tanto mayor semejanza a una onda sinusoidal. En la Fig. 76 mostramos únicamente el valor de la fem en la fase W.

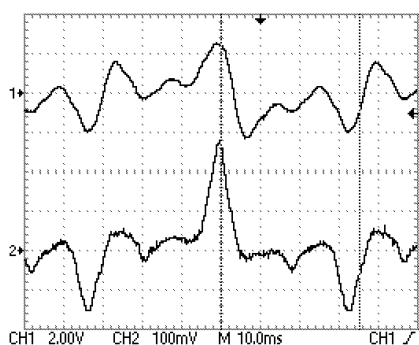


Fig. 76. 4 hileras CH1 Fem W, CH2 B

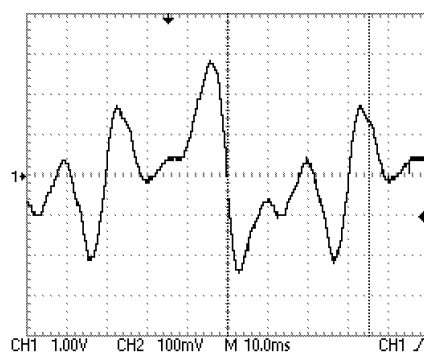


Fig. 77. Fem W un solo polo muy imantado

Aquí se comprueba como tenemos una onda más sinusoidal, con menor tiempo en cero y con diferente momentos en los que cambia de forma debido a la acción de las diferentes hileras de imanes colocadas.

10. FUNCIONAMIENTO COMO MOTOR SÍNCRONO

Con el objetivo de saber si podíamos conectar el alternador trifásico diseñado con el motor trifásico hecho por otro compañero se calcularon los valores necesarios para alimentar dicho motor.

Se vieron las tensiones y corrientes máximas que generaba nuestro alternador y posteriormente se midieron los valores que necesitaba el motor para comenzar a girar. Después de unos intentos se dedujo que no podíamos alimentarlo dentro de unos valores en los que nuestro alternador no tuviese deterioro. Las cifras alcanzadas eran cercanas a las que necesitaba el motor pero superar los valores críticos suponían poner en peligro el bobinado del alternador y destruir el sistema innecesariamente.

Para conseguir estos valores se conectó el alternador en estrella y en triángulo para observar los diferentes valores logrados.

En primer lugar lo que se hizo es comprobar si el alternador diseñado podía funcionar como motor alimentándolo a través del autotransformador. Para ello se escogió la conexión en estrella porque así sus fases soportan menor tensión.

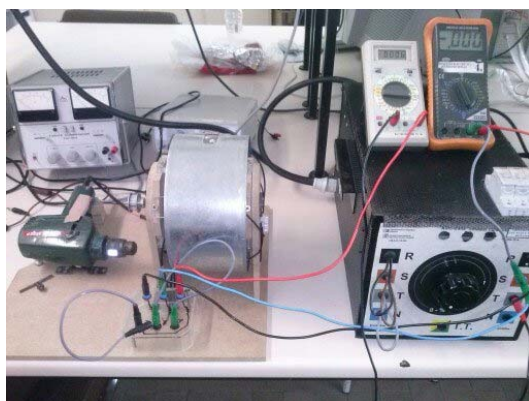


Fig. 78. Alternador como motor en estrella



Fig. 79. V línea y I fase

Los valores máximos que pueden soportar nuestros bobinados debido a la anchura del hilo de cobre y su material está entorno a los 1,5 A, por tanto no conviene superar esos valores si no queremos poner en peligro el sistema diseñado.

Con estos valores de corriente y tensión de la foto nuestro alternador no era capaz de funcionar como motor y superarlos supondría poner en peligro el bobinado.

Se probó haciendo un pequeño impulso al eje del rotor para ver si con esa pequeña inercia de comienzo el alternador era capaz de empezar a girar como motor. Probando el impulso en las dos direcciones se vio que era incapaz de girar continuamente.



Fig. 80. Impulso en el eje del rotor

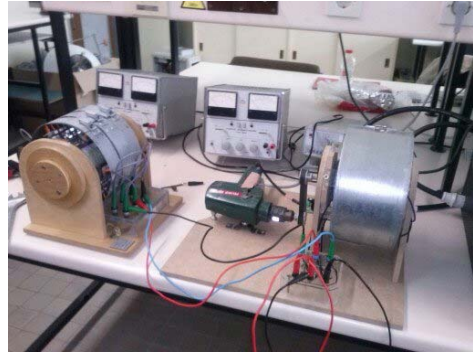


Fig. 81. Alimentación de motor con alternador

El siguiente paso fue comprobar si la tensión y corriente proporcionada por nuestro alternador era capaz de alimentar al motor diseñado por el otro compañero en otro proyecto.

Se conectó el motor en modo triángulo y el alternador en modo estrella para lograr la mayor eficiencia en el paso de potencia del uno al otro. Se hicieron diferentes pruebas a muchas velocidades llegando a alcanzar la máxima pero aun así no era suficiente para lograr girar el motor. También se valoró la posibilidad de que necesitase un pequeño giro externo manual que le proporcionase la inercia necesaria para comenzar a girar. De todos los diversos modos probados no se consiguió hacer girar al motor.

Para llegar a conclusiones eficaces se alimentó el motor del compañero con el autotransformador y se midió cuál era la tensión que necesitaba para que en conexión triángulo comenzase a girar.



Fig. 82. Alimentación de motor en triángulo



Fig. 83. V eficaz que arranca al motor

La tensión mínima que hacía arrancar el motor sin la inercia externa manual inicial era la que aparece la siguiente imagen, con un valor de 9,7 V.

Los 9,7 V eficaces que nos mide el voltímetro son los que proporcionamos desde el autotransformador consiguiendo que arranque. Hay que tener en cuenta que la amplitud es $\sqrt{2}$ veces mayor que el valor eficaz, por tanto nuestro alternador debería tener esa amplitud y muy cercano valor eficaz. La amplitud que nos medía nuestro alternador en conexión estrella es de 13 V aproximadamente y por lo tanto cumple el requisito de amplitud. Pero en el valor eficaz no ocurre lo mismo y es principalmente porque la forma de onda de nuestro alternador no es perfectamente sinusoidal. Nuestro valor eficaz máximo logrado a la mayor velocidad es de 6,8 V. No está tan lejos de los 9,7 V necesarios por el motor para girar pero no es suficiente para que incluso con inercia externa no logremos que gire.

El valor de corriente de fase medido en el motor necesario para comenzar a girar es el que aparece en la siguiente imagen.



Fig. 84. *I ef mín para arrancar motor*



Fig. 85. *Alimentación del motor en estrella*

Como última prueba se conectó el motor en estrella y nuestro alternador en triángulo para medir la corriente que le llegaba al motor y ver si realmente había gran diferencia con los 0,25 A que necesitaba para arrancarlo.

La corriente que nos proporcionaba nuestro alternador a la velocidad máxima aparece en la siguiente imagen, con un valor eficaz de 0,14 A.



Fig. 86. *Valor de corriente generado por nuestro alternador*

Como se puede comprobar no llega a la corriente necesaria para arrancar el motor, por tanto no cumple los requisitos de tensión y corriente eficaz solicitada para arrancar el motor en cualquiera de las conexiones.

11. RECTIFICACIÓN A CONTINUA

Dado que la señal obtenida por el alternador no es de gran amplitud y su forma no es muy sinusoidal, se decidió convertir la tensión en alterna en un valor en continua. Para ello se utilizó un puente 6 diodos y un condensador de alto valor que filtrase la onda resultante. La capacidad del condensador usado es de $4700\ \mu\text{F}$.

La potencia suministrada por el alternador es baja, ya que el producto de su tensión eficaz por su corriente no nos da un valor elevado. Por ello la mejor solución planteada fue convertirla a una señal continua que tuviese cierta calidad y nos permitiese alimentar a unas cargas suministrándoles un valor de tensión y corriente adecuados.

En la siguiente gráfica se muestra el valor de continua conseguido en vacío. Como se puede comprobar, se logra un valor de tensión entorno a los 12 V pero que disminuye notablemente al conectar una carga ya que la potencia posible suministrada no es muy elevada.

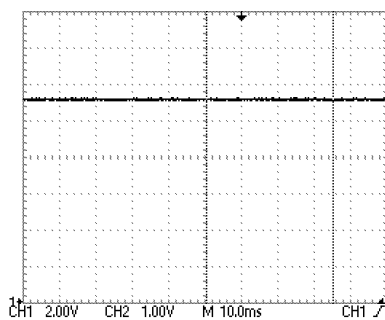


Fig. 87. Tensión de continua obtenida con el rectificador

Se puede observar como el nivel cero se encuentra en la parte baja de la gráfica y por tanto eso significa que el valor de continua lo tenemos casi en 12 V. Esta gran calidad de la señal continua es conseguida gracias al valor elevado de condensador puesto entre los extremos del puente de 6 diodos.

En la siguiente foto se muestra el circuito formado por el puente de 6 diodos, el condensador y las bananas que vienen a ser la alimentación de las 3 fases.

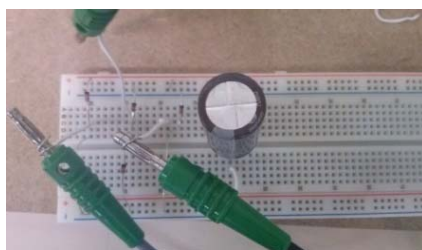


Fig. 88. Circuito formado por diodos y condensador

12. PLANOS Y DIBUJOS DEL ALTERNADOR

En las siguientes páginas se muestran imágenes del diseño hecho con el programa Solid Works en el que se representa el modelo del alternador con las medidas precisas.

Las vistas que se han recogido para mostrar son desde diferentes ángulos.

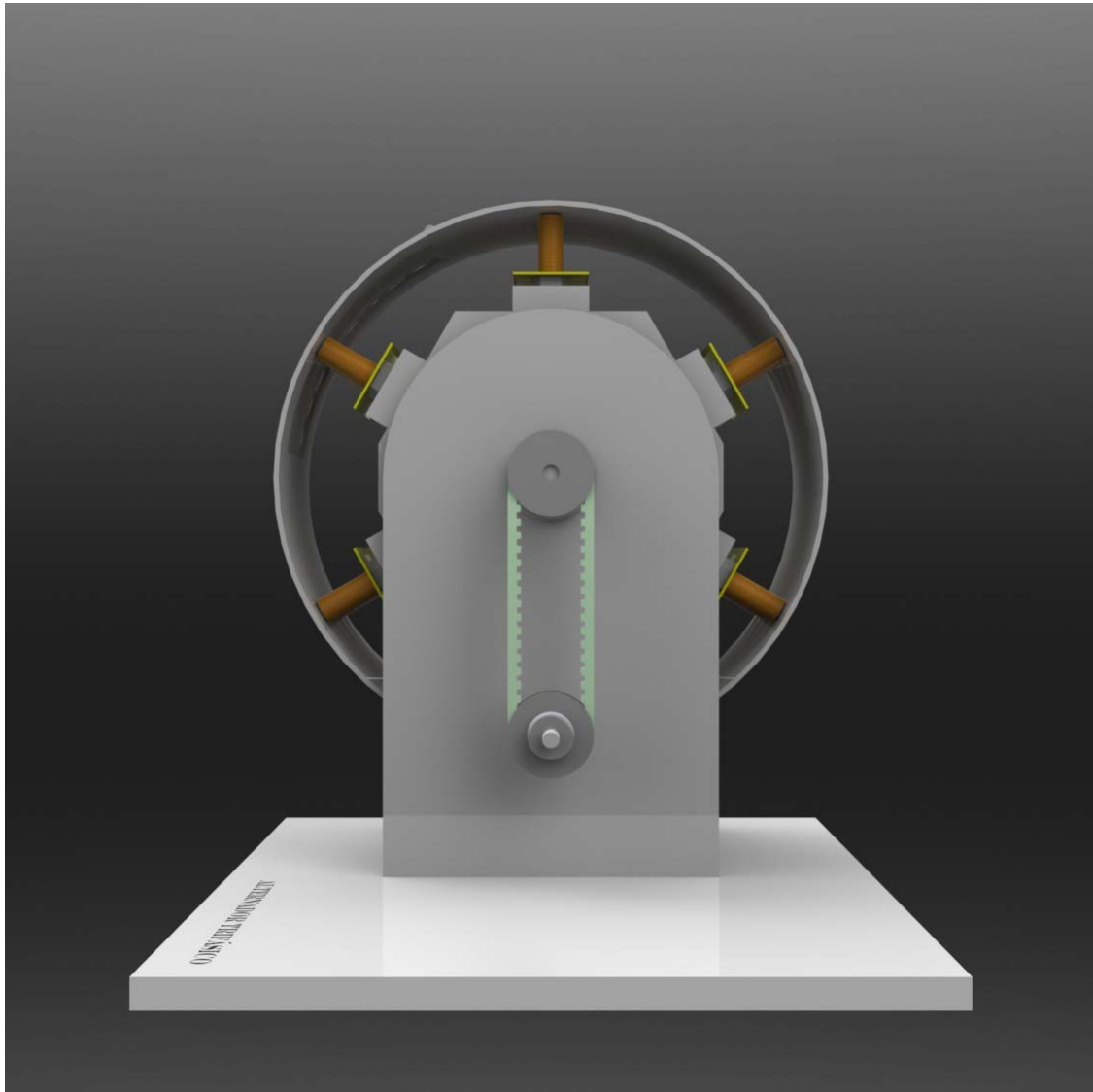


Fig. 89. Alzado alternador

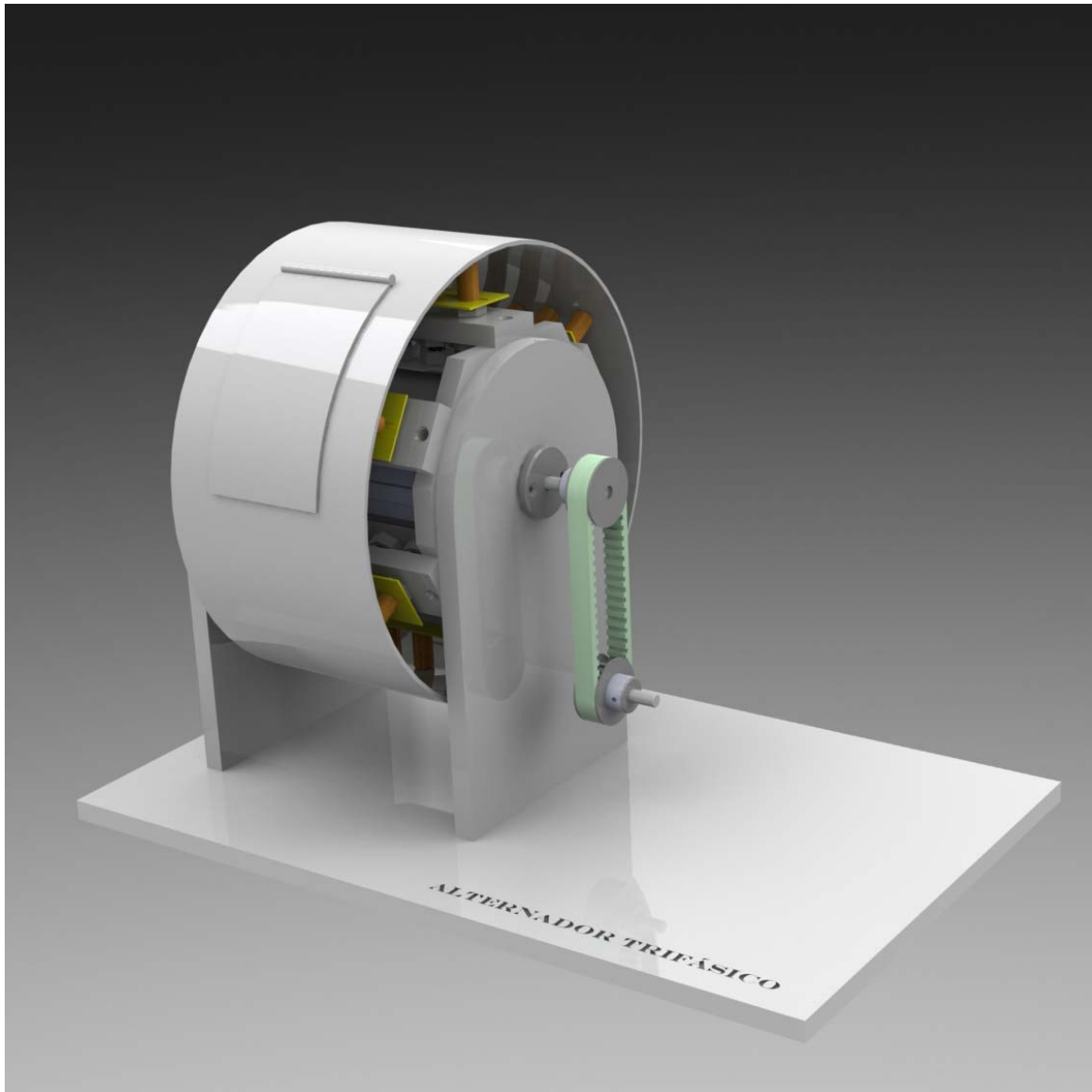


Fig. 90. Vista perspectiva isométrica Alternador

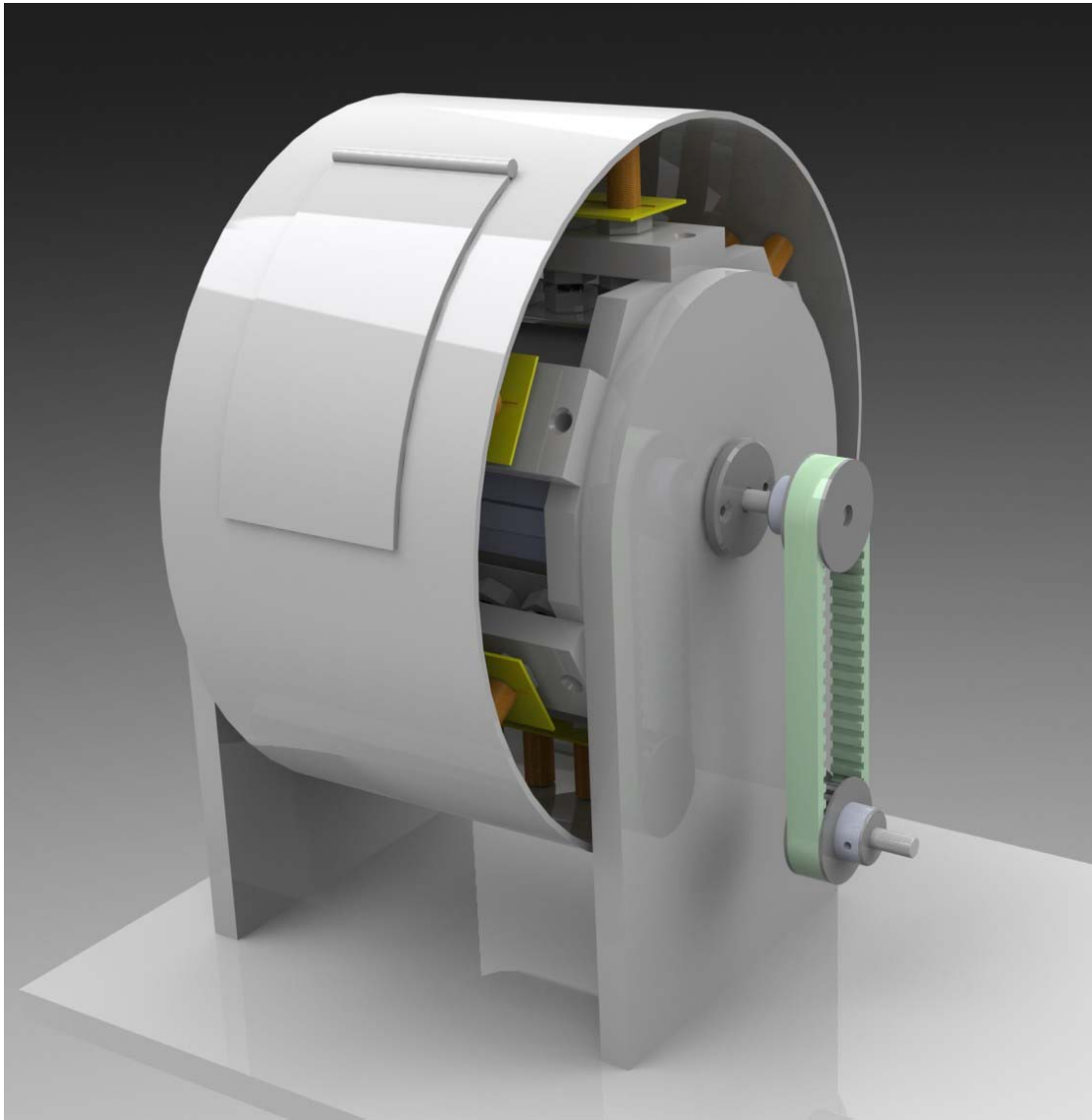


Fig. 91. Imagen del sistema desde cerca

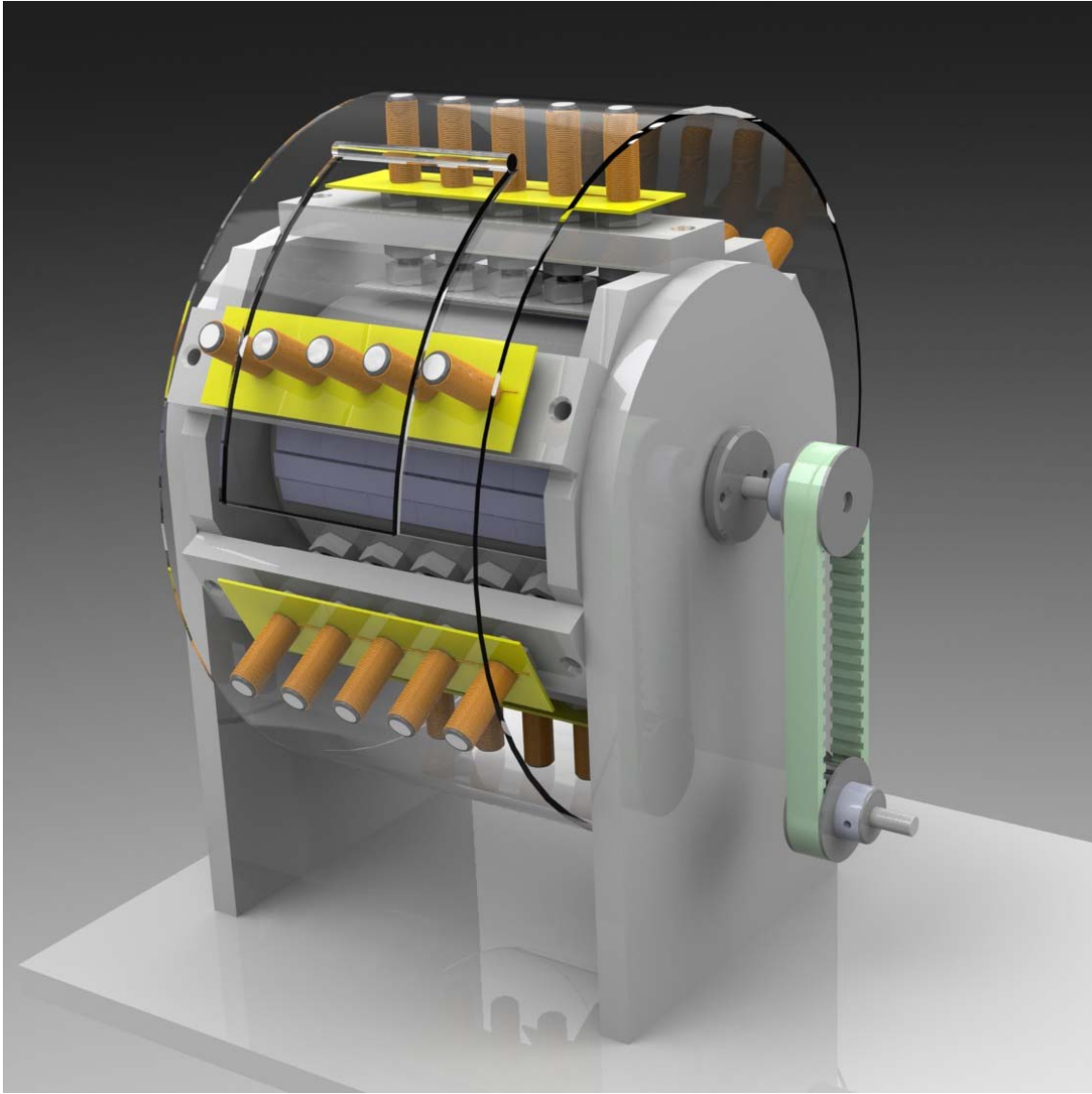


Fig. 92. *Vista interior del alternador*

13. BIBLIOGRAFÍA

- Apuntes de Regulación de Máquinas Eléctricas. Juan Luis Villa
- Proyecto “Generador Síncrono de Imanes Permanentes”. Ángel Pérez Orte
- Física para la Ciencia y la Tecnología. Volumen 2. Electricidad y Magnetismo, Luz. Tipler Mosca. 6ª edición. Editorial Reverté
- Física para Ciencias e Ingeniería con Física Moderna. Volumen 2. 7ª edición. Serway-Jewett.
- Máquinas Eléctricas. J.Chapman, Stephen.
- Apuntes Electricidad y Electrometría. Jesús Letosa y Antonio Usón.
- Apuntes Electrotecnia, Máquinas Eléctricas. Antonio Usón

14. AGRADECIMIENTOS

En este proyecto me han ayudado varias personas, algunas en temas técnicos en los que necesitaba de una mano externa y otras con su apoyo, motivación e interés en mi progreso.

En primer lugar a mi profesor Antonio Usón que me ha ayudado en gran cantidad de tarea teniendo otras obligaciones importantes que hacer mientras me atendía. Él me ha guiado en lo principal y necesario para poder avanzar y además solucionado cualquier duda que me surgiese en lo teórico y en lo práctico. Ha encontrado siempre el momento de poder atenderme y en un proyecto de este tipo la ayuda del profesor ha sido imprescindible.

En segundo lugar a mi primo Carlos Gracia, que también con otras obligaciones que atender ha estado conmigo en partes en las que necesitaba completamente de su ayuda. Me ha echado una mano muy importante con algunas herramientas y diseños, aprovechando su experiencia laboral en este terreno y planteándome alternativas que a mí me resultaba más difícil de concluir por mi desconocimiento.

Además a mi madre Amparo Fuertes, preguntándome e interesándose siempre para que le dedicara tiempo y lo hiciese bien, a ella también le debo mi persistencia y perseverancia en acabar la carrera en momentos en los que la motivación era más bien escasa. También a mis dos hermanas Diana y Fadia, que de un modo u otro han estado pendiente de mi evolución del trabajo y han compartido mis éxitos durante la carrera.

Por último es importante que nombre a mis amigos, aquellos que seguían mi trabajo, han escuchado mis largas conversaciones sobre el mismo y muchos de ellos también han vivido la dificultad de estudiar una carrera universitaria. Para mí también han sido un apoyo y un referente a la hora de esforzarme y dedicarle empeño, todos ellos son buenos profesionales.

He tratado también de agradecerles a estas personas su ayuda en mi proyecto de diversas maneras que no aparecen aquí escritas, muchas veces nombrándolos en mis círculos, hablando de sus cualidades humanas y profesionales y simplemente mostrándoselo a ellos en persona, que para mí es mi más sincero agradecimiento.