

Trabajo Fin de Grado

Herramienta basada en el método de elementos finitos (Femm 2D) para el desarrollo de generadores montados en bicicleta.

Autor

Víctor Muñoz Forcano

Director

Antonio Usón Sardaña

Herramienta basada en el método de elementos finitos (Femm 2D) para el desarrollo de generadores montados en bicicleta.

RESUMEN

En este documento se describe el desarrollo del modelado de un generador eléctrico montado en bicicleta para su análisis mediante el Método de Elementos Finitos (M.E.F). La finalidad de este trabajo ha sido crear una herramienta informática que pueda predecir resultados para diferentes disposiciones de las piezas que constituyen el generador. De este modo, se intenta explorar sus limitaciones minimizando el coste económico y de tiempo de ensayos que supondría la creación de numerosos prototipos.

Para la realización del modelo y la resolución numérica se ha empleado el programa Femm 2D, desarrollado por el Dr. David Meeker, y de libre distribución. Este realiza el análisis electromagnético para cada instante temporal interconectado con el programa comercial Matlab, desarrollado por MathWorks. Para la realización de las piezas del prototipo se ha empleado el programa comercial SolidWorks desarrollado por Solidworks Corp. junto con una impresora 3D.

Work tool based on the method of finite elements (Femm 2D) for the development of generators assembled in a bicycle.

ABSTRACT

In this document, it is described the modelling progress of a commercial generator assembled in a bicycle for its analysis by means of the Finite Elements Method (F.E.M.). The purpose of this degree final project has been to create a computer tool which is able to predict results for different generator dispositions. Thus, it is attempted to examine its limitations by reducing the economic and temporal costs that the making of several prototypes would mean.

For the execution of the modelling and numeric resolution, it has been used the free-open programme Femm 2D, developed by Dr. David Meeker. This programme carries out the electromagnetic analysis for each interconnected temporal instant with the commercial programme Matlab developed by MathWorks. For the execution of the prototype pieces, it has been used the commercial programme SolidWorks developed by SolidWorks Corp. and built up with a 3d printer.

ÍNDICE:

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
<i>Origen del proyecto, fases y continuidad del mismo.</i>	<i>1</i>
<i>Herramientas informáticas.</i>	<i>2</i>
CAPÍTULO 2: PROTOTIPO.....	4
<i>Partes y dimensiones.....</i>	<i>4</i>
<i>Modelado del sistema físico en Femm.....</i>	<i>7</i>
CAPÍTULO 3: SIMULACIÓN NUMÉRICA Y PARAMETRIZACIÓN.....	18
<i>Condiciones previas para el funcionamiento de la simulación.</i>	<i>18</i>
<i>Diagrama de flujo.....</i>	<i>18</i>
<i>Variables de entrada.....</i>	<i>21</i>
<i>Variables de salida.....</i>	<i>29</i>
CAPÍTULO 4: RESULTADOS.	38
<i>Caso de estudio.....</i>	<i>38</i>
<i>Verificación experimental.....</i>	<i>41</i>

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1.1. Objetivos y fases del generador.	1
Figura 1.2. Producto comercial de la empresa Reelight.	2
Figura 1.3. Diferentes mallados del espacio del sistema físico.	2
Figura 2.1. Vista frontal del prototipo.	4
Figura 2.2. Detalle del mecanismo de ajuste de la bobina.	5
Figura 2.3. Detalle de la bobina.	5
Figura 2.4. Detalle del imán.	6
Figura 2.5. Detalle de la separación bobina-imán.	6
Figura 2.6. Paso de modelo 3D a 2D.	7
Figura 2.7. Curva de saturación [3] y coercitividad requerida en Femm.	8
Figura 2.8. Ajuste del valor de la coercitividad en Femm.	9
Figura 2.9. Curvas B-H de los diferentes núcleos.	10
Figura 2.10. Curvas B-H de los diferentes núcleos ampliada.	10
Figura 2.11. Valor de B para el volumen del núcleo.	10
Figura 2.12. Tensiones de simulación de los diferentes núcleos.	11
Figura 2.13. Tensiones de simulación de los diferentes núcleos ampliada.	11
Figura 2.14. Valor máximo de B y H en el interior del núcleo y zona de trabajo.	12
Figura 2.15. Zona lineal de actuación del núcleo de hierro.	13
Figura 2.16. Disposición del campo simétrica en el interior del núcleo y real.	14
Figura 2.17. Histéresis de materiales ferromagnéticos [6].	14
Figura 2.18. Detalle de la remanencia del núcleo con la solución adoptada.	15
Figura 2.19. Esquema del alabeo del imán.	16
Figura 2.20. Comparación de las tensiones obtenidas con y sin alabeo.	16
Figura 2.21. Comparación de las tensiones obtenidas con y sin alabeo sobrepuestas.	17
Figura 2.22. Circuito equivalente del conjunto bobina-carga.	17
Figura 3.1. Diagrama de flujo simplificado del programa simulador.	20
Figura 3.2. Niveles de tabulación de las variables.	21
Figura 3.3. Variable estructurada resultados.	29
Figura 3.4. Variables y gráficos guardados.	29
Figura 3.5. Tiempo restante.	30
Figura 3.6. 'Gráficos1.fig' (plano 2.1).	30
Figura 3.7. 'Gráficos2.fig' (plano 2.2).	31
Figura 3.8. 'Gráficos3.fig' (plano 2.3).	31
Figura 3.9. 'Gráficos4.fig' (plano 2.4).	32
Figura 3.10. 'Gráficos5.fig' (plano 2.5).	33
Figura 3.11. 'Gráficos6.fig' (plano 2.6.1).	33
Figura 3.12. 'Gráficos6.fig' (plano 2.6.2).	34
Figura 3.13. 'Gráficos7.fig' (plano 2.7.1).	34
Figura 3.14. 'Gráficos7_osc.fig' (plano 2.7.2).	35
Figura 3.15. 'Gráficos8.fig' (plano 2.8.1).	36
Figura 3.16. 'Gráficos8.fig' (plano 2.8.2).	36
Figura 3.17. 'Gráficos9.fig' (plano 2.9.1).	37
Figura 3.18. 'Gráficos9_osc.fig' (plano 2.9.2).	37
Figura 3.19. 'Gráficos17.fig' (plano 2.10).	37
Figura 4.1. Ruido de la señal de tensión del osciloscopio.	41
Figura 4.2. Detalle de la construcción de la tensión del osciloscopio en el periodo.	42
Figura 4.3. Captura de la frecuencia del periodo de giro de la rueda.	42

Figura 4.4. Armónicos del prototipo para el paso del imán (detalle).	43
Figura 4.5. Armónicos del prototipo para el periodo de giro (periodo).	43
Figura 4.6. Armónicos del prototipo para 18 imanes (periodo).	43

LISTA DE TABLAS.

Tabla 2.1. Rango de valores de la coercitividad aportados por el fabricante.	8
Tabla 2.2. Datos obtenidos en la medición de campo del imán.	8
Tabla 2.3. Tabla de medidas estándar de la circunferencia de los neumáticos.	15
Tabla 3.1. Esquema resumen de las variables de entrada para el prototipo en detalle.	28
Tabla 4.1. Posibles combinaciones de la bobina según el peso del cobre.	38
Tabla 4.2. Valores de las bobinas que cumplen con los requisitos.	39
Tabla 4.3. Esquema resumen de las variables de entrada para tabla de Anexo 3.1.	40
Tabla 4.4. Semejanza entre la tensión simulada y la del osciloscopio.	41

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.

Origen del proyecto, fases y continuidad del mismo.

La creciente demanda energética de los dispositivos electrónicos portátiles sumada a la insuficiente capacidad de almacenamiento de las baterías actuales, hacen que sea necesario disponer de fuentes de energía externa y alternativa a la red. Por ello, se plantea la creación de un generador de fem sin fricción montado en bicicleta, de especial utilidad en móviles y luces. En el presente proyecto se propone la creación de una herramienta que pueda predecir resultados para comprobar si es factible, al menos en una primera fase, el desarrollo del producto (ver *Figura 1*).

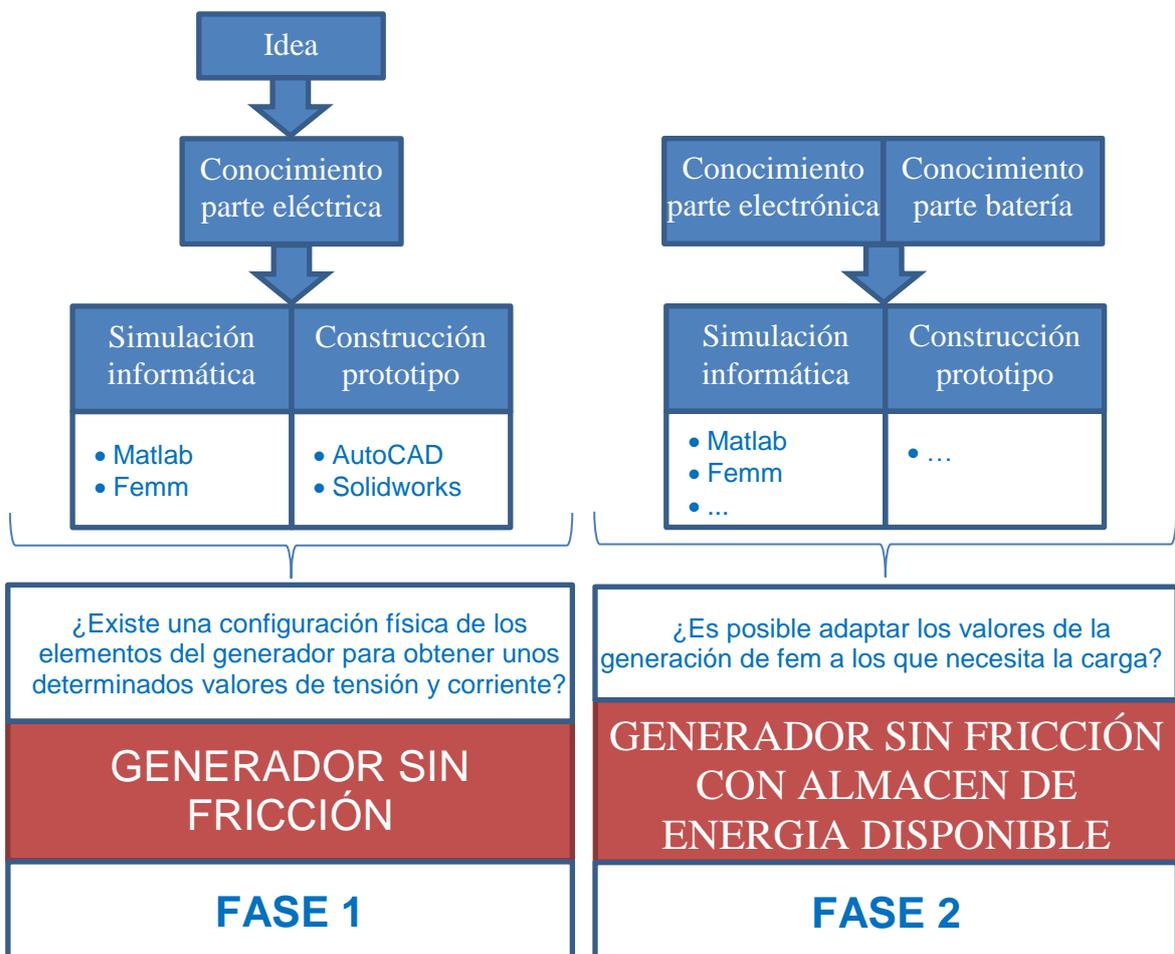


Figura 1.1. Objetivos y fases del generador.

El funcionamiento es simple, se hacen pasar los imanes anclados a los radios de manera que hagan variar el flujo abrazado por las espiras de la bobina (ver *Figura 1.2*). Este sistema de producción de energía tiene su precedente en la empresa danesa [Reelight](#) [1]. Son capaces de dar servicio a una variada gama de luces LEDs de manera continua y pulsante, con un máximo de cuatro imanes colocados en los radios.

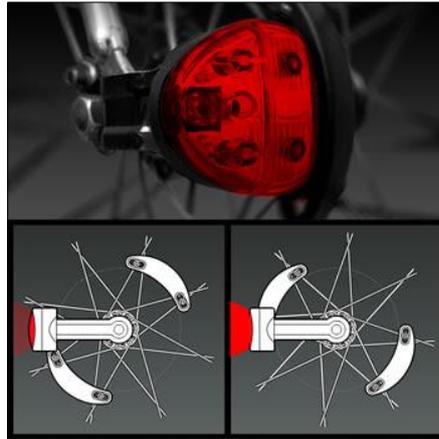


Figura 1.2. Producto comercial de la empresa [Reelight](#).

Herramientas informáticas.

Femm 2D.

Los problemas de optimización y perfeccionamiento de los sistemas físicos en ingeniería eléctrica están ligados al análisis de las cuatro ecuaciones de Maxwell, que rigen el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos presentes en dichos sistemas. La aplicación de estas ecuaciones a casos particulares con una geometría, material y evolución espacial y temporal únicos, da lugar a ecuaciones diferenciales no lineales en derivadas parciales muy complicadas de resolver analíticamente.

Un procedimiento alternativo al analítico para resolver estas ecuaciones diferenciales es mediante su resolución numérica. La viabilidad de este método ha dependido de la capacidad de cálculo de las máquinas que el ingeniero ha tenido a su alcance [2].

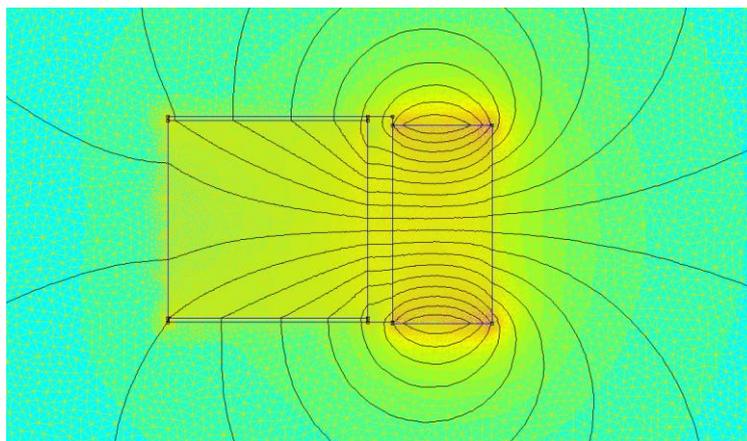


Figura 1.3. Diferentes mallados del espacio del sistema físico.

Uno de estos métodos numéricos de resolución de ecuaciones diferenciales es el método de elementos finitos (M.E.F). Con el M.E.F se discretiza el espacio en donde existen los campos electromagnéticos en tetraedros (triángulos si es 2D), obteniéndose los valores de un potencial (escalar o vectorial) del que posteriormente se obtienen los vectores \vec{B} y \vec{H} en cada uno de los vértices de los tetraedros. Sin embargo, no deja de ser un método numérico

aproximado de cálculo y los prototipos siguen siendo necesarios, aunque en menor número.

Matlab.

Es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio. Permite hacer llamadas a Femm 2D tanto en la etapa de preprocesado como en la de postprocesado, posibilitando automatizar tareas como la creación de esquemas Femm, introducción, extracción, tratamiento y visualización de los datos.

CAPÍTULO 2: PROTOTIPO.

Partes y dimensiones.

Se realizó un prototipo del generador con ayuda de una impresora 3D. Fue instalado en el laboratorio de proyectos del dpto. de Ing. Eléctrica. A continuación se describen las partes y dimensiones del prototipo.

En la Figura 2.1 se muestran y numeran las diferentes piezas de las que consta el prototipo. A continuación se describen con detalle cada una de dichas piezas.

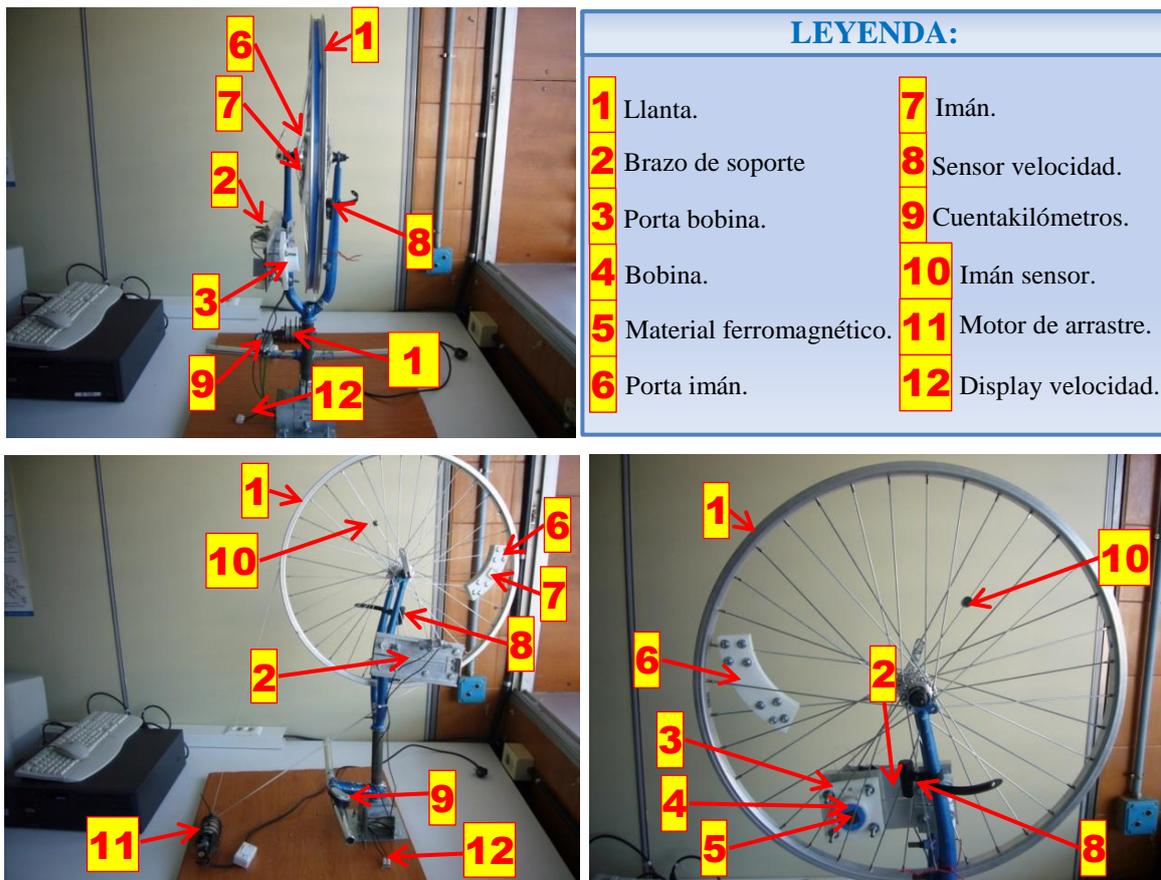


Figura 2.1. Vista frontal del prototipo.

1) Llanta.

Se trata de una llanta de aluminio de bicicleta de 26" con 36 radios (18 por cara). Ver Anexo 1.1.

2) Brazo de soporte.

Realizado con tiras y perfiles de aluminio, soporta la pieza que aloja a la bobina. Se utiliza para alejar la bobina de la horquilla de acero, la cual puede influir desviando el flujo magnético debido a su alta permeabilidad magnética μ . Al instalarlo se observa un alabeo de las chapas del brazo debido a la interacción del conjunto imán-bobina. En el apartado

Alabeo en la página 16 se realiza una aproximación a los efectos que produce esta perturbación.

3) *Porta bobina.*

Aloja la bobina y permite regular el ángulo y la distancia al imán mediante un mecanismo de varillas roscadas y tuercas. Realizada mediante diseño 3D (Solidworks) y posterior impresión 3D en material PLA (poliácido láctico), que no influye en el circuito magnético debido a su bajo valor de permeabilidad magnética μ , cercano al del vacío μ_0 . Ver Anexo 1.5.

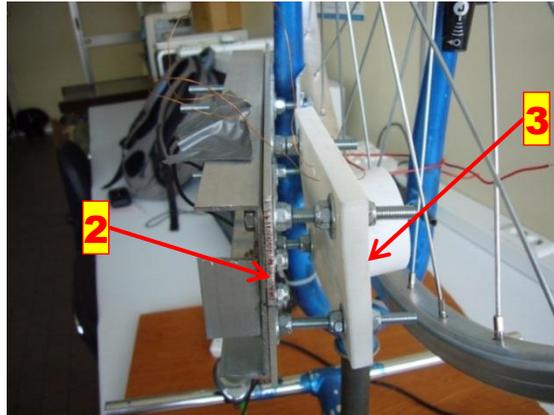


Figura 2.2. Detalle del mecanismo de ajuste de la bobina.

4) *Bobina.*

Contiene el material ferromagnético y las 128 espiras de cobre. El material tiene las mismas propiedades mencionadas en el apartado *Porta bobina* más atrás. Ver Anexo 1.4.

5) *Material ferromagnético.*

Compuesto por chapa magnética de 20x20x1 mm procedente de un transformador. Al agrupar 20 chapas se obtiene un núcleo de dimensiones 20x20x20 mm. Durante el embutido de las chapas en la bobina surgieron dificultades que obligaron a colocar 19. Se considerará que no tiene efecto alguno aunque se pueda obtener una densidad de flujo ligeramente menor a la esperada.

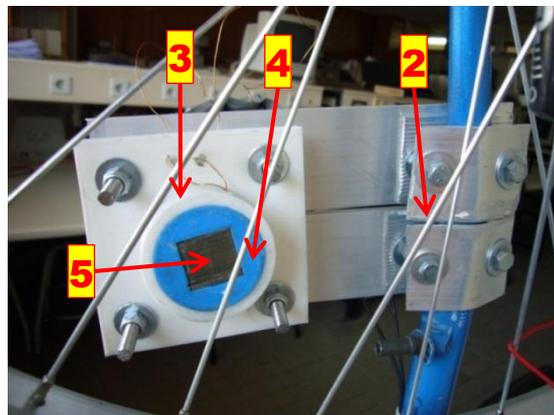


Figura 2.3. Detalle de la bobina.

6) Porta imán.

Consta de 2 piezas que se atornillan fijándose a los radios de la bicicleta. El material tiene las mismas propiedades mencionadas en el *Porta bobina*, en la página 5. Ver *Anexos 1.6 y 1.7*.

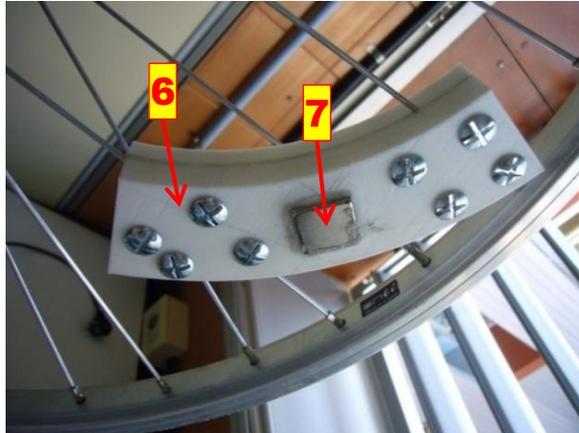


Figura 2.4. Detalle del imán.

7) Imán.

Imán de neodimio N42 de medidas 20x20x10 mm. Se calcula una coercitividad para el mismo de 907500 A/m. Ver apartado *Caracterización imán* en la página 7 y *Anexo 1.8*.

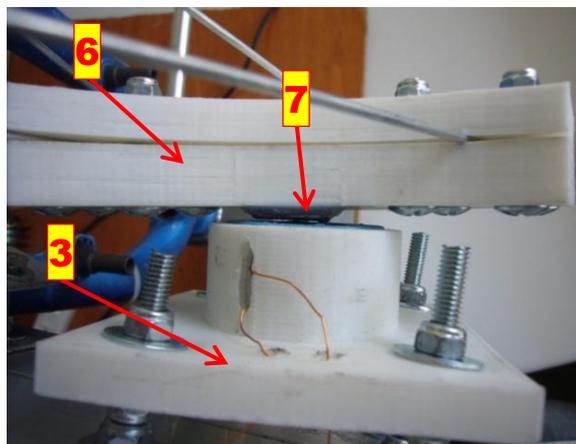


Figura 2.5. Detalle de la separación bobina-imán.

8) Sensor velocidad.

Es un sensor inalámbrico típico de un cuentakilómetros comercial.

9) Display velocidad.

Cuentakilómetros que servirá para visualizar y ajustar la velocidad del motor de arrastre. La velocidad marcada hace referencia a la existente en la superficie del neumático. Se escoge una circunferencia estándar para el neumático de 26" de 2114 mm. Ver apartado *Velocidad tangencial en el neumático* en la página 15.

10) Imán para sensor de velocidad.

Pequeño imán de ferrita que da pulsos al sensor. Se debe comprobar que no provoca ningún efecto apreciable en la bobina.

11) Motor de arrastre.

Motor regulable en velocidad mediante un potenciómetro. No es aconsejable sobrepasar los 18 km/h medidos en el cuentakilómetros.

12) Carga.

Se trata de 2 resistencias en paralelo de 4 Ω , lo que equivale a 2 Ω en serie.

Modelado del sistema físico en Femm.

En este apartado se comentarán los aspectos más relevantes para la modelización del sistema físico en Femm 2D.

Paso de 3D a 2D.

Femm calcula valores en la tercera dimensión a partir de una vista 2D dándole profundidad o rotando alrededor de un eje. Por ello, se debe modelar el movimiento relativo entre imán y bobina en 2D, pasando de un movimiento circular a uno lineal (ver *Figura 2.6* y *Anexos 1.1, 1.2 y 1.3*). La aproximación resulta suficiente ya que lo que ocurre en los lugares alejados de la bobina no tiene un efecto significativo y el radio de giro es grande en comparación con las dimensiones del imán.

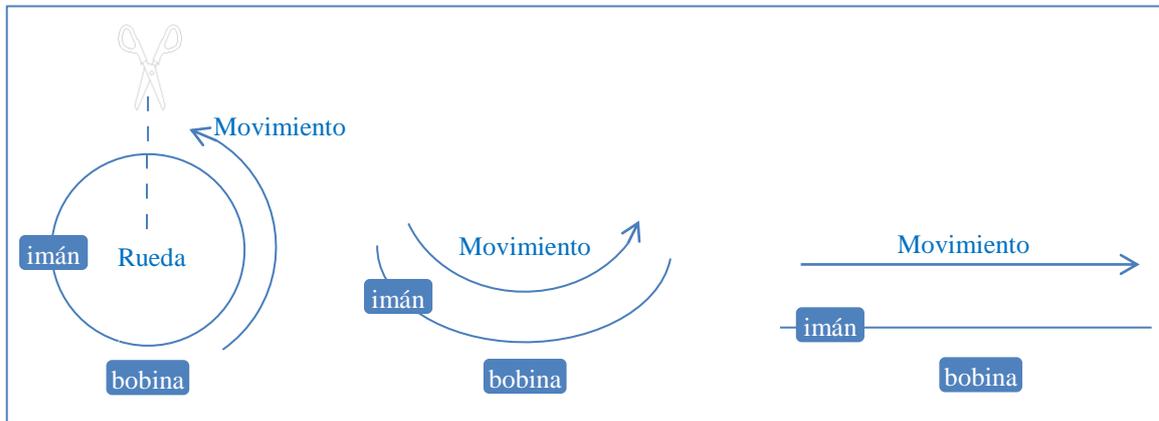


Figura 2.6. Paso de modelo 3D a 2D.

Caracterización imán.

Es necesario caracterizar la magnetización del imán dando valores a \vec{B} y a \vec{H} (o a \vec{M}). Femm lo modeliza mediante la coercitividad, que es la intensidad de campo H_c [A/m] necesaria para desmagnetizar el mismo (ver *Figura 2.7*).

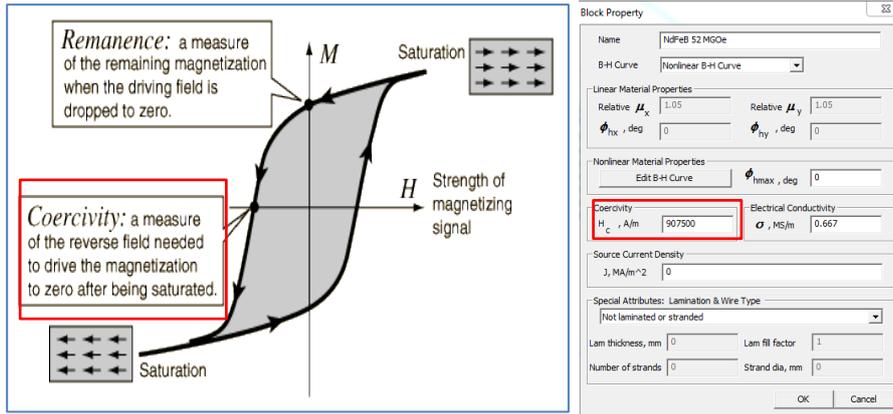


Figura 2.7. Curva de saturación [3] y coercitividad requerida en Femm.

Para determinar esta medida se utiliza:

- **El rango de valores dado por el fabricante.**

Dado el amplio rango ofrecido se plantea la necesidad de estimar un valor (ver Tabla 2.1). En los siguientes puntos se describe este procedimiento.

Datos físicos de los imanes

Imanes de neodimio

Calidad	Remanencia		Coercitividad				Producto energético		Temp. de servicio máx. °C
	Br		bHc		iHc		(BxH)max		
	Gauss (G)	Tesla (T)	kOe	kA/m	kOe	kA/m	MGOe	kJ/m³	
N30	10800-11200	1.08-1.12	9.8-10.5	780-836	≥12	≥955	28-30	223-239	≤80
N33	11400-11700	1.14-1.17	10.3-11	820-876	≥12	≥955	31-33	247-263	≤80
N35	11700-12100	1.17-1.21	10.8-11.5	860-915	≥12	≥955	33-35	263-279	≤80
N38	12200-12600	1.22-1.26	10.8-11.5	860-915	≥12	≥955	36-38	287-303	≤80
N40	12600-12900	1.26-1.29	10.5-12.0	860-955	≥12	≥955	38-40	303-318	≤80
N42	12900-13200	1.29-1.32	10.8-12.0	860-955	≥12	≥955	40-42	318-334	≤80
N45	13200-13700	1.32-1.37	10.8-12.5	860-995	≥12	≥955	43-45	342-358	≤80
N48	13700-14200	1.37-1.42	10.8-12.5	860-995	≥12	≥955	45-48	358-382	≤80
N50	14000-14600	1.40-1.46	10.8-12.5	860-995	≥12	≥955	47-51	374-406	≤80
N52	14200-14700	1.42-1.47	10.8-12.5	860-995	≥12	≥955	48-53	380-422	≤80
N54	14500-15000	1.45-1.50	10.8-12.5	876-955	≥11	≥876	52-55	414-438	≤80

Tabla 2.1. Rango de valores de la coercitividad aportados por el fabricante.

- **Medición experimental.**

Se mide el vector de inducción \vec{B} creado por el imán para diferentes distancias utilizando un sensor Hall [4], obteniéndose los siguientes resultados.

Distancia [mm]	Tensión [V]	B [G]	B [T]
5	5	2500	0,25
10	2,6	1300	0,13
15	1,5	750	0,075
20	0,85	425	0,043
25	0,53	265	0,027

Tabla 2.2. Datos obtenidos en la medición de campo del imán.

- **Comparación con simulación Femm.**

En el script de apoyo ‘caracterizacion_iman’ (ver *Anexo 4.27*) se realiza el ajuste de la simulación sobrepuesta con los datos medidos de campo dando diferentes valores a la coercitividad en Femm (ver *Figura 2.8*). Las dos líneas de la simulación indican los valores superior e inferior de la coercitividad dada por el fabricante.

El procedimiento que se siguió fue el siguiente: se hizo con Femm una simulación con el imán a las mismas distancias que las usadas durante las medidas experimentales. Para cada posición del imán se hicieron dos simulaciones con dos valores extremos de Hc dados por el fabricante. Se obtuvieron así dos valores máximo y mínimo de B para cada posición del imán. Estos valores se comparan con los experimentales y se muestran en la *figura 2.10*.

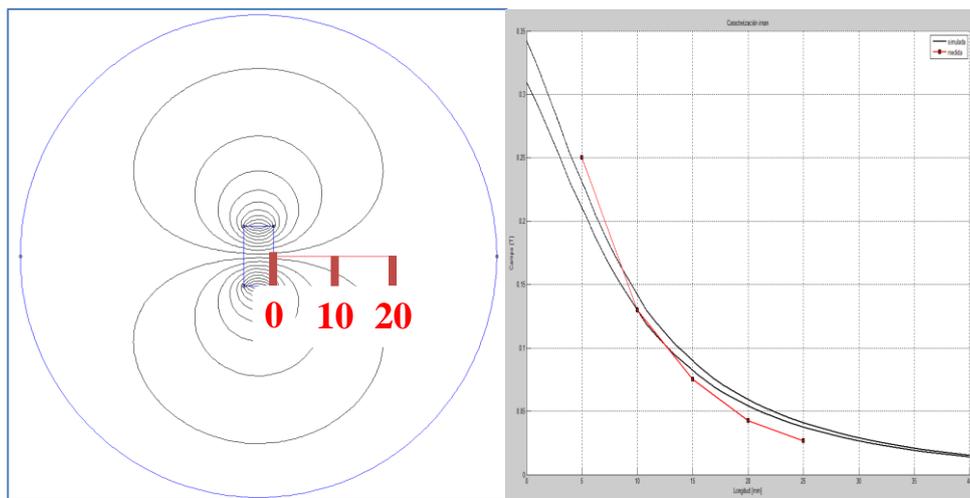


Figura 2.8. Ajuste del valor de la coercitividad en Femm.

Se aprecia que para una longitud de 5 mm se tiene una coercitividad más elevada que la simulada. Mientras que para las longitudes comprendidas entre 15 mm y 25 mm la coercitividad es menor. Esto se puede deber a la imprecisión al tomar las medidas experimentales, ya que se realizan sujetando manualmente el imán (especialmente en la longitud de 5 mm). En cualquier caso sirve para comprobar que se encuentra entre los valores ofrecidos por el fabricante. Se tomará el valor medio de los mismos 907500 A/m.

Elección del material para el núcleo.

Las chapas magnéticas que forman el núcleo proceden de un transformador antiguo. Para caracterizar este material se debe acudir a la biblioteca de materiales de Femm, al no disponer de medios técnicos para su medición experimental. Se escogen 3 materiales cuya curva B-H sea parecida a la del material real (ver *Figura 2.9*, *Figura 2.10* y *Anexo 2.4*).

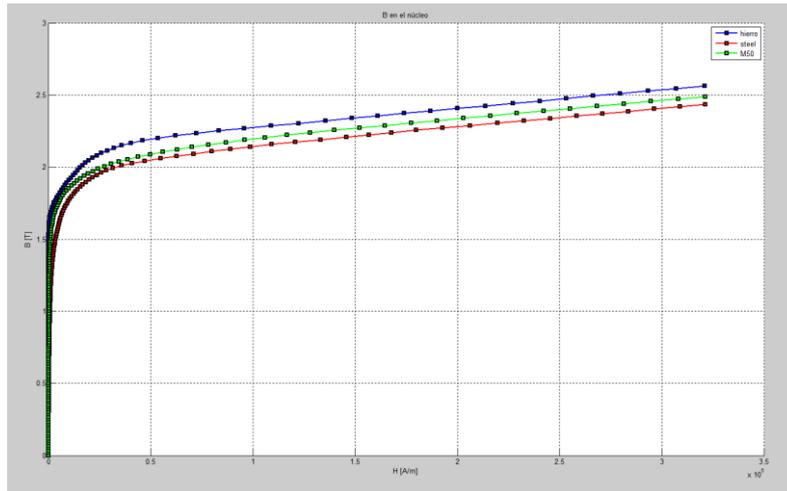


Figura 2.9. Curvas B-H de los diferentes núcleos.

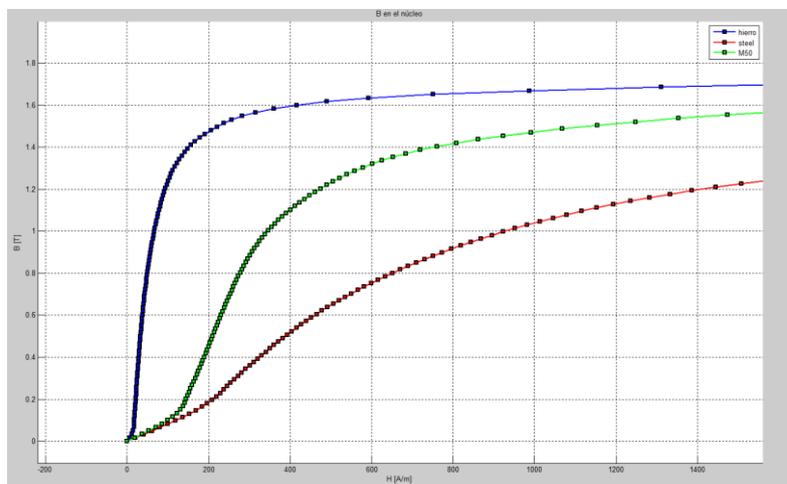


Figura 2.10. Curvas B-H de los diferentes núcleos ampliada.

Se calcula el valor del vector \vec{B} para el volumen de los 3 diferentes núcleos (ver Figura 2.11).

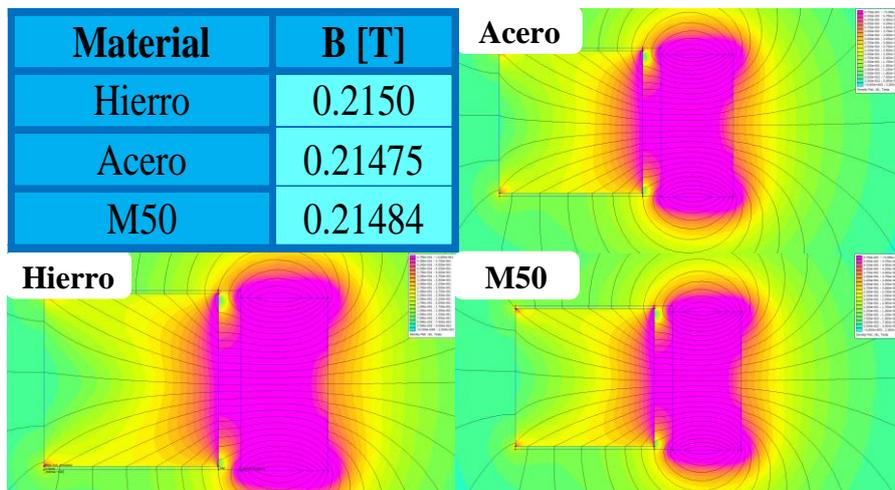


Figura 2.11. Valor de B para el volumen del núcleo.

Se observa que el valor de \vec{B} es aproximadamente el mismo. Se simula con los datos del prototipo para comprobar los efectos que producen y sus variaciones (ver *Figura 2.12*, *Figura 2.13* y *Anexo 2.4*)

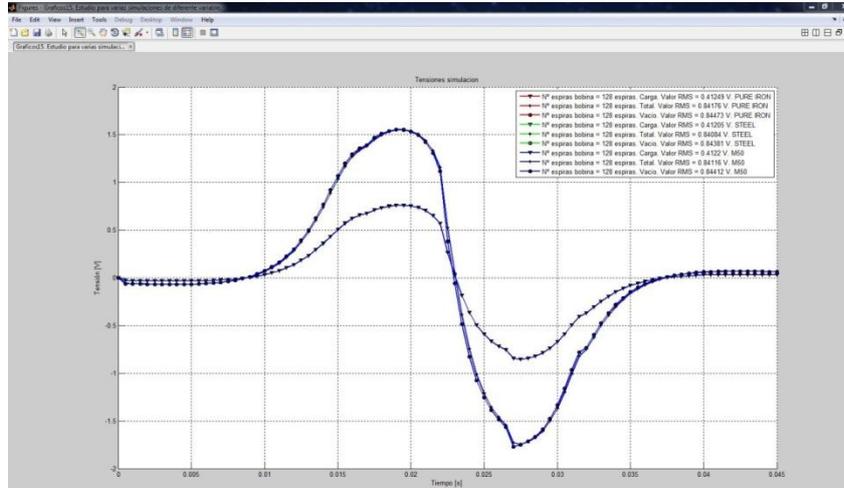


Figura 2.12. Tensiones de simulación de los diferentes núcleos.

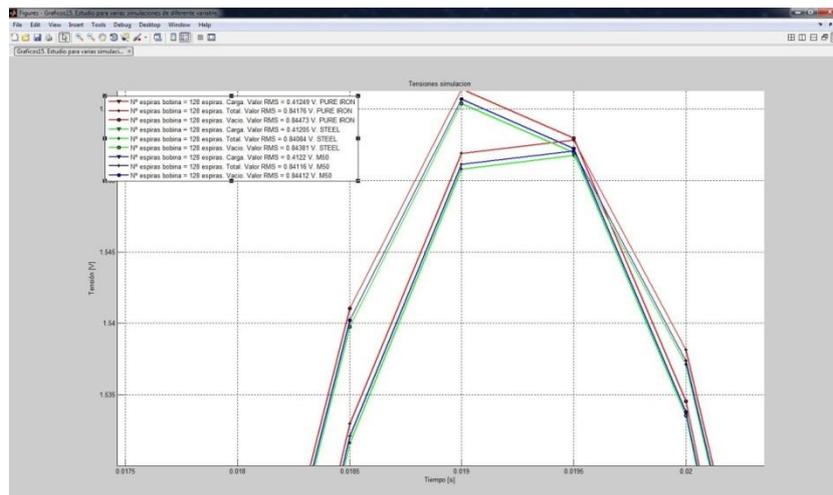


Figura 2.13. Tensiones de simulación de los diferentes núcleos ampliada.

No se aprecian cambios significativos de B tal como se observa en los valores de la gráfica. Se escogerá el material más favorable en cuanto a saturación, el núcleo de hierro puro recocido ('Pure iron, annelaed'). Ver apartado siguiente *Cálculo de la inductancia de la bobina*.

Cálculo de la inductancia de la bobina.

Se modela en el script 'determino_L' (ver *Anexo 4.3*), en el que se calcula el flujo abrazado por las espiras de la bobina para una intensidad unitaria. Mediante la siguiente expresión [5], se puede conocer la inductancia.

$$L = \frac{\phi N}{I} \quad (1)$$

Dadas las condiciones del circuito magnético, entrehierro formado por aire, relativa poca intensidad magnética del imán y la alta permeabilidad del núcleo ferromagnético sólo se

determina una vez la inductancia al inicio del programa. Esto supone considerar que el núcleo no se llega a saturar, actuando siempre en zona lineal, donde la inductancia no varía. De esta manera se ahorra tiempo en la simulación.

Otro procedimiento de cálculo de la inductancia es mediante la energía magnética.

$$W_{mg} = \frac{1}{2} LI^2 \quad (2)$$

Si la intensidad de corriente eléctrica I es igual a 1 Amperio, la expresión queda reducida a:

$$W_{mg} = \frac{1}{2} L \quad (3)$$

$$\Rightarrow L = 2W_{mg} \quad (4)$$

Como comprobación de que actúa en zona lineal, se muestra el valor de campo máximo en el núcleo obtenido durante las simulaciones del prototipo para el caso del máximo valor de \vec{B} de los 3 núcleos (ver *Figura 2.14* y *Anexo 2.3*). Al trasladarlo a la curva B-H, para el caso del hierro puro recocido ('Pure iron, annealed'), se observa que está en zona lineal y aún tiene margen para aumentar sin salirse (ver *Figura 2.15*). Este procedimiento se ha realizado con el script de apoyo 'saturacion_nucleo.m' (ver Anexo 4.31).

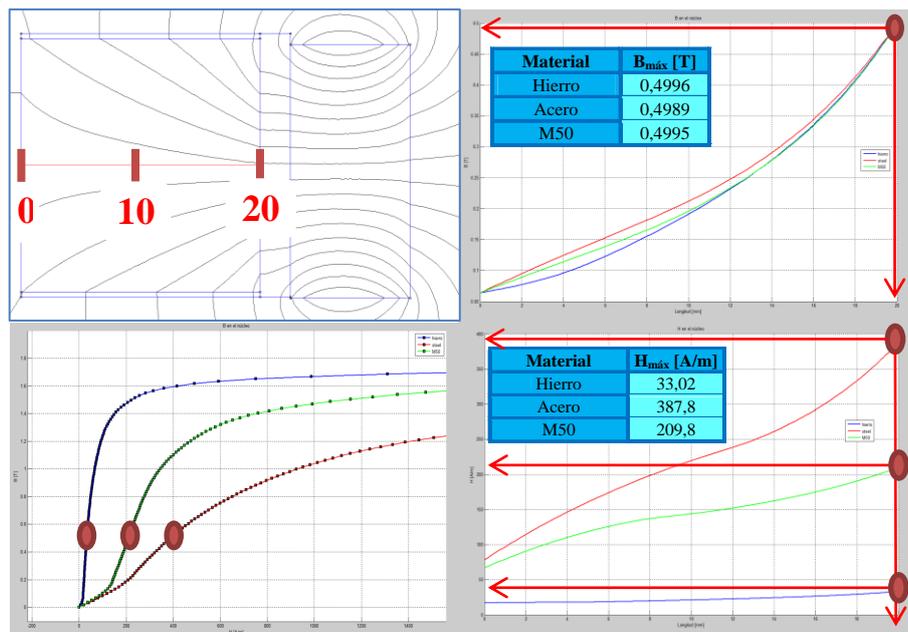


Figura 2.14. Valor máximo de \vec{B} y \vec{H} en el interior del núcleo y zona de trabajo.

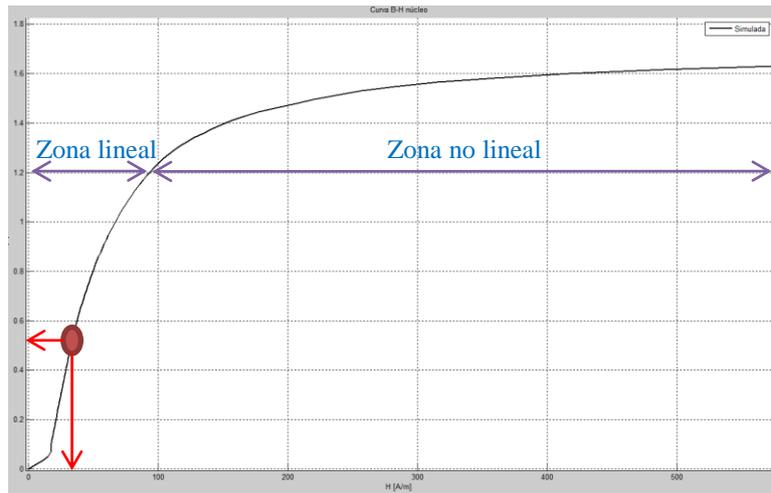


Figura 2.15. Zona lineal de actuación del núcleo de hierro.

Histéresis del núcleo.

Resulta complicado determinar el valor de la remanencia del núcleo del prototipo ya que:

- No se conoce la composición exacta del material.
- No se dispone de medios técnicos y materiales para su correcta medición ya que su valor es muy pequeño.
- Se complica la posibilidad de simular porque la remanencia varía si cambiamos parámetros de entrada dimensionales que la puedan afectar. Como pueden ser la coercitividad y el tamaño del imán, el gap, la corriente, el material y las dimensiones de la bobina. Lo cual, en caso de poder medirlas llevaría a la creación laboriosa de tablas de valores para poder llevar a cabo la simulación.
- El programa Femm modeliza la remanencia con la coercitividad y crea una disposición simétrica del campo magnético en el interior del núcleo (ver Figura 2.16). Cuando, en realidad, se magnetiza más la parte más cercana al imán. Una posible solución a este hecho sería dividir el núcleo en una matriz de pequeños cuadrados y tratarlos individualmente conocidos sus valores de B y sus correspondientes remanencias. Esto puede resultar harto laborioso y complicado.

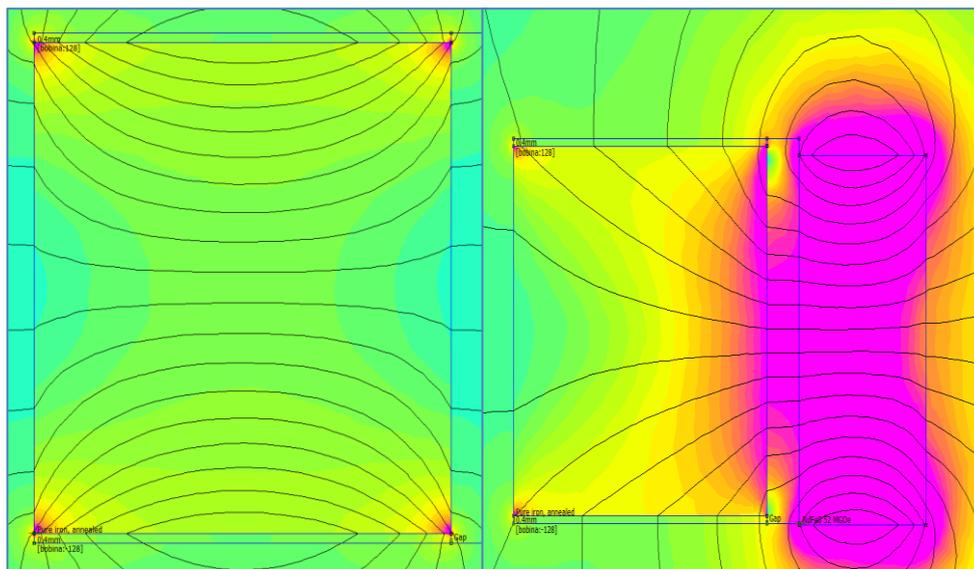


Figura 2.16. Disposición del campo simétrica en el interior del núcleo y real.

Resulta necesario encontrar una solución que simplifique este problema. Si bien no se conoce la composición exacta del material, sí que se conoce su procedencia. Son chapas magnéticas extraídas del núcleo de un transformador. Este hecho significa que se trata de un material que es capaz de conducir el campo y tiene unas pérdidas por histéresis pequeñas. Se trata de un material ferromagnético blando que se magnetiza y desmagnetiza con mucha facilidad (ver Figura 2.17). Además trabaja en zona lineal donde la histéresis tiene menos importancia aún (ver apartados *Elección del material para el núcleo* en la página 9 y *Cálculo de la inductancia de la bobina* en la página 11.)

28.29 Ciclos de histéresis. Los materiales en los incisos a) y b) permanecen muy magnetizados cuando B_0 se reduce a cero. Como el material de a) también es difícil de desmagnetizar, sería adecuado para imanes permanentes. Puesto que el material de b) se magnetiza y desmagnetiza con más facilidad, podría usarse como material para memorias de computadoras. El material de c) sería útil para los transformadores y otros dispositivos de corriente alterna en los que sería óptima una histéresis de cero.

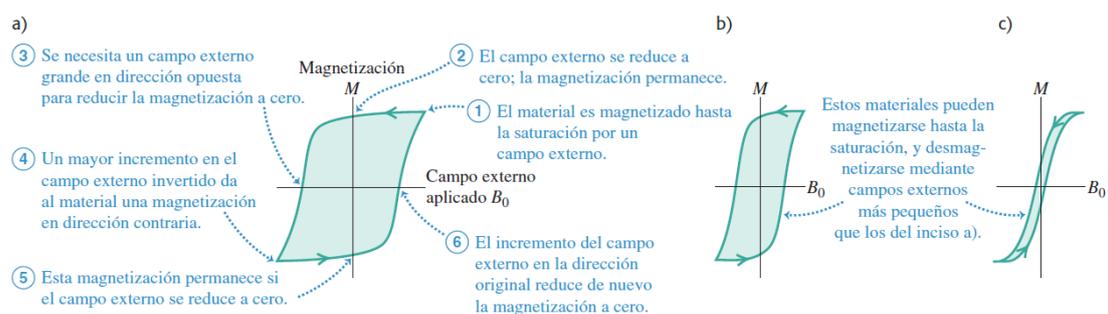


Figura 2.17. Histéresis de materiales ferromagnéticos [6].

Por ello se toma la decisión de no dar valores de remanencia al núcleo y no interconectar su estado en los diferentes instantes de la simulación. Se ha creado un vídeo que se adjunta en la documentación, del cual se extrae la siguiente figura en la que se aprecia este hecho.

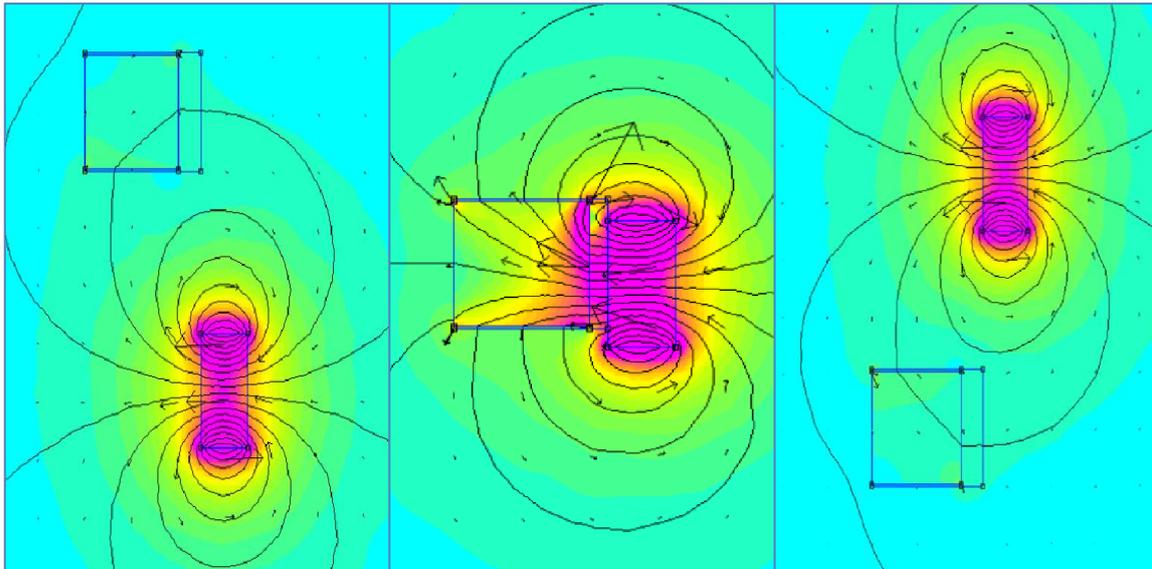


Figura 2.18. Detalle de la remanencia del núcleo con la solución adoptada.

Velocidad tangencial en el neumático.

Se toma como referencia la velocidad a la que rueda el ciclista. Esto permite hacer simulaciones en base a una velocidad mínima. Para ello, se ha de determinar la circunferencia del neumático. Se escoge una circunferencia de 2114 mm para un neumático de mountain bike de 26" estándar, recogida en manuales de cuentakilómetros.

XX × XXX	C = ? mm	XX × XXX	C = ? mm
16x1.75x2	47-305 → 1272	27x1 1/4	32-630 → 2199
20x1.75x2	47-406 → 1590	27x1 1/4 Fifty	28-630 → 2174
24x1 3/8 A	37-540 → 1948	28x1.5	40-622 → 2224
24x1.75x2	47-507 → 1907	28x1.75	47-622 → 2268
26x1	23-571 → 1973	28x1 1/2	40-635 → 2265
26x1.5	40-559 → 2026	28x1 3/8x1 5/8	37-622 → 2205
26x1.6	44-559 → 2051	700x1 8C	18-622 → 2102
26x1.75x2	47-559 → 2072	700x20C	20-622 → 2114
26x1.9	50-559 → 2089	700x23C	23-622 → 2133
26x2.00	54-559 → 2114	700x25C	25-622 → 2146
26x2.125	57-559 → 2133	700x28C	28-622 → 2149
26x1 3/8	37-590 → 2105	700x32C	32-622 → 2174
26x1 3/8x1 1/2	37-584 → 2086	700x35C	37-622 → 2205
26x3/4	20-571 → 1954	700x40C	40-622 → 2224

Tabla 2.3. Tabla de medidas estándar de la circunferencia de los neumáticos.

Núcleo de chapas.

El núcleo ferromagnético formado por chapas en la realidad se puede modelizar en Femm como un núcleo macizo para ahorrar recursos. Esto es posible ya que el generador trabaja a una baja frecuencia en la que las corrientes de Foucault no producen efectos apreciables. No obstante, se incluye la posibilidad de simular un núcleo constituido por chapas.

Alabeo.

El movimiento lateral del imán al aproximarse y alejarse de la bobina, provoca cambios en la forma de onda de la tensión (ver *Figura 2.19*, *Figura 2.20* y *Anexo 2.3*).

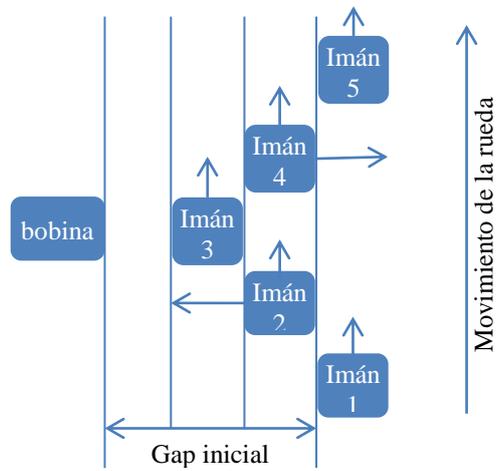


Figura 2.19. Esquema del alabeo del imán.

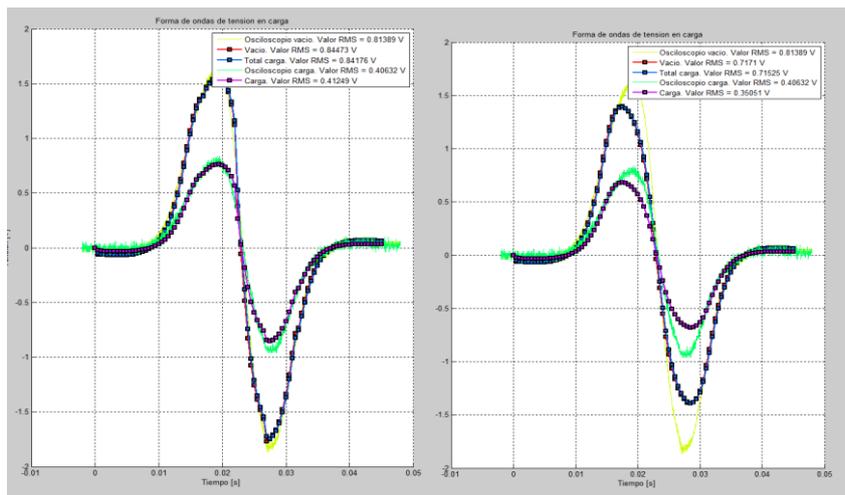


Figura 2.20. Comparación de las tensiones obtenidas con y sin alabeo.

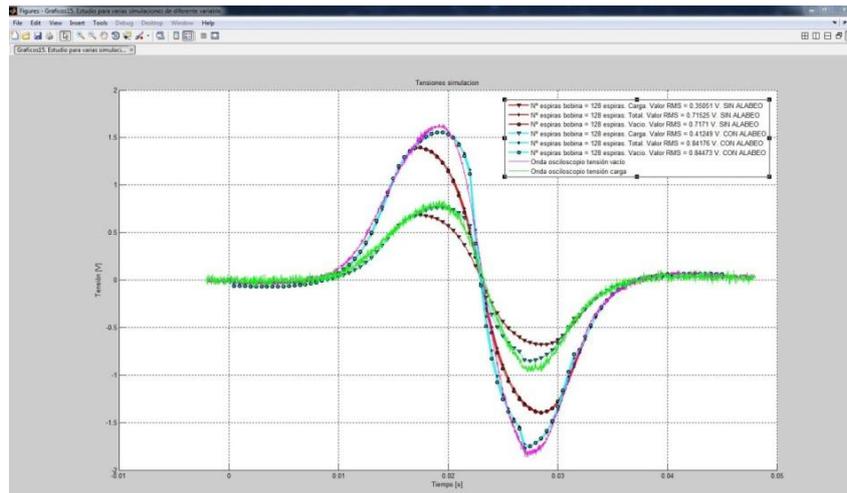


Figura 2.21. Comparación de las tensiones obtenidas con y sin alabeo sobrepuestas.

Cuando alabea se observa como aumentan los valores de la tensión y se crea una asimetría en los valores pico, acercándose a los valores reales medidos en el osciloscopio.

Circuito conjunto bobina-carga.

Para realizar los cálculos asociados al circuito eléctrico en cada diferencial de tiempo se utilizará el archivo 'simulador_RLC' (ver Anexo 4.6) que resuelve el siguiente circuito.

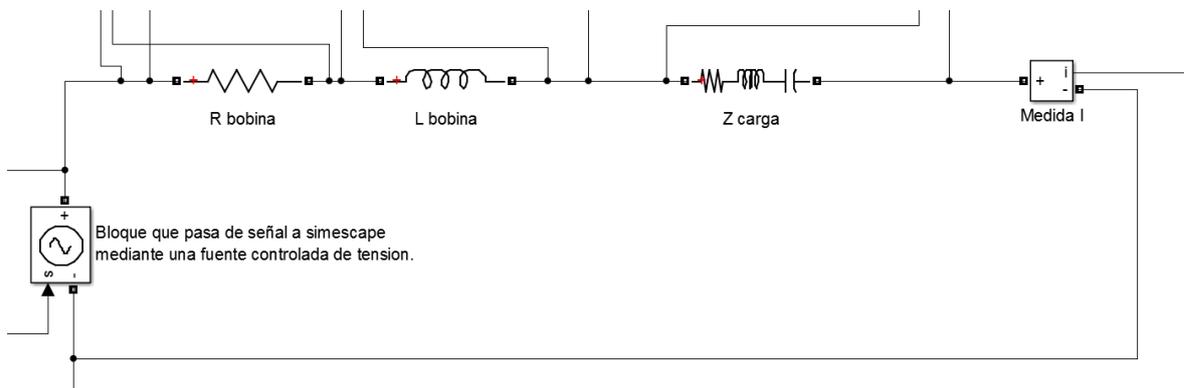


Figura 2.22. Circuito equivalente del conjunto bobina-carga.

CAPÍTULO 3: SIMULACIÓN NUMÉRICA Y PARAMETRIZACIÓN.

Condiciones previas para el funcionamiento de la simulación.

Se requiere:

- Instalar los programas Femm y Matlab. Para Femm se recomienda utilizar la ruta por defecto de instalación.
- Alojarse los resultados de las simulaciones del osciloscopio en la carpeta 'C:\datos'
- Alojarse los archivos del proyecto en 'C:\Proyecto\'

No obstante se pueden modificar las rutas desde el script 'Proyecto_3_0.m' y 'datos.m' (ver *Anexos 4.1 y 4.2, Variables de entrada.* en la página 21 y *Tabla 3.1* en la página 28).

Diagrama de flujo.

Se presenta un esquema de flujo resumido del programa.

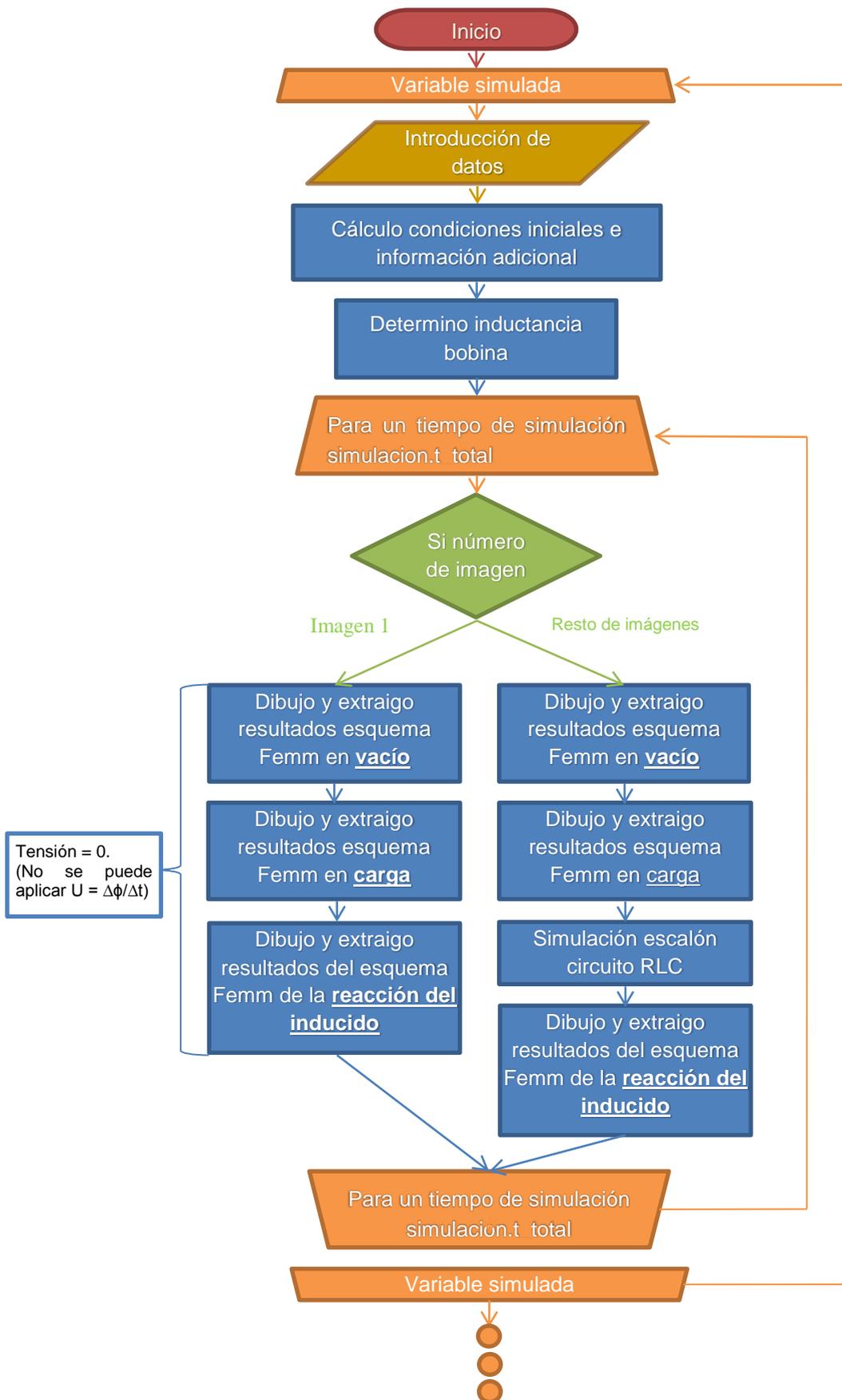


Figura 3.1. Diagrama de flujo simplificado del programa simulador.

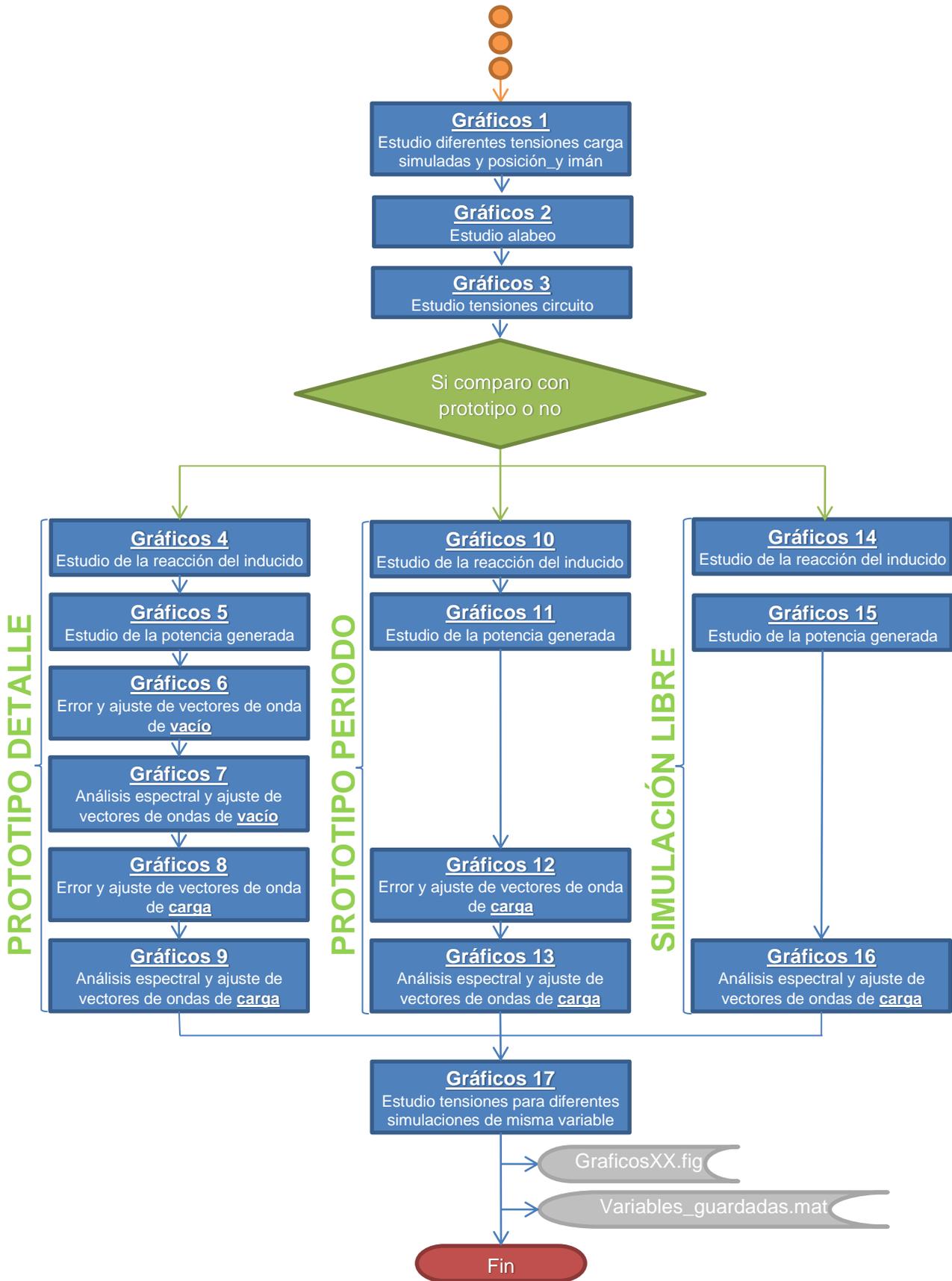


Figura 3.1. Diagrama de flujo simplificado del programa simulador.

Variables de entrada.

Las variables que necesitan ser introducidas por el usuario se encuentran en el nivel de tabulación 0. Las que parten de variables introducidas se encuentran desplazadas un nivel de tabulación (ver *Figura 3.2*). Éstas variables pueden ser meramente informativas como un cambio de unidades o ser necesarias para el funcionamiento del programa.

```

17  %-----
18  % PARAMETROS SISTEMA FISICO, RUEDA:
19  %-----
20
21  rueda.neumatico.circunferencia = 2114; % Medida estandar manuales cuentakilometros [mm].
22  rueda.neumatico.r= rueda.neumatico.circunferencia/(2*pi); % Radio exterior neumatico [mm].
23  rueda.llanta.r = 272.27; % Radio llanta [mm]. (Medido a mano).
24  rueda.neumatico.v=15/3.6*10^3; %[mm/s] Poner en km/h (Por defecto 15 km/h).
25  rueda.rps = rueda.neumatico.v/rueda.neumatico.circunferencia; % [Hz].
26  rueda.rpm = rueda.rps*60; %[rev/min].
27  rueda.t.vuelta = rueda.neumatico.circunferencia/rueda.neumatico.v; % [s] La utilizare para contar vueltas
28  %-----
29

```

NIVEL 1 2 3

Variable a introducir (Nivel 0)

Variable a calcular a partir de la de nivel 0

Variable a calcular a partir de la de nivel 1

Figura 3.2. Niveles de tabulación de las variables.

A partir de aquí se detallan las variables de entrada y se presenta un esquema resumen con los valores por defecto del prototipo para el modo ‘detalle’. Es decir, para el tiempo que abarca un paso completo del imán por la bobina. Cada variable irá acompañada de una imagen del programa en la que se indica su situación, sus unidades y su valor por defecto. Si es necesario profundizar en el cálculo de alguna de ellas, en el código se encuentra detallado el proceso de cálculo (*Anexo 4*). Para una mejor comprensión de las variables, especialmente las dimensionales, es recomendable ver el conjunto del *Anexo 1*.

Rutas.

Se utilizan para indicar al programa donde ha de buscar datos y guardar los diferentes resultados.

```

3  % Ruta donde se guardan los archivos *.fem, *.ans y *.fig:
4  ruta.femm='c:/PROYECTO/femm/'; % Para el nombre de los archivos de femm.
5  ruta.grafica='c:/PROYECTO/matlab/Graficas/'; % Para las graficas de matlab y variables guardadas
6  ruta.datos='c:/PROYECTO/datos/'; % Para las capturas del osciloscopio.

```

- **ruta.femm.**

En ella guardará todos los resultados generados por el programa Femm

- **ruta.grafica.**

En ella guardará los resultados generados por Matlab como son las gráficas y las variables.

- **ruta.datos.**

En ella encontrará los datos de simulación del osciloscopio.

Rueda.

```

Proyecto_3_0.m x datos.m x
17 -----
18 % PARAMETROS SISTEMA FISICO, RUEDA:
19 -----
20
21 rueda.neumatico.circunferencia = 2114; % Medida estandar manuales cuentakilometros [mm]
22   rueda.neumatico.r= rueda.neumatico.circunferencia/(2*pi); % Radio exterior neumatico [mm].
23   rueda.llanta.r = 272.27; % Radio llanta [mm]. (Medido a mano).
24   rueda.neumatico.v=15/3.6*10^3; %[mm/s] Poner en km/h (Por defecto 15 km/h)
25   rueda.rps = rueda.neumatico.v/rueda.neumatico.circunferencia; % [Hz].
26   rueda.rpm = rueda.rps*60; %[rev/min].
27   rueda.t_vuelta = rueda.neumatico.circunferencia/rueda.neumatico.v; % [s] La utilizare para contar vueltas
28 -----
    
```

- ***rueda.neumatico.circunferencia.***

Es la circunferencia exterior del neumático. Se escoge un valor estándar para una rueda de 26”, ya que según el tipo de neumático este puede cambiar (ver apartado Velocidad tangencial en el neumático en la página 15). Al no estar montado el neumático, sólo es necesario introducir esta misma medida en el cuentakilómetros del prototipo.

- ***rueda.llanta.r.***

Es el radio que va desde el centro de la rueda hasta la zona metálica que contacta con el neumático. Se mide a mano en el prototipo.

- ***rueda.neumatico.v.***

Es la velocidad tangencial en la superficie del neumático que contacta con el suelo, es decir, la velocidad a la que rueda el ciclista. Debe introducirse en km/h, ya que es la medida habitual en los cuentakilómetros. Se estima una velocidad mínima de 15 km/h.

Imán.

```

Proyecto_3_0.m x datos.m x
34 % IMAN:
35
36 iman.r=215;% Radio donde coloco iman [mm].-> 215 por defecto.
37   iman.circunferencia = iman.r*2*pi; % Longitud circunferencia iman [mm].
38   iman.v=iman.r/rueda.neumatico.r*rueda.neumatico.v; % Velocidad lineal iman [mm/s].
39   iman.a = 10; % Anchura [mm].-> 10 por defecto.
40   iman.h = 20; % Altura [mm].->20 Por defecto.
41   iman.n = 1; % Numero de imanes en la rueda.
42   iman.cohercitividad = 907500; % Cohercitividad iman.
43   % El proceso de caracterizacion del iman se lleva a cabo
44   % con el script caracterizacion_iman.m
    
```

- ***iman.r.***

Distancia medida desde el centro de la rueda hasta donde se coloca el imán en el radio.

- ***iman.a.***

Anchura del imán. En el programa Femm, es el tamaño del imán en la dimensión X.

- ***iman.h.***

Altura del imán. En el programa Femm, es el tamaño del imán en la dimensión Y.

- ***iman.n.***

Es el número de imanes a colocar en los radios. Dado un número, el script ‘distancia_imanes.m’ determina la disposición más simétrica posible en los radios.

- **iman.coercitividad.**

Es la forma que tiene Femm de parametrizar la magnetización del imán. Ver apartado *Caracterización imán* en la página 7.

Bobina.

```

Proyecto_3_0.m | datos.m
46 % BOBINA:
47
48 bobina.a = 20; % Anchura bobina [mm].
49 bobina.h = 0.4; % Altura cables bobina [mm]--> Diametro hilo de cobre.
50 bobina.h etiqueta = '0.4mm';
51 bobina.N = simulacion.variable.valor; % Numero de espiras de la bobina. Por defecto 125.
52
53 bobina.seccion = pi*(bobina.h/2)^2; % Seccion del cable de la bobina [mm^2].
54
55 bobina.radio = 30.66/2; % Radio de la bobina [mm].
56 bobina.longitud = 2*pi*bobina.radio*bobina.N; % Longitud cable bobina [mm].
57 bobina.densidad_cobre = 8.4*10^(-3); % [g/mm^3]. La densidad del cobre es 8.4 [g/cm^3].
58 bobina.peso = bobina.densidad_cobre*bobina.longitud*bobina.seccion;
59
60 bobina.resistividad = 1/58*10^-3; % Resistividad tomada de la biblioteca de materiales de Femm. [ohm/mm].
61 bobina.resistencia = bobina.resistividad * bobina.longitud/(bobina.seccion)*1.23; % Resistencia del cable
    
```

- **bobina.a.**

Anchura de la bobina. En el programa Femm es el tamaño de la bobina en la dimensión X.

- **bobina.h.**

Altura de la bobina. En el programa Femm es el tamaño de la bobina en la dimensión Y.

- **bobina.N.**

Número de espiras de la bobina.

- **bobina.radio.**

Radio de la bobina medido hasta la superficie interior del conductor.

- **bobina.densidad.cobre.**

Es la densidad del cobre.

- **bobina.resistividad.**

Es la resistividad del cobre.

Núcleo.

```

Proyecto_3_... | datos.m | determina... | generador... | dibujo.m
83 % NUCLEO:
84
85 nucleo.h = 20; % Altura del nucleo [mm].
86 nucleo.chapa.h = nucleo.h; % Grosor chapa [mm]. Por defecto nucleo.h (1 sola chapa).
87 nucleo.material = 'Pure iron, annealed';
    
```

- **nucleo.h.**

Altura del núcleo. En el programa Femm, es el tamaño del núcleo en la dimensión Y.

- **nucleo.chapa.h.**

Es la altura de cada chapa individual que forma el núcleo.

- ***nucleo.material.***

Es el material de la biblioteca de Femm con el que se caracteriza el núcleo.

Gap.

```

Proyecto_3_0.m | datos.m | determino... | generador... | junta_grafic... | dibuja.m | graficos4.m
89 % GAP:
90
91 gap.a = 4.8; % Entrehierro [mm]. Por defecto para alabeo 4.8.
92 % Por defecto sin alabeo 3.1.
    
```

- ***gap.a.***

Anchura del gap o entrehierro.

Variables comunes.

```

datos.m
96 -----
97 % PARAMETROS SIMULACION:
98 -----
99
100 % TIEMPOS:
101
102 simulacion.t_total=0.045; % Tiempo total de simulacion:
103 % 0.045 s para una pasada del iman (detalle).
104 % 0.5075 s para una vuelta completa (periodo).
105 % Debe ser multiplo de simulacion.At.
106
107 simulacion.At=0.0005; % Discretización de la simulación [s].
108 % DEBE SER MULTIPLIO DE osciloscopio.At = 2e-5.
109
110 % GENERAL:
111
112 simulacion.profundidad = 20; % Profundidad [mm]. Por defecto 20.
113
114 simulacion.iteraciones = 5; % Numero de iteraciones cálculos convergencia.
    
```

- ***simulacion.profundidad.***

Es la profundidad común a todos los elementos del esquema 2D. En el programa Femm es la dimensión Z.

- ***simulacion.t_total.***

Es el tiempo que ha de durar la simulación.

- ***simulacion.At.***

Es el tiempo de discretización de la simulación.

- ***simulacion.iteraciones.***

Es el número de iteraciones que realiza el programa para realizar los cálculos de convergencia.

Carga.

```

Proyecto_3_0.m | datos.m
116 % CARGA:
117
118 carga.resistencia = 2; % Resistencia de la carga [ohm].
119 carga.L = 0; % Inductancia de la carga [H].
120 carga.C = 0; % Capacidad de la carga [ohm].
    
```

- **carga.resistencia.**

Es la resistencia eléctrica que presenta la carga.

- **carga.L.**

Es la inductancia que presenta la carga.

- **carga.C.**

Es la capacitancia que presenta la carga.

Alabeo.

```

151 % ALABEO:
152
153 simulacion.alabeo.yo = -14.5;% A partir de donde empieza a acercarse el imán a la bobina [mm]. Por defecto -1
154 simulacion.alabeo.ym = 11;% A partir de donde empieza a alejarse el imán a la bobina [mm]. Por defecto 11.
155 % * Poner yo,ym=0 para no tener alabeo.
156 simulacion.alabeo.yf = simulacion.alabeo.ym-simulacion.alabeo.yo;% A partir de donde deja de moverse [mm].
157 simulacion.gap.A_alabeo = 0.225*simulacion.At/0.0005; % Incremento/decremento del gap por cada At [mm].
158 simulacion.gap.minimo = 2.7; % Mínima distancia entre la bobina y el iman durante el alabeo [mm].
159 simulacion.gap.a_inicial=gap.a; % Gap inicial [mm].
    
```

- **simulacion.alabeo.yo.**

Es la posición y medida desde la base del imán a partir de la cual el imán empieza a alabeo aproximándose a la bobina (disminución X).

- **simulacion.alabeo.ym.**

Es la posición y medida desde la base del imán a partir de la cual el imán empieza a alabeo alejándose de la bobina (aumento X)

- **simulacion.alabeo.yf.**

Es la posición y medida desde la base del imán a partir de la cual el imán termina de alabeo y vuelve a su posición X normal.

- **simulacion.gap.A_alabeo.**

Es el cambio de tamaño en el eje X del entrehierro en un At cuando el imán está alabeando. Resaltar que esta variable va ligada a simulación.At.

- **simulacion.gap.minimo.**

Es la distancia mínima en el eje X entre la bobina y el imán durante el alabeo.

- **simulacion.gap.a_inicial.**

Es el entrehierro existente cuando no hay efectos de alabeo.

Mallados.

Hacen referencia a los niveles de tamaño con los que el programa Femm divide las superficies para llevar a cabo los cálculos. A menor valor de mallado, se realizará la simulación con más detalle pero también con más tiempo de cálculo, ya que aumenta el número de triángulos y nodos.

```

Proyecto_3_0.m | datos.m
183 - simulacion.mallado.bobina=0.2;
184 - simulacion.mallado.m50=0.2;
185 - simulacion.mallado.gap=0.2; % SIMULACION PRECISA DETALLE
186 - simulacion.mallado.iman=0.2;
187 - simulacion.mallado.air1=100;
188 - simulacion.mallado.air_interior = 1;
    
```

- ***simulacion.mallado.bobina.***

Para la superficie de los conductores de la bobina.

- ***simulacion.mallado.m50.***

Para la superficie del material ferromagnético.

- ***simulacion.mallado.gap.***

Para la superficie del gap.

- ***simulacion.mallado.iman.***

Para la superficie del imán

- ***simulacion.mallado.air1.***

Para la superficie del contorno exterior.

- ***simulacion.mallado.air_interior.***

Para la superficie del contorno interior.

Contorno.

```

Proyecto_3_0.m | datos.m
197 % CONTORNO EXTERIOR:
198
199 - simulacion.contorno1=2*iman.yf; % Radio contorno 1 [mm] (Contorno exterior). Por defecto 2*iman.yf.
    
```

- ***simulacion.contorno1.***

Es el radio del contorno exterior del esquema de Femm.

Variable estudiada:

```

Proyecto_3_0.m | datos.m
222 % VARIABLE ESTUDIADA:
223 % Nombre de la variable estudiada para mostrar en leyenda graficas y nombre de archivo.
224 - apoyo.graficas.nombre_variable = 'N° espiras bobina';
225 - apoyo.graficas.medida_variable = ' espiras. ';
    
```

- ***apoyo.graficas.nombre_variable.***

Es el nombre de la variable que se va a estudiar.

- ***apoyo.graficas.medida_variable.***

Es el nombre de las unidades en las que se mide la variable a estudiar.

```

Proyecto_3_0.m | datos.m
52 % Para la variable estudiada:
53 % Para 1 solo valor poner iguales variable_inicio=variable_final=A_variable
54 - simulacion.variable.inicio = 125 ;
55 - simulacion.variable.final = 125;
56 - simulacion.variable.A = 1;
    
```

- ***simulación.variable.inicio.***

Indica desde que valor de la variable estudiada empieza la simulación.

- *simulación.variable.final.*

Indica hasta qué valor de la variable estudiada realiza la simulación.

- *simulación.variable.A.*

Indica el valor del incremento de la variable estudiada para cada ejecución de la simulación.

Datos osciloscopio.

```

Proyecto_3.0.m x datos.m x
229 %-----
230 % DATOS OSCILOSCOPIO:
231 %-----
232
233 % Capturo informacion de la onda del osciloscopio en vacio en detalle:
234 resultados.onda_osciloscopio.vacio.detalle = importdata([ruta.datos 'captura_vacio_detalle.dat']);
235 resultados.onda_osciloscopio.vacio.detalle.desplazamiento = 0.023; % Desfase onda osciloscopio [s].
236
237 % Capturo informacion de la onda del osciloscopio en vacio en periodo:
238 resultados.onda_osciloscopio.vacio.periodo = importdata([ruta.datos 'captura_vacio_periodo.dat']);
239 resultados.onda_osciloscopio.vacio.periodo.desplazamiento = -0.115; % Desfase onda osciloscopio [s].
240
241 % Capturo informacion de la onda del osciloscopio en carga en detalle:
242 resultados.onda_osciloscopio.carga.detalle = importdata([ruta.datos 'captura_carga_detalle.dat']);
243 resultados.onda_osciloscopio.carga.detalle.desplazamiento = 0.023; % Desfase onda osciloscopio [s].
244
245 % Capturo informacion de la onda del osciloscopio en carga en periodo:
246 load([ruta.datos 'Captura_carga_periodo.mat'])
247 resultados.onda_osciloscopio.carga.periodo.data = Captura_carga_periodo;
248 resultados.onda_osciloscopio.carga.periodo.desplazamiento = 0; % Desfase onda osciloscopio [s].
249 clear Captura_carga_periodo;
250 %-----
    
```

- *resultados.onda_osciloscopio.vacio.detalle.desplazamiento.*

Es el desfase existente en segundos entre la onda simulada en vacío y la del osciloscopio en vacío. Este desfase se puede determinar rápidamente viendo el paso por 0 de las gráficas o mediante el script ‘graficos6.m’ (ver Anexo 4.12).

- *resultados.onda_osciloscopio.vacio.periodo.desplazamiento.*

Es el desfase existente en segundos entre la onda simulada en vacío y la del osciloscopio en vacío. Este desfase se puede determinar rápidamente viendo el paso por 0 de las gráficas.

- *resultados.onda_osciloscopio.carga.detalle.desplazamiento.*

Es el desfase existente en segundos entre la onda simulada en carga y la del osciloscopio en carga. Este desfase se puede determinar rápidamente viendo el paso por 0 de las gráficas o mediante el script ‘graficos8.m’ (ver Anexo 4.14).

- *resultados.onda_osciloscopio.carga.periodo.desplazamiento.*

Es el desfase existente en segundos entre la onda simulada en vacío y la del osciloscopio en vacío. Este desfase se puede determinar rápidamente viendo el paso por 0 de las gráficas o mediante el script ‘graficos12.m’ (ver Anexo 4.18).

BOBINA	RUEDA	IMÁN	NÚCLEO
bobina.a = 10 bobina.h = 0.4 bobina.N = simulacion.variable.valor bobina.radio = 15,33 bobina.resistividad = 1,7241e-08 bobina.densidad = 0,0084	rueda.neumatico.circunferencia = 2114 rueda.llanta.r = 336,4535 rueda.neumatico.v = 4,1667e+03	iman.a = 10 iman.h = 20 iman.n = 1 iman.cohercitividad = 907500	nucleo.h = 20 nucleo.chapa.h = 20 nucleo.material = 'Pure iron, annelaed'
	MALLADOS		CARGA
VARIABLES COMUNES	simulacion.mallado.bobina = 0,2 simulacion.mallado.gap = 0,2 simulacion.mallado.gap = 0,2 simulacion.mallado.iman = 0,2 simulacion.mallado.air1 = 100 simulacion.mallado.air_interior = 1	ALABEO	carga.resistencia = 100 carga.L = 0 carga.C = 0
simulacion.profundidad = 20 simulacion.t_total = 0,045 simulacion.At = 0,0005 simulación.iteraciones = 5		simulacion.alabeo.yo = -14,5 simulacion.alabeo.ym = 11 simulacion.alabeo.yf = 25,5 simulacion.gap.A_alabeo = 0,225 simulación.gap.minimo = 2.7 simulacion.gap.a_inicial = 4,8	GAP
DATOS OSCILOSCOPIO			CONTORNO
resultados.onda_osciloscopio.vacio.detalle.desplazamiento = 0,023 resultados.onda_osciloscopio.vacio.periodo.desplazamiento = -0,115 resultados.onda_osciloscopio.carga.detalle.desplazamiento = 0,023		simulación.controno1 = 160	
RUTAS		VARIABLE ESTUDIADA	
ruta.femm = 'c:/PROYECTO/femm/' ruta.grafica = 'c:/PROYECTO/matlab/Graficas/' ruta.datos = 'c:/PROYECTO/datos/'		simulacion.variable.inicio = 125 simulacion.variable.final = 125 simulacion.variable.A = 1 apoyo.graficas.nombre_variable = 'Nº espiras bobina' apoyo.graficas.medida_variable = ' espiras. '	

Tabla 3.1. Esquema resumen de las variables de entrada para el prototipo en detalle.

VARIABLES DE SALIDA.

Las variables de salida se encuentran en la variable estructurada “resultados” (ver Figura 3.3). Al final de la simulación el workspace junto con los gráficosXX.fig son salvados en “C:\PROYECTO\matlab\graficas\variables_guardadas.mat”. La representación gráfica de los resultados, que nos permite un estudio más detallado y cómodo, queda alojada en el mismo directorio con el nombre de “graficosXX.fig” (ver Figura 3.4).

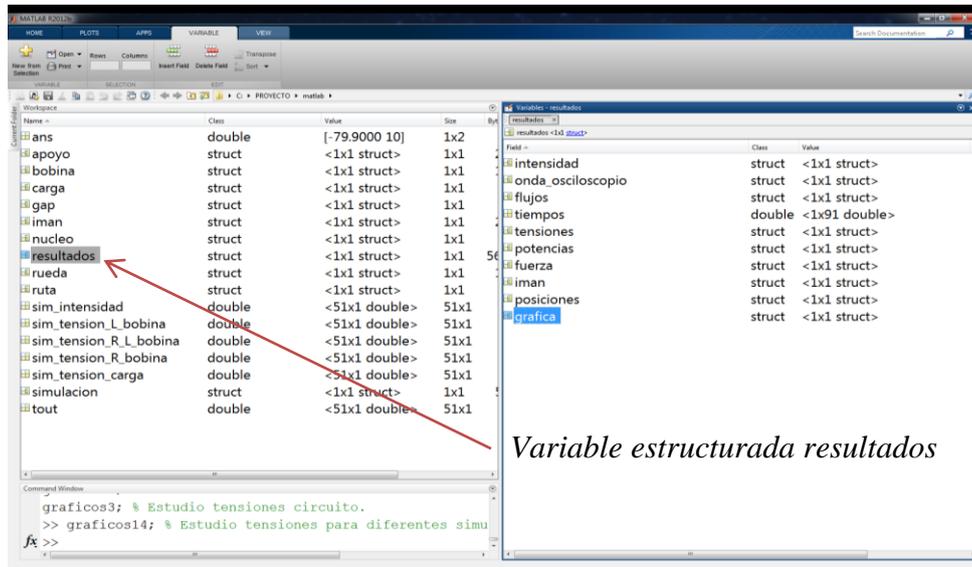


Figura 3.3. Variable estructurada resultados.

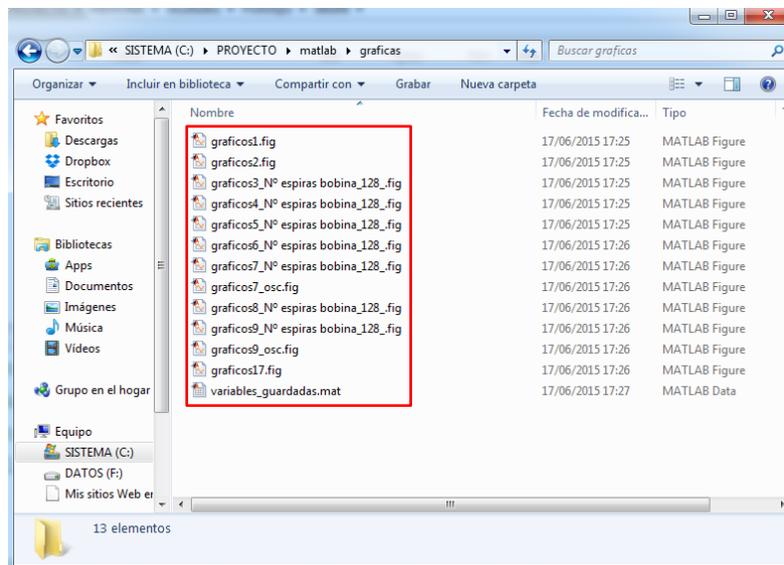


Figura 3.4. Variables y gráficos guardados.

Durante la ejecución del programa se puede observar en el Command Window de Matlab el tiempo restante aproximado.

```

Command Window
(serie 1/1) archivo generado c:/PROYECTO/femm/0_determino_L.fem
(serie 1/1) archivo analizado c:/PROYECTO/femm/0_determino_L.ans
(serie 1/1) archivo generado c:/PROYECTO/femm/0_vacio.fem
(serie 1/1) archivo analizado c:/PROYECTO/femm/0_vacio.ans
(serie 1/1) archivo generado c:/PROYECTO/femm/0_total.fem
(serie 1/1) archivo analizado c:/PROYECTO/femm/0_total.ans
(serie 1/1) archivo generado c:/PROYECTO/femm/0_reaccion_inducido
(serie 1/1) archivo analizado c:/PROYECTO/femm/0_reaccion_inducid
Quedan 0 horas 21 minutos 47 segundos
(serie 1/1) archivo generado c:/PROYECTO/femm/0_0005vacio.fem
(serie 1/1) archivo analizado c:/PROYECTO/femm/0_0005vacio.ans
(serie 1/1) archivo generado c:/PROYECTO/femm/0_0005total.fem
  
```

Figura 3.5. Tiempo restante.

Dependiendo de las condiciones de simulación se obtendrán unos resultados gráficos diferentes (ver Figura 3.1 en la página 20). Se indica a continuación la información que ofrece cada archivo de graficosXX.fig para el prototipo en modo detalle.

Gráficos 1.

Proporciona una información rápida de la simulación. Ver Anexos 2.1.1 y 2.2.1.

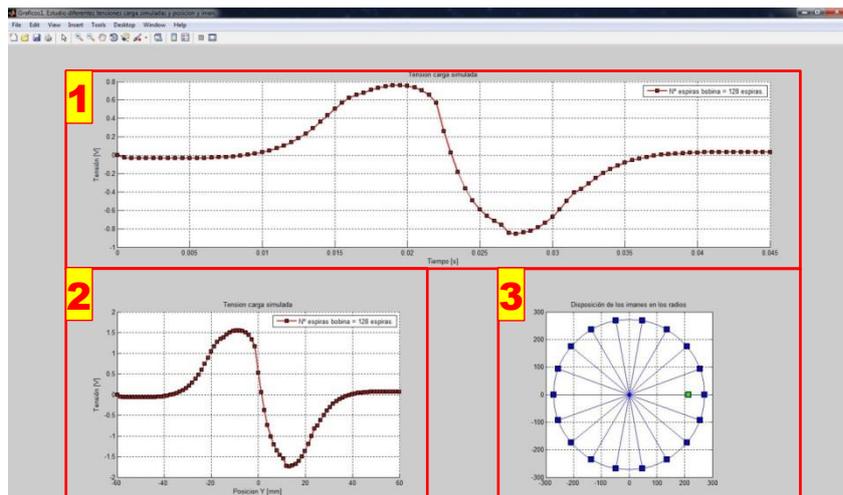


Figura 3.6. 'Gráficos1.fig' (plano 2.1).

1. Tensión en la carga contra tiempo.
2. Tensión en la carga contra posición Y del imán medida desde la base.
3. Disposición de los imanes en los radios.

Gráficos 2.

Se realiza un estudio del alabeo del imán. Ver Anexos 2.1.2 y 2.2.2.

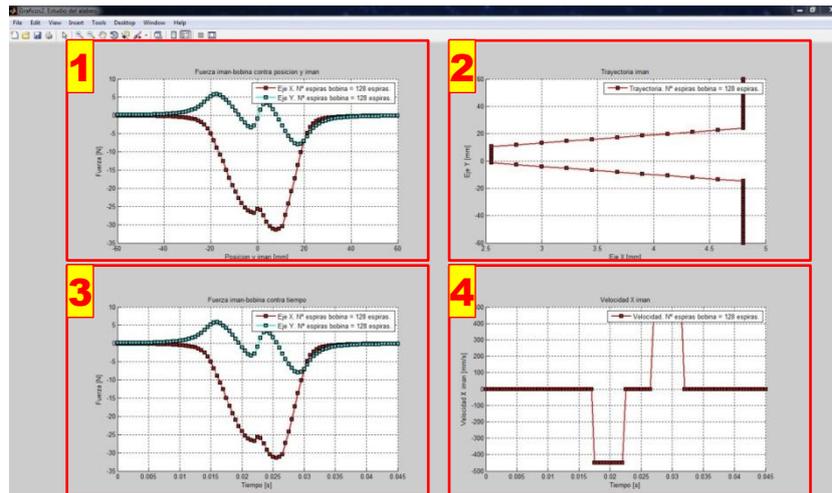


Figura 3.7. 'Gráficos2.fig' (plano 2.2).

1. Fuerza ejercida sobre el imán contra posición Y del mismo.
 2. Trayectoria del imán.
 3. Fuerza ejercida sobre el imán contra tiempo.
- Puede aportar una idea intuitiva acerca de dónde debe empezar y acabar de desplazarse lateralmente el imán para el modelado del alabeo.
4. Velocidad del imán en el eje X.

Gráficos 3.

En este archivo se muestran las tensiones contra el tiempo para los diferentes elementos del circuito del conjunto bobina-carga. Se muestran los valores eficaces en la leyenda. Ver *Anexos 2.1.3 y 2.2.3*.

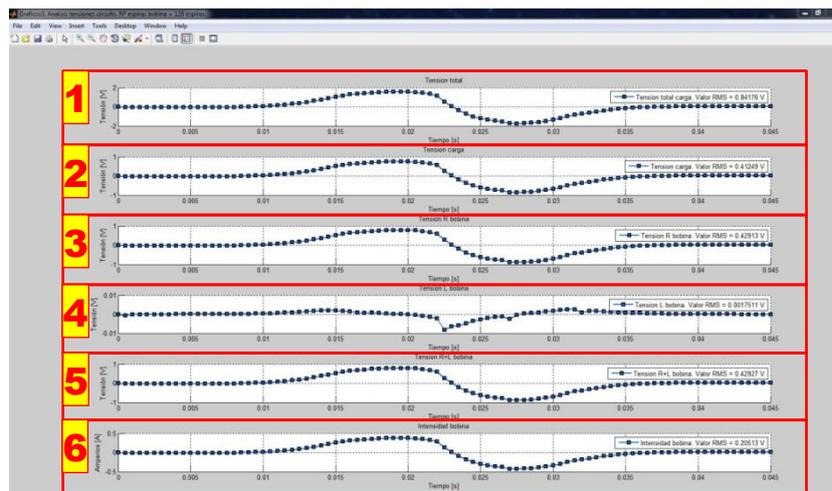


Figura 3.8. 'Gráficos3.fig' (plano 2.3).

1. Tensión total en el circuito contra el tiempo.

Es la tensión que se induce en la bobina teniendo en cuenta la reacción del inducido y la saturación del núcleo (ver apartado *Cálculo de la inductancia de la bobina* en la página 11).

2. Tensión en la carga contra el tiempo.
3. Tensión en la resistencia de la bobina contra el tiempo.
4. Tensión en la inductancia de la bobina contra el tiempo.
5. Tensión en la bobina contra el tiempo.
6. Intensidad en el circuito contra el tiempo.

Gráficos 4.

Se realiza un estudio de los flujos existentes para observar si coinciden adecuadamente con las tensiones durante el paso del imán por la bobina (detalle). Los archivos ‘graficos10.fig’ y ‘graficos14.fig’ son análogos a éste para el periodo y para un tiempo de simulación libre respectivamente. Ver *Anexos 2.1.4, 2.2.4 y 3.5*.

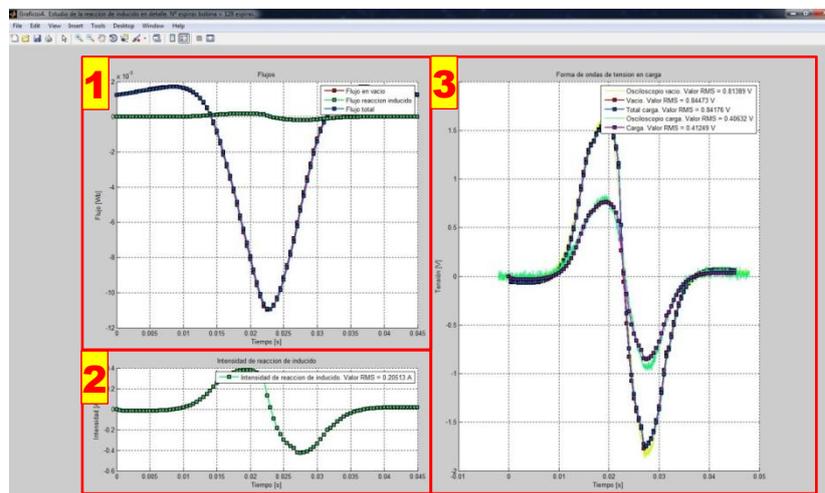


Figura 3.9. ‘Gráficos4.fig’ (plano 2.4).

1. Flujos de vacío, reacción del inducido y total frente a tiempo.

Se puede observar como para los instantes de máxima variación de flujo la tensión es máxima en términos absolutos.

2. Intensidad en el circuito responsable de la reacción del inducido.

3. Tensiones de vacío, total y de carga comparadas con las obtenidas en el osciloscopio.

Gráficos 5.

Se realiza un estudio de la potencia mostrando los valores eficaces en la leyenda. Los archivos ‘graficos11.fig’ y ‘graficos15.fig’ son análogos a éste para el periodo y para un tiempo de simulación libre respectivamente. Ver *Anexos 2.1.5, 2.2.5 y 3.6*.

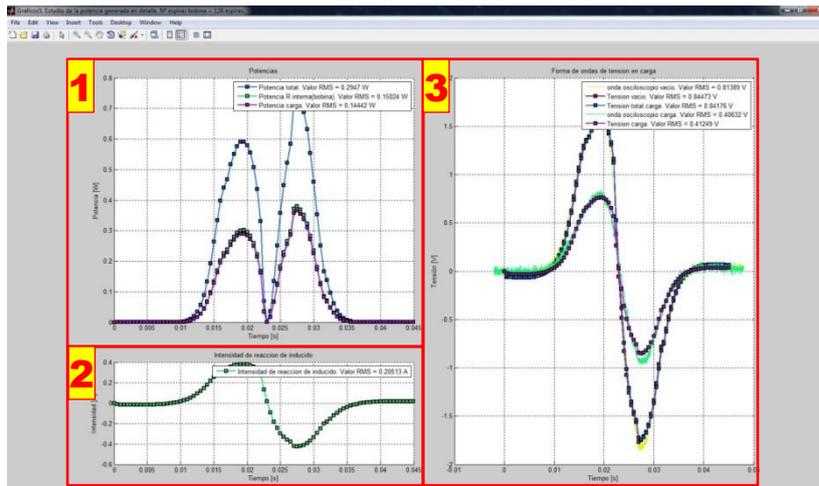


Figura 3.10. 'Gráficos5.fig' (plano 2.5).

1. Potencia total, en la carga y en la resistencia de la bobina.
2. Intensidad en el circuito responsable de la reacción del inducido.
3. Tensiones de vacío, total y de carga comparadas con las obtenidas en el osciloscopio.

Gráficos 6.

Se realiza un ajuste temporal para sobreponer y comparar las tensiones de vacío y la medida por el osciloscopio. Ver Anexo 2.1.6.1.

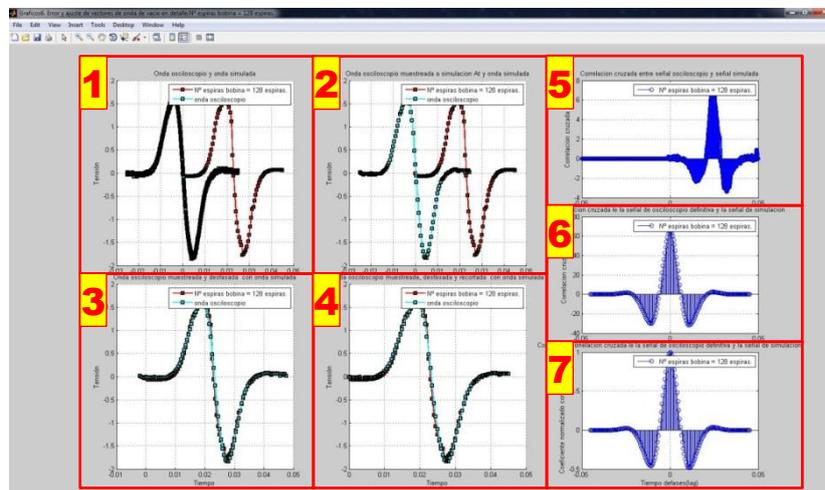


Figura 3.11. 'Gráficos6.fig' (plano 2.6.1).

1. Presentación de las 2 señales.
2. Se remuestra la señal del osciloscopio con el periodo de la señal simulada.
3. Al paso anterior se le añade el desfase temporal de la onda del osciloscopio.
4. Al paso anterior se le añade el recorte temporal de la señal del osciloscopio.
5. Correlación cruzada para las señales originales mostradas en la ventana 1 [7].

Nos da una idea del desfase orientativo que hemos de darle a la señal del osciloscopio. Éste puede variar ligeramente al remuestrear las señales.

6. Correlación cruzada para las señales originales mostradas en la ventana 4.

Se observa que las 2 señales están perfectamente centradas.

7. Coeficiente normalizado de la correlación cruzada para las señales originales mostradas en la ventana 4.

Es la gráfica anterior en valores normalizados de 0 a 1. Se observa que para 1 la fuerza de correlación es máxima.

Al ejecutar el script se muestra una gráfica con la semejanza de las 2 ondas basada en el error NRMSE (Normalized Root Mean Square Error) [8][9]. Ver Anexo 2.1.6.2.

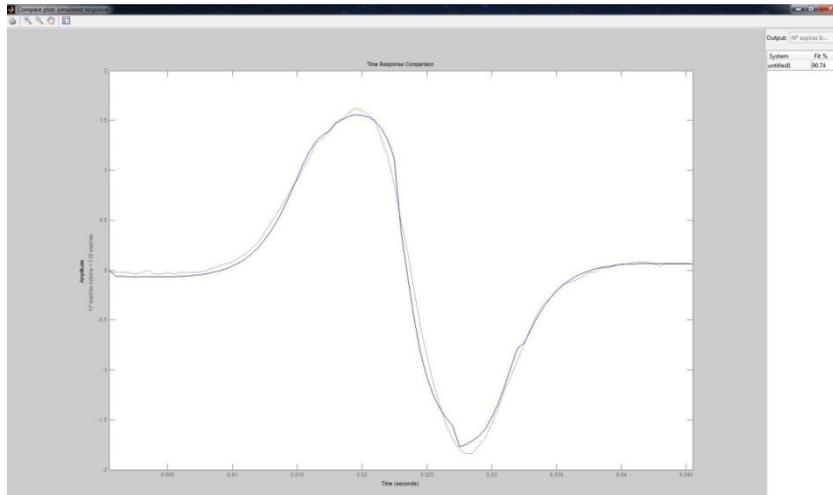


Figura 3.12. 'Gráficos6.fig' (plano 2.6.2).

Gráficos 7.

Se realiza un análisis espectral mediante la transformada rápida de Fourier [10] de la tensión de vacío en detalle. Ver Anexo 2.1.7.1.

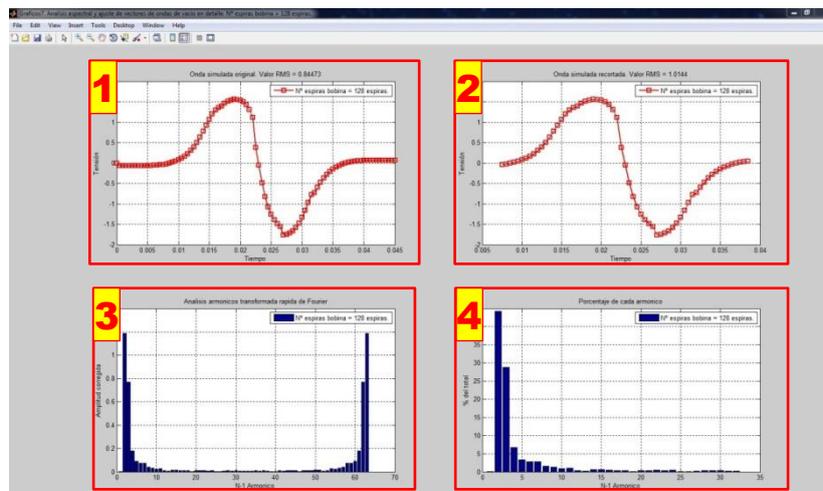


Figura 3.13. 'Gráficos7.fig' (plano 2.7.1).

1. Tensión de vacío en detalle simulada.
2. Tensión de vacío en detalle simulada y recortada.

Este paso permite centrarse en un intervalo temporal deseado.

3. Amplitud de los armónicos para la onda mostrada en (2).
4. Tanto por ciento de cada armónico para la onda mostrada en (2).

Notar que en los subgráficos 3 y 4 la amplitud de la barra en 1 representa el nivel de continua (armónico 0) y la barra 2 representa el nivel del armónico fundamental (armónico 1).

Gráficos 7, propuesta de filtrado de la señal del osciloscopio.

La señal de la medición de la tensión de vacío en el osciloscopio viene con una componente de ruido bastante grande. Esto provoca que al compararla con la simulada arroje un valor de error más grande. Se propone un método de filtrado consistente en localizar la banda de armónicos de ruido y filtrarla. En este caso se eliminan los armónicos a partir del armónico 10 inclusive. Ver Anexo 2.1.7.2.

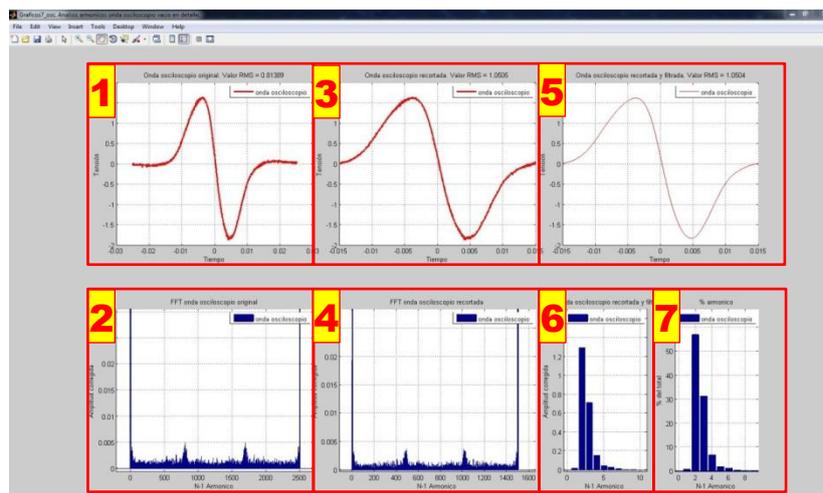


Figura 3.14. 'Gráficos7 osc.fig' (plano 2.7.2).

1. Señal de tensión del osciloscopio original.
2. Amplitud de los armónicos para la onda mostrada en (1).
3. Señal de tensión del osciloscopio original recortada.
4. Amplitud de los armónicos para la onda mostrada en (3).
5. Señal filtrada.
6. Amplitud de los armónicos para la onda mostrada en (5).
7. Tanto por ciento de cada armónico para la onda mostrada en (5).

Gráficos 8.

Las 2 gráficas siguientes son análogas a las del apartado Gráficos 6 en la página 33, pero con la tensión en la carga en vez de la de vacío. Ver *Anexo 2.1.8*.

El archivo ‘graficos12.m’ es análogo a este para el periodo. Ver *Anexos 2.2.6*.

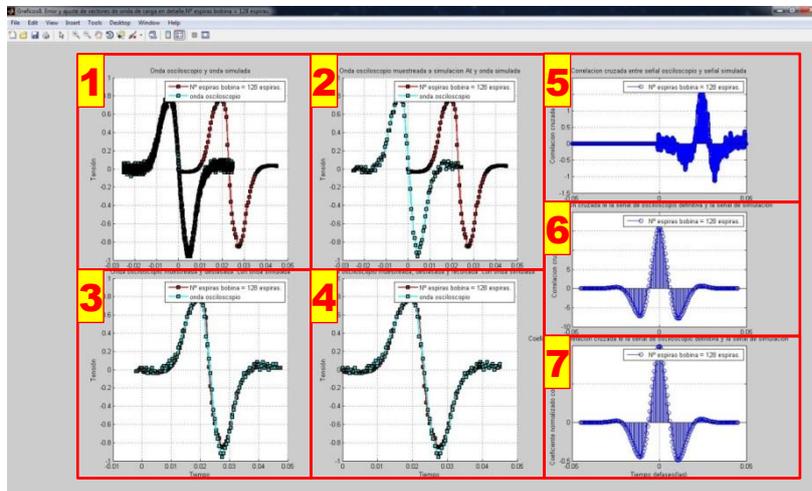


Figura 3.15. ‘Gráficos8.fig’ (plano 2.8.1).

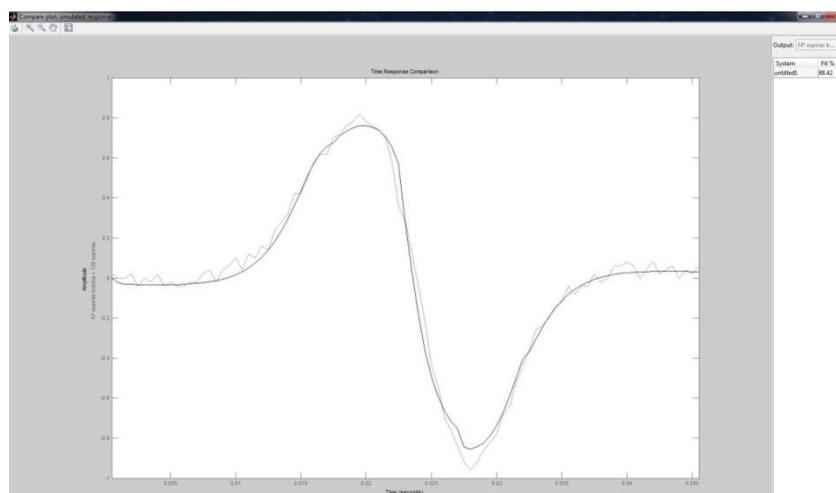


Figura 3.16. ‘Gráficos8.fig’ (plano 2.8.2).

Gráficos 9.

Las dos gráficas siguientes son análogas a las del apartado Gráficos 7 en la página 34, pero con la tensión en la carga en vez de la de vacío. Ver *Anexo 2.1.9*.

Los archivos ‘graficos13.fig’ y ‘graficos16.fig’ son análogos a éste para el periodo y para un tiempo de simulación libre respectivamente. Ver *Anexos 2.2.7* y *3.7*.

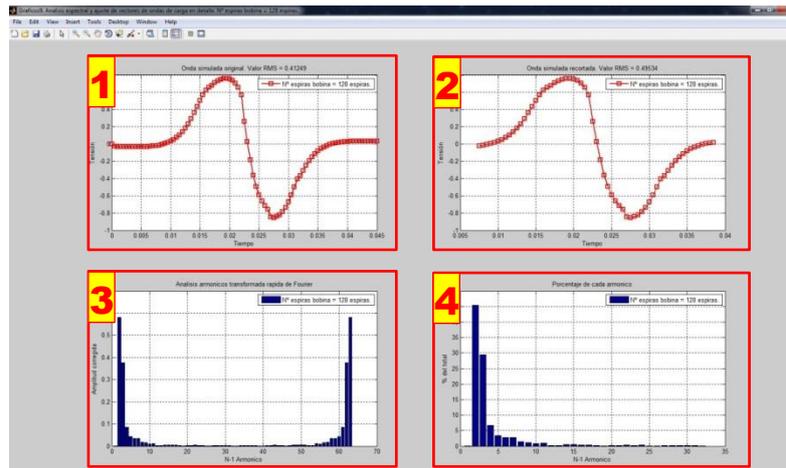


Figura 3.17. 'Gráficos9.fig' (plano 2.9.1).

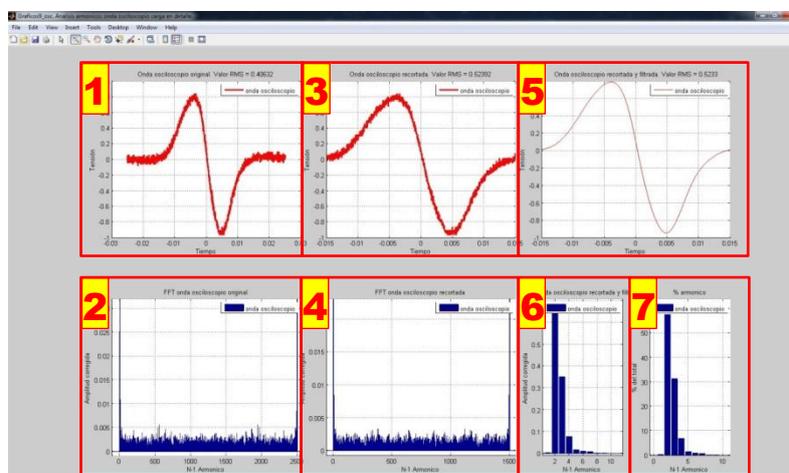


Figura 3.18. 'Gráficos9_osc.fig' (plano 2.9.2).

Gráficos 17.

Se muestran las tensiones de vacío, total y de la carga en una misma gráfica (ver Anexo 2.10). Este archivo sirve como paso previo al script de apoyo 'junta_graficas' (ver Anexo 4.29) para poder combinar resultados de simulaciones anteriores.

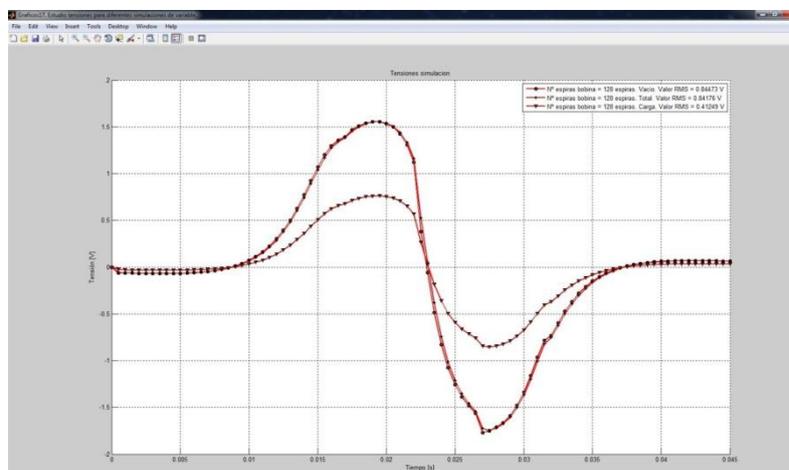


Figura 3.19. 'Gráficos17.fig' (plano 2.10).

CAPÍTULO 4: RESULTADOS.

Caso de estudio.

Planteamiento.

Se requiere una tensión de 8 V y una intensidad de 0,1 A eficaces en la carga para 1 vuelta completa de la rueda. Se imponen las siguientes restricciones:

- *Numero de vueltas de la bobina limitado a que la masa del cobre no supere los 300 g. Se podrá superar ligeramente este valor si resulta conveniente en algún caso por el número de imanes utilizados. En cualquier caso no se podrá superar los 350 g.*
- *Menor número de imanes posible.*

Solución.

Se analiza las posibles combinaciones para la construcción de la bobina con la restricción del peso.

Diámetro [mm]	Espiras	Peso [g]	Resistencia [Ω]
0,25	1000	39,7	33,83
0,25	2000	79,4	67,66
0,25	3000	119,1	101,49
0,25	4000	158,8	135,32
0,25	5000	198,5	169,15
0,25	6000	238,2	202,99
0,25	7000	278,0	236,82
0,25	8000	317,7	270,65
0,25	9000	357,4	304,48
0,315	1000	63,05	21,30
0,315	2000	126,1	42,61
0,315	3000	189,1	63,92
0,315	4000	252,2	85,23
0,315	5000	315,2	106,54
0,315	6000	378,3	127,85
0,4	1000	101,6	13,21
0,4	2000	203,3	26,43
0,4	3000	305,02	39,64
0,4	4000	406,6	52,86
0,5	1000	158,8	8,45
0,5	2000	317,7	16,91
0,5	3000	476,5	25,37

Tabla 4.1. Posibles combinaciones de la bobina según el peso del cobre.

Se simulan todas las posibilidades que cumplen la restricción para obtener tensión e intensidad eficaces (ver *Anexo.3.I*). A continuación se muestran los valores eficaces de tensión e intensidad que cumplen con las condiciones para el menor número de imanes posible.

Diámetro	Espiras	Peso [g]	Tension RMS [V]	Intensidad RMS [A]	Nº Imanes
0,25	1000	39,717			
0,25	2000	79,433			
0,25	3000	119,150	10,160	0,102	16
0,25	4000	158,866	10,212	0,102	17
0,25	5000	198,583			
0,25	6000	238,299			
0,25	7000	278,016			
0,25	8000	317,732			
0,25	9000	357,449			
0,315	1000	63,054			
0,315	2000	126,108	10,169	0,101	15
0,315	3000	189,162	10,083	0,101	12
0,315	4000	252,216	10,035	0,100	13
0,315	5000	315,270	10,143	0,102	16
0,315	6000	378,324			
0,4	1000	101,674			
0,4	2000	203,349	10,016	0,100	12
0,4	3000	305,023	10,206	0,103	10
0,4	4000	406,697			
0,5	1000	158,866			
0,5	2000	317,732	10,198	0,102	11
0,5	3000	476,598			

Tabla 4.2. Valores de las bobinas que cumplen con los requisitos.

El mejor resultado se obtiene para un diámetro de 0,4 mm y 3000 espiras, permitiendo obtener los valores requeridos de tensión e intensidad eficaces con 10 imanes. Se simula con mayor detalle esta disposición para comprobar que no varían significativamente sus valores (ver *Anexo 3*). En la *Tabla 4.3* se muestran las variables de entrada para la simulación. Los valores en rojo son los modificados para obtener una precisión mayor.

BOBINA	RUEDA	IMÁN	NÚCLEO
bobina.a = 10 bobina.h = 0.4 bobina.N = 3000 bobina.radio = 15,33 bobina.resistividad = 1,7241e-08 bobina.densidad = 0,0084	rueda.neumatico.circunferencia = 2114 rueda.llanta.r = 336,4535 rueda.neumatico.v = 4,1667e+03	iman.a = 10 iman.h = 20 iman.n = simulacion.variable.valor iman.cohercitividad = 955000	nucleo.h = 20 nucleo.chapa.h = 20 nucleo.material = 'Pure iron, annelaed'
VARIABLES COMUNES simulacion.profundidad = 20 simulacion.t_total = 0,5075 simulacion.At = 0,0025 → 0.0005 simulación.iteraciones = 5 → 40	MALLADOS	ALABEO	CARGA carga.resistencia = 100 carga.L = 0 carga.C = 0
	simulacion.mallado.bobina = 1 simulacion.mallado.gap = 1 simulacion.mallado.gap = 1 simulacion.mallado.iman = 1 simulacion.mallado.air1 = 100 simulacion.mallado.air_interior = 50	simulacion.alabeo.yo = -14,5 simulacion.alabeo.ym = 11 simulacion.alabeo.yf = 25,5 simulacion.gap.A_alabeo = 0,225 simulación.gap.minimo = 2.7 simulacion.gap.a_inicial = 4,8	GAP gap.a = 4,8
			CONTORNO simulación.controno1 = 160
DATOS OSCILOSCOPIO		VARIABLE ESTUDIADA	
NO SON NECESARIAS		simulacion.variable.inicio = 1 simulacion.variable.final = 18 simulacion.variable.A = 1 apoyo.graficas.nombre_variable = 'Nº imanes' apoyo.graficas.medida_variable = ' imanes. '	
RUTAS			
ruta.femm = 'c:/PROYECTO/femm/' ruta.grafica = 'c:/PROYECTO/matlab/Graficas/' ruta.datos = 'c:/PROYECTO/datos/'			

Tabla 4.3. Esquema resumen de las variables de entrada para tabla de Anexo 3.1.

Verificación experimental.

Se realizaron en el laboratorio pruebas con el prototipo empleando un osciloscopio digital Tektronic212. Las capturas se recogieron empleando el programa desarrollado por el profesor Miguel Samplón. La velocidad marcada en el cuentakilómetros se ajustó a 15 km/h (1,97 Hz) variando el potenciómetro del motor de arrastre. Los resultados obtenidos durante la simulación del prototipo están recogidos en los *Anexos 2.1* y *2.2*. La información que ofrece cada archivo de graficosXX.fig está comentada en el apartado *Variables de salida* en la página 29. Se comentan los aspectos más relevantes a continuación.

1) Error.

Los resultados obtenidos para el grado de semejanza entre la simulación y la señal medida en el osciloscopio por medio del error NRMSE son:

Intervalo temporal estudiado	SIN ALABEO		CON ALABEO	
	Tensión vacío	Tensión carga	Tensión vacío	Tensión carga
Detalle	79,19%	77,33%	90,73%	88,41%
Periodo	-	-	-	87,61%

Tabla 4.4. Semejanza entre la tensión simulada y la del osciloscopio.

El menor grado de parecido de la tensión en la carga respecto a la de vacío se debe al ruido de la señal del osciloscopio. Si la amplitud de la tensión en la carga es menor que la de vacío, al normalizar el error, el ruido del osciloscopio tiene más peso en el NRMSE. En el apartado *Gráficos 7, propuesta de filtrado de la señal del osciloscopio* en la página 35, se propone un método de filtrado para minimizar este efecto.

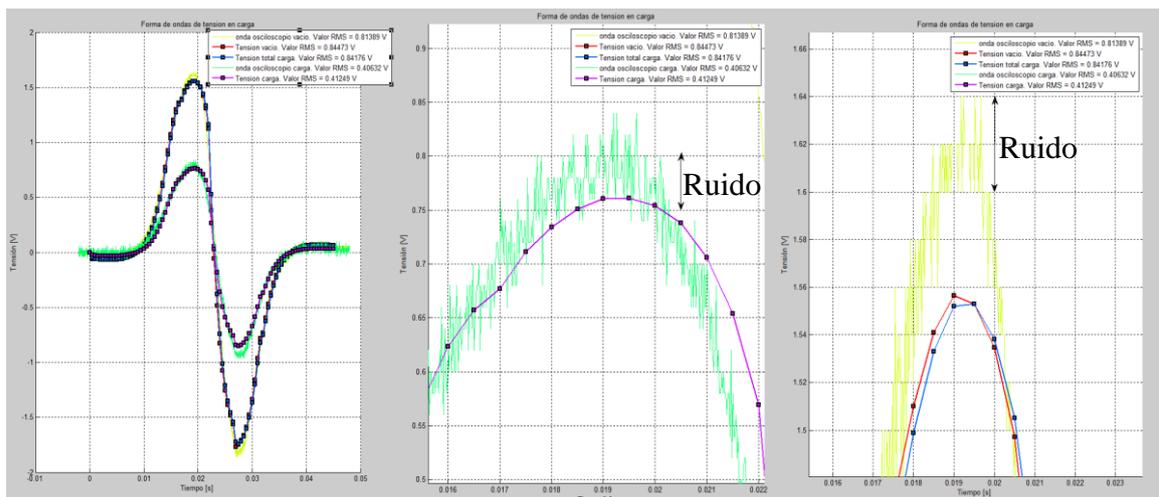


Figura 4.1. Ruido de la señal de tensión del osciloscopio.

El menor grado de parecido de la tensión del periodo respecto a la de detalle se debe a que la señal del periodo está creada a partir de la de detalle asignando el valor de 0 al resto del vector (ver *Figura 4.2*). Se tomó esta decisión porque el osciloscopio, con la ventana de tiempo del periodo, no es capaz de ofrecer una resolución temporal aceptable para efectuar

la comparación con la simulación. El programa necesita una resolución temporal que cree puntos coincidentes con los de la simulación. Esto es, un periodo de muestreo en el osciloscopio submúltiplo de la variable 'simulación.At'. En este caso, 'simulación.At' es 0,5 ms y el osciloscopio ofrece para la ventana temporal del periodo 0,4 ms, por lo que no son compatibles.

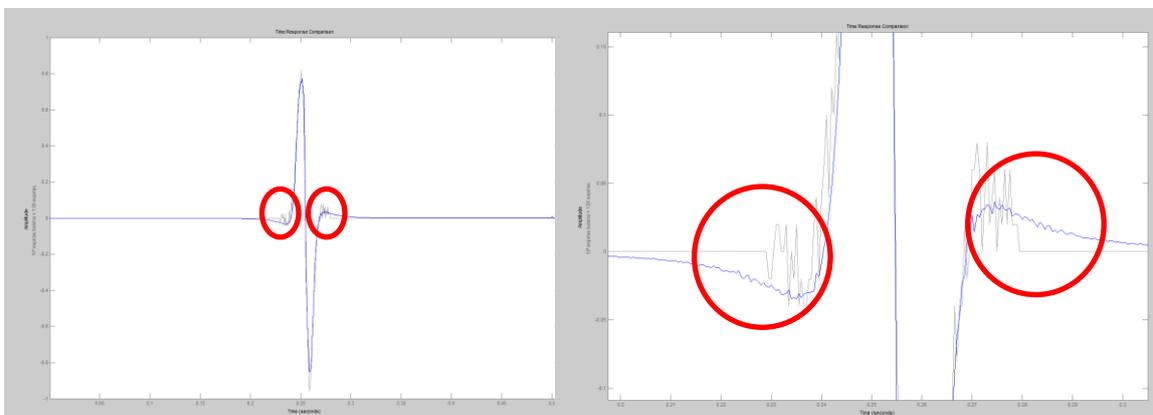


Figura 4.2. Detalle de la construcción de la tensión del osciloscopio en el periodo.

2) Ajuste de la velocidad.

El ajuste de la velocidad con el motor de arrastre arroja un error del 6,037 %. Es un error razonable, dados los medios materiales con los que está construido el prototipo. No se ha tenido en cuenta la aceleración y deceleración que sufre la rueda al aproximarse y alejarse el imán. En el Anexo 2.1.2 y 2.2.2 se puede apreciar que existen estas fuerzas en el eje Y del imán.

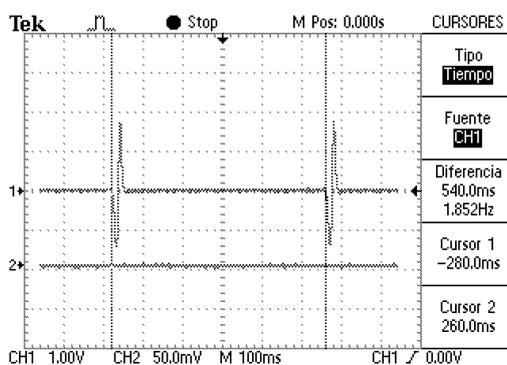


Figura 4.3. Captura de la frecuencia del periodo de giro de la rueda.

3) Armónicos.

El paso de 1 imán por la bobina produce una onda cuasisinusoidal en la que el primer armónico tiene mucho peso.

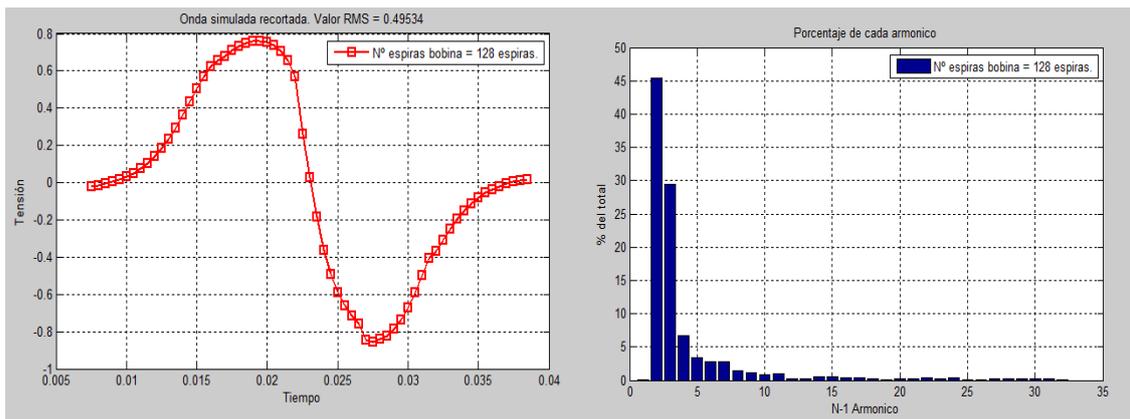


Figura 4.4. Armónicos del prototipo para el paso del imán (detalle).

Cuando esta onda se traslada al periodo de giro de la rueda se pierde la importancia del primer armónico. El armónico más importante pasa a ser el 18°.

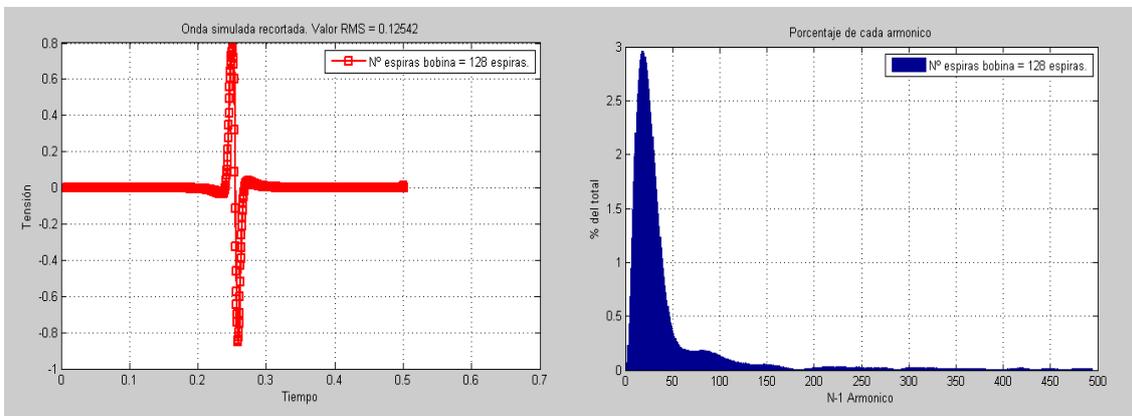


Figura 4.5. Armónicos del prototipo para el periodo de giro (periodo).

Es interesante comprobar como al colocar 18 imanes la importancia del armónico 18° debería aumentar.

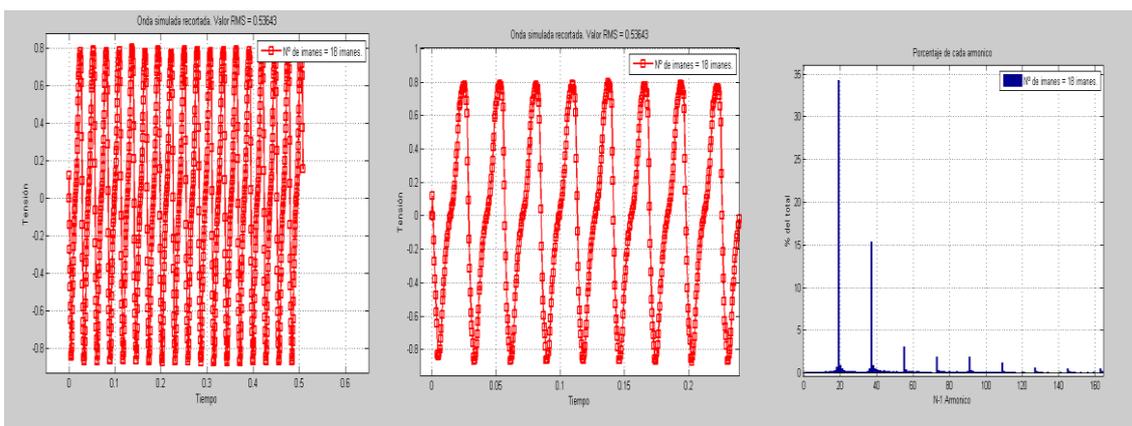


Figura 4.6. Armónicos del prototipo para 18 imanes (periodo).

BIBLIOGRAFÍA.

- *[1] Página web de la empresa Reelight. <https://www.reelight.com/en/>
- *[2] Dr. Antonio Usón Sardaña. Tesis doctoral “Aplicación del método de elementos finitos al perfeccionamiento de pinzas amperimétricas”. 2007.
- *[3] Imagen extraída de la página web.
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/solids/magperm.html>
- *[4] Guión de la práctica 5 de la asignatura Física II del Grado de Ing. Eléctrica de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza (EINA).
- *[5] Young, Hugh D. y Roger A. Freedman. Física universitaria, con física moderna. 12ª Edición. Vol 2. pp. 1034-1039. Pearson educación. México, 2009.
- *[6] Young, Hugh D. y Roger A. Freedman. Física universitaria, con física moderna. 12ª Edición. Vol 2. pp. 981. Pearson educación. México, 2009.
- *[7] Yudy Yamileth Suarez Carvajal. Presentación “Correlación y correlación cruzada aplicada al procesamiento de señales”. Universidad tecnológica de Pereira.
- *[8] Jean Michel Franco, Daniel Gómez, Jorge Hernán Murcia, Peter Thomson, Johannio Marulanda. “Desarrollo e implementación de un sistema láser para caracterización dinámica y medición de desplazamientos en estructuras civiles”. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia n.60. ISSN 0120-6230. 2011.
- *[9] Ayuda de Matlab online.
<http://es.mathworks.com/help/ident/ref/goodnessoffit.html?searchHigh>
- *[10] Félix Sánchez-Tembleque Díaz-Pache. Curso “Tratamiento de Datos en las Técnicas Instrumentales”. POP en Ciencias de la Salud. Master en Asistencia e Investigación sanitaria. Universidade da Coruña.