

TÍTULO	Simulación JMAG de la respuesta dinámica de un relé electromagnético. Influencia del diseño y de las corrientes parásitas.		
AUTOR	Javier Entrecanales Monasterio		
DIRECTOR / PONENTE	Luis Fernando Mantilla Peñalba		
TITULACIÓN	<i>Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales</i>	FECHA	Junio de 2024

PALABRAS CLAVE

Relé electromagnético, JMAG, simulación numérica, corrientes parásitas, respuesta dinámica, análisis térmico.

DESCRIPCIÓN RESUMEN DEL TFG

Este Trabajo de Fin de Grado se centra en el estudio de la respuesta dinámica de un relé electromagnético considerando la influencia de las corrientes parásitas y analizando la relevancia de distintos parámetros de su diseño.

Para realizar este análisis, se emplea el software de JMAG, una potente herramienta de simulación que permite obtener unos resultados precisos mediante el método de elementos finitos (FEM).

Para realizar los estudios pertinentes, es necesario modelizar los distintos componentes del relé con el propio editor geométrico de JMAG. Tras ello, se definirán los materiales de los componentes, el circuito eléctrico, las condiciones de la simulación y el mallado para poder llevar a cabo la simulación.

Tras un análisis de la respuesta dinámica en condiciones normales de funcionamiento, se elaboran nuevos estudios alternativos para analizar la influencia de ciertos parámetros constructivos en la respuesta del relé, como son la propia consideración de las corrientes parásitas, la tensión de alimentación de la bobina y las dimensiones geométricas del núcleo del estator. Además, se incluye el cálculo de la tensión mínima de activación utilizando la herramienta de optimización facilitada por JMAG.

Para concluir, se realiza un estudio del comportamiento térmico del dispositivo tras una activación y desactivación repetitiva en un breve espacio de tiempo. Esto permitirá conocer los cambios de temperatura y la disipación de calor que tiene lugar en estas condiciones, así como explorar otros módulos del software.

CONCLUSIONES

La simulación del relé permite estudiar su respuesta dinámica tras ser energizado, así como comprobar la evolución de la corriente que atraviesa la bobina durante el funcionamiento.

Por otro lado, se confirma la importancia de considerar las corrientes parásitas a la hora de simular el funcionamiento del relé, pues provocan un efecto desmagnetizante que retrasa su activación.

En cuanto a la tensión de alimentación se comprueba como un incremento de esta provoca un adelanto de la activación del relé, aunque deberían llevarse a cabo otros análisis para conocer con exactitud las pérdidas y la rentabilidad de tomar esta medida.

El análisis de las dimensiones geométricas del estator muestra la importancia de realizar un engrosamiento en su parte superior para mejorar considerablemente el tiempo de activación, aunque la sección transversal de esta zona tampoco debe incrementarse en exceso.

En lo que al análisis térmico respecta, se ha utilizado con éxito la herramienta que JMAG facilita para combinar un estudio térmico y otro magnético, obteniendo como resultado un calentamiento prácticamente despreciable incluso en una situación extrema de funcionamiento

REFERENCIAS

- JMAG. (2017). *Manuales de Usuario*.
- JMAG (versión 23.0). *Help & Self Learning System [software]*.
- Gurevich, V. (2005). *Electric Relays: Principles and Applications*.
- Mantilla, L. F. (2018). *Fundamentos de Transformadores Eléctricos y Máquinas Eléctricas Rotativas*.
- Sudhoff, S. D. (2014). *Power magnetic devices: A Multi-Objective Design Approach*. John Wiley & Sons.
- Ministerio de Ciencia e Innovación. (2009). *Requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial* (Orden CIN/351/2009).
- Ministerio de Universidades. (2021). *Organización de las enseñanzas universitarias y del procedimiento de aseguramiento de su calidad* (Real Decreto 822/2021).
- Ministerio de Universidades. (2013). *Resolución de 15 abril de 2013, de la Universidad de Cantabria, por la que se publica el plan de estudios de Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales*.
- Universidad de Cantabria. (2008). *Memoria para la solicitud de verificación del Grado Universitario en Ingeniería en Tecnologías Industriales de la Universidad de Cantabria*.
- Universidad de Cantabria. (2023). *Normativa de gestión académica de los estudios oficiales de grado*.
- Universidad de Cantabria (2023). *Guía docente Trabajo de Fin de Grado (G733)*.
- Comisión Académica. (2021). *Normativa del Proyecto Fin de Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicación (ETSIIyT)*.
- Asociación Española de Normalización. (2019). *Criterios generales para la elaboración de informes periciales* (UNE 197001).
- Asociación Española de Normalización. (2014). *Criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico* (UNE 157001).
- Asociación Española de Normalización. (2013). *Directrices para la redacción de referencias bibliográficas y de citas de recursos de información* (UNE 197001).

TÍTULO	JMAG Simulation of the dynamic response of an Electromagnetic Relay. Influence of design and eddy currents.		
AUTHOR	Javier Entrecanales Monasterio		
DIRECTOR / SPEAKER	Luis Fernando Mantilla Peñalba		
ACADEMIC DEGREE	<i>Industrial Engineering</i>	DATE	June 2024

KEYWORDS

Electromagnetic relay, JMAG, numerical simulation, eddy currents, dynamic response, thermal analysis.

SUMMARY DESCRIPTION OF TFG

This TFG focuses on the study of the dynamic response of an electromagnetic relay, considering the influence of eddy currents and analysing the relevance of different design parameters.

To accomplish this analysis JMAG software is used, a powerful simulation tool that provides precise results through the finite element method (FEM).

To carry these studies, it is necessary to model the different components of the relay with the JMAG's own geometric editor. After that, the materials of the components, the electrical circuit, the simulation conditions, and the meshing properties will be defined to perform the simulation.

After analysing the dynamic response under normal operating conditions, new alternative studies are conducted to analyse the influence of certain constructive parameters on the relay's response, such as the consideration of eddy currents, the coil supply voltage and the geometric dimensions of the stator core. Additionally, the calculation of the pickup voltage is included using JMAG's optimization tool.

Finally, a study of the device's thermal behaviour is conducted after repetitive activations in a short period of time. This will allow to obtain the temperature distribution and heat dissipation that occur under these conditions, as well as exploring other modules of the software.

CONCLUSIONS

The relay simulation allows studying its dynamic response after being energized, as well as verifying the evolution of the current passing through the coil during operation.

On the other hand, the importance of considering eddy currents when simulating the relay operation is confirmed, as they cause a demagnetizing effect that delays its activation.

Regarding the supply voltage, it is observed that an increase in it leads to an advance in the relay's activation, although further analysis should be carried out to determine the losses and the profitability of implementing this measure.

The analysis of the geometric dimensions of the stator core shows the importance of thickening its upper part to significantly improve the activation time, although the cross-sectional area of this zone should not be excessively increased either.

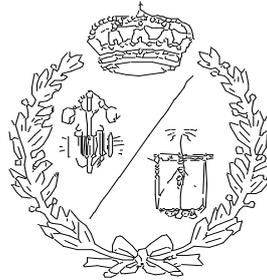
Finally, concerning the thermal analysis, the tool provided by JMAG for coupling thermal and magnetic studies has been successfully employed, resulting in practically negligible heating even in an extreme operating condition.

REFERENCES.

- JMAG. (2017). *Manuales de Usuario*.
- JMAG (versión 23.0). *Help & Self Learning System [software]*.
- Gurevich, V. (2005). *Electric Relays: Principles and Applications*.
- Mantilla, L. F. (2018). *Fundamentos de Transformadores Eléctricos y Máquinas Eléctricas Rotativas*.
- Sudhoff, S. D. (2014). *Power magnetic devices: A Multi-Objective Design Approach*. John Wiley & Sons.
- Ministerio de Ciencia e Innovación. (2009). *Requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial (Orden CIN/351/2009)*.
- Ministerio de Universidades. (2021). *Organización de las enseñanzas universitarias y del procedimiento de aseguramiento de su calidad (Real Decreto 822/2021)*.
- Ministerio de Universidades. (2013). *Resolución de 15 abril de 2013, de la Universidad de Cantabria, por la que se publica el plan de estudios de Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales*.
- Universidad de Cantabria. (2008). *Memoria para la solicitud de verificación del Grado Universitario en Ingeniería en Tecnologías Industriales de la Universidad de Cantabria*.
- Universidad de Cantabria. (2023). *Normativa de gestión académica de los estudios oficiales de grado*.
- Universidad de Cantabria (2023). *Guía docente Trabajo de Fin de Grado (G733)*.
- Comisión Académica. (2021). *Normativa del Proyecto Fin de Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicación (ETSIIyT)*.
- Asociación Española de Normalización. (2019). *Criterios generales para la elaboración de informes periciales (UNE 197001)*.
- Asociación Española de Normalización. (2014). *Criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico (UNE 157001)*.
- Asociación Española de Normalización. (2013). *Directrices para la redacción de referencias bibliográficas y de citas de recursos de información (UNE 197001)*.

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**SIMULACIÓN JMAG DE LA RESPUESTA
DINÁMICA DE UN RELÉ
ELECTROMAGNÉTICO. INFLUENCIA DEL
DISEÑO Y DE LAS CORRIENTES
PARÁSITAS.**

**(JMAG SIMULATION OF THE DYNAMIC
RESPONSE OF AN ELECTROMAGNETIC RELAY.
INFLUENCE OF DESIGN AND EDDY CURRENTS)**

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

Autor: Javier Entrecanales Monasterio
Junio – 2024

PRÓLOGO

Este Trabajo Fin de Grado (TFG) es un documento académico con finalidad y contenidos diferentes de los proyectos técnicos, los proyectos de actividad y los informes periciales regulados por la norma UNE. Sin embargo, como se recoge en el Pliego de Condiciones, la Orden CIN/351/2009, la Memoria de Verificación del título y la Normativa del Proyecto Fin de Grado de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación establecen como competencia específica asignada al TFG que sea “un proyecto en el ámbito de las tecnologías específicas de la Ingeniería Industrial de naturaleza profesional”. Las normas UNE citadas (también incluidas en el Pliego de Condiciones) aportan ese carácter profesional.

Por estos motivos, es instructivo para el estudiante que la estructura y el desarrollo del documento se adapte normativamente a aquellos. Con ese objetivo y dado el objeto técnico de este TFG, se asume que tiene aspectos semejantes a un informe pericial por su finalidad demostrativa ante un tribunal, en este caso académico, y aspectos propios de un proyecto técnico por su contenido tecnológico.

Con estas consideraciones el documento adopta una estructura mixta resultante de las estipulaciones de UNE 197001:2019 (informe pericial) con adiciones de UNE 157001:2014 (proyecto técnico). El Pliego de Condiciones detalla la adaptación formal del documento.

IDENTIFICACIÓN INICIAL

DATOS DEL PROYECTO	
Título en español: Simulación JMAG de la respuesta dinámica de un relé electromagnético. Influencia del diseño y de las corrientes parásitas.	
Título en inglés: JMAG Simulation of the dynamic response of an Electromagnetic Relay. Influence of design and eddy currents.	
CÓDIGO: GITI/2023-24/JEM	
DATOS DEL DESTINATARIO	
Nombre	Luis Fernando Mantilla Peñalba
Entidad	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación. Universidad de Cantabria
DATOS DEL AUTOR	
Nombre	Javier Entrecanales Monasterio
Titulación	Proyectante Ingeniero en Tec. Industriales
Entidad	Universidad de Cantabria E.T.S. de Ing. Industriales y Telecomunicación
Dirección	Avda. de los Castros, 46. 39005 Santander
Correo electrónico	jem808@alumnos.unican.es
DATOS DEL PROMOTOR	
Nombre	Luis Fernando Mantilla Peñalba
Entidad	Dpto. de Ingeniería Eléctrica y Energética
EMPLAZAMIENTO GEOGRÁFICO	
No procede	
TRABAJOS PREVIOS	
No procede	

ÍNDICE GENERAL

MEMORIA	4
ANEXOS	92
PLANOS	108
PLIEGO DE CONDICIONES	185
MEDICIONES	223
PRESUPUESTO	225

MEMORIA

ÍNDICE MEMORIA

1	Objeto	7
2	Alcance	8
3	Antecedentes	10
3.1	Electromagnetismo y materiales magnéticos.....	10
3.2	Pérdidas magnéticas	14
3.2.1	Pérdidas por histéresis.....	15
3.2.2	Pérdidas por corrientes parásitas	15
3.3	El relé	16
3.3.1	El relé electromagnético	18
3.3.2	Energización del relé.....	19
4	Condiciones preliminares	23
5	Documentos de referencia	25
6	Terminología	27
6.1	Método por Elementos Finitos	27
6.2	FEM COIL.....	27
6.3	Componentes del relé.....	28
6.3.1	Núcleo móvil	28
6.3.2	Núcleo del estátor.....	28
6.3.3	Armadura	28
6.3.4	Bobina	28
6.4	Nomenclatura	29
7	Desarrollo del estudio.....	31
7.1	Preparación de la simulación.....	31

7.1.1	Modelización geométrica	31
7.1.2	Ajustes previos de computación.....	42
7.1.3	Asignación de materiales	45
7.1.4	Creación del circuito eléctrico	47
7.1.5	Definición de las condiciones.....	51
7.1.6	Generación del mallado	55
7.2	Primera simulación y obtención de resultados	56
7.2.1	Análisis de los resultados	57
7.3	Otros estudios de interés.....	62
7.3.1	Influencia de las corrientes parásitas	62
7.3.2	Influencia de la tensión de alimentación.....	65
7.3.3	Influencia de las dimensiones geométricas del núcleo del estátor.....	71
7.4	Análisis térmico.....	75
7.4.1	Preparación del estudio	75
7.4.2	Simulación del estudio	80
7.4.3	Análisis de los resultados	81
8	Conclusiones	85
9	Relación de figuras.....	87
10	Relación de ecuaciones.....	90

1 Objeto

El objetivo del presente proyecto consiste en la simulación por computador de la respuesta dinámica de un relé electromagnético, considerando la influencia de las corrientes parásitas y analizando el impacto de distintos parámetros constructivos, tales como la tensión de alimentación o las dimensiones geométricas. En estas simulaciones se realizará un análisis del comportamiento dinámico del relé, teniendo en cuenta la interacción entre el campo magnético generado por la bobina y el material ferromagnético del dispositivo, y haciendo especial hincapié en el tiempo de activación y desactivación.

Para concluir, se realizará un análisis del comportamiento térmico que presenta el relé tras una activación repetitiva en un breve espacio de tiempo, que permitirá conocer los cambios de temperatura que tienen lugar y explorar otros módulos del software empleado.

Para dicho estudio se emplearán las licencias del software profesional de JMAG adquiridas por el grupo GAIME (Grupo de Accionamientos Industriales y Máquinas Eléctricas) del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética de la ETSIT de la Universidad de Cantabria.

2 Alcance

El estudio de la respuesta dinámica del relé electromagnético se centrará exclusivamente en los aspectos relacionados con el electromagnetismo, obviando por simplicidad factores mecánicos, como vibraciones o fricciones entre los componentes, u otros fenómenos físicos que no estén relacionados directamente con la interacción entre el campo magnético generado por la bobina y los componentes ferromagnéticos del relé.

Para dicho estudio se utilizará el software de simulación computacional de JMAG-DESIGNER. Este software ofrece las herramientas necesarias para que, por medio de la modelación por elementos finitos, se pueda realizar un análisis detallado de la respuesta dinámica del relé en distintos escenarios.

El software de JMAG ofrece distintos módulos especializados para abordar una gran variedad de problemas y aplicaciones en el campo de la ingeniería.

Dadas las características del estudio de la respuesta dinámica, en el que tanto la corriente como las fuerzas de atracción y del muelle cambian con el desplazamiento del núcleo móvil del relé, es necesario utilizar el módulo magnético de análisis transitorio (TR), en el que la fuerza magnetomotriz generada por una corriente y la posición del cuerpo estudiado dependen del tiempo.

En lo que a la modelización del relé respecta, se diferenciarán cuatro elementos básicos: la bobina, el núcleo móvil, el núcleo del estátor y la armadura. Puesto que el estudio se centra en la respuesta dinámica del núcleo móvil y más tarde en el análisis térmico de los componentes principales del relé, se han obviado otros componentes presentes en la estructura típica de los relés electromagnéticos:

- Aislantes: los relés presentan elementos aislantes en distintos puntos para una correcta separación de los circuitos de la bobina, los contactos y las partes ferromagnéticas del dispositivo. En el caso del aislamiento existente entre el núcleo del estátor y la bobina, se modelizará como una delgada capa de aire, evitando la creación de piezas adicionales en el entorno de JMAG y simplificando por tanto las simulaciones.

- Contactos: el movimiento del núcleo móvil es utilizado para la conexión o desconexión de un circuito externo por medio de contactos fijos y móviles. Estas pletinas de metal flexible están completamente aisladas del cuerpo del relé, por lo que tampoco son modelizadas en el entorno de JMAG.

Además, es importante mencionar la forma en que se realizará la modelización de los cuatro elementos mencionados. Dada la simetría geométrica del modelo se construirá solo la mitad del relé electromagnético, asumiendo que todos aquellos fenómenos que tengan lugar a un lado del plano de simetría serán iguales al otro lado. Esto simplificará la creación de la geometría y los cálculos computacionales del estudio.

Por último y con la intención de facilitar la comprensión del trabajo, es conveniente delimitar los estudios y simulaciones que a continuación se van a recoger.

Tras haber ejecutado un estudio acerca de las características dinámicas de la respuesta del relé, se procederá a realizar una simulación para justificar la necesidad de considerar las corrientes parásitas. Posteriormente, se realizarán distintos estudios modificando ciertos parámetros del relé para comprobar su influencia en la respuesta e intentar una mejora de esta, como la tensión de alimentación o las dimensiones geométricas del modelo. Además, será llevado a cabo un proceso de optimización para obtener el valor mínimo de la tensión de alimentación que provoca la activación del relé.

Por otro lado, se realizará un análisis térmico del relé estudiado. Dado que este análisis del relé en las condiciones de funcionamiento del estudio anterior no aportaría unos resultados relevantes, se simulará un accionamiento repetitivo del dispositivo en un breve espacio de tiempo. De esta forma, se podrá comprobar los cambios de temperatura y el calor disipado por los distintos componentes en esta situación extrema de funcionamiento. Para ello, se utilizará el módulo HT (*Thermal Analysis*), que permite realizar un análisis térmico transitorio.

3 Antecedentes

3.1 Electromagnetismo y materiales magnéticos

Antes de comenzar con el desarrollo del proyecto, es necesario realizar una breve introducción sobre los principios del electromagnetismo y los materiales magnéticos, para contextualizar el estudio y facilitar su comprensión.

Si bien es cierto que en los inicios del siglo XIX ya se conocían las acciones del campo eléctrico y el campo magnético, se consideraban fenómenos completamente independientes entre sí. No fue hasta 1873 cuando James Clerk Maxwell consiguió unificar el trabajo que otros científicos habían realizado, como Gauss, Faraday o Ampere, en una teoría coherente. Esta teoría condensa las leyes del electromagnetismo en cuatro ecuaciones capaces de describir casos generales y situaciones mucho más específicas.

Estas cuatro ecuaciones son las siguientes:

- **Ley de Gauss para el campo eléctrico:** establece que el flujo eléctrico a través de una superficie cerrada es igual al cociente entre la carga neta encerrada por dicha superficie y la permeabilidad eléctrica del vacío.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Ecuación 1. Ley de Gauss para el campo eléctrico en forma integral

$$\text{div}D = \rho$$

Ecuación 2. Ley de Gauss para el campo eléctrico en forma diferencial

- **Ley de Gauss para el campo magnético:** indica que el flujo magnético total a través de una superficie cerrada es siempre cero.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

Ecuación 3. Ley de Gauss para el campo magnético en forma integral

$$\operatorname{div} B = 0$$

Ecuación 4. Ley de Gauss para el campo magnético en forma diferencial

- **Ley de Faraday-Lenz:** establece que ante un campo magnético variable con el tiempo se generará una fuerza electromotriz.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot d\vec{S}$$

Ecuación 5. Ley de Faraday-Lenz en forma integral

$$\operatorname{rot} E = - \frac{\delta B}{\delta t}$$

Ecuación 6. Ley de Faraday-Lenz en forma diferencial

- **Ley de Ampère-Maxwell:** establece que la circulación del campo magnético alrededor de una trayectoria cerrada está relacionada con la corriente eléctrica y la variación temporal del campo eléctrico, justificando así la creación de un campo magnético a partir de un campo eléctrico variable con el tiempo.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int J \cdot d\vec{S} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

Ecuación 7. Ley de Ampère-Maxwell en forma integral

$$\operatorname{rot} H = J + \frac{\delta D}{\delta t}$$

Ecuación 8. Ley de Ampère-Maxwell en forma diferencial

Estas cuatro ecuaciones permiten comprender el principio de funcionamiento del relé electromagnético, en el que la corriente que atraviesa la bobina genera un campo magnético capaz de imantar el núcleo ferromagnético y producir una fuerza de atracción hacia el núcleo móvil del relé.

Para entender este proceso de imantación, es también interesante realizar una explicación sobre los materiales magnéticos y su comportamiento.

Se podría definir un material magnético como aquel capaz de magnetizarse en presencia de un campo magnético externo. A nivel microscópico, el primer concepto que debe entenderse es que el magnetismo se origina por el movimiento de la carga eléctrica básica, el electrón. Son los momentos magnéticos que posee esta partícula los que determinan las propiedades magnéticas macroscópicas de los materiales. Estos momentos magnéticos tienen dos fuentes principales:

- **Órbita electrónica:** el movimiento orbital del electrón alrededor del núcleo, que podría considerarse como un pequeño circuito cerrado con corriente eléctrica, genera un campo magnético en la dirección del eje de rotación.
- **Spin electrónico:** el giro intrínseco del electrón sobre su propio eje también genera un pequeño campo magnético.

De esta forma, la suma neta de todos los momentos magnéticos creados por cada electrón da lugar al momento magnético total del átomo. Los efectos macroscópicos se describen mediante el vector de magnetización, definido matemáticamente como la suma de los N momentos (m_i) existentes en un volumen infinitesimal (ΔV).

$$M = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^N m_i}{\Delta V}$$

Ecuación 9. Cálculo de la magnetización

En presencia de un campo magnético H , la superposición del vector de magnetización y del campo externo da lugar a la inducción magnética resultante (B) según la expresión:

$$H + M = \frac{B}{\mu_0}$$

Ecuación 10. Relación entre el campo magnético, el vector de magnetización y la inducción magnética

Por otro lado, la susceptibilidad magnética (χ) es un valor escalar que relaciona los vectores de magnetización y del campo magnético, y que representa la facilidad que presenta un material a ser magnetizado ante un campo externo.

$$M = \chi H$$

Ecuación 11. Susceptibilidad magnética χ

Aunque, una vez entendidos estos conceptos, podría realizarse una exhaustiva clasificación de los materiales magnéticos según sus propiedades, se ha optado por un enfoque en los materiales ferromagnéticos, por ser los empleados en la construcción de los relés electromagnéticos y demás máquinas eléctricas

El proceso de magnetización de los materiales ferromagnéticos puede explicarse a partir del concepto de los dominios magnéticos, que son regiones con magnetización uniforme separados por las paredes del dominio. Ante un campo magnético externo, los dominios experimentan dos mecanismos internos de imantación: movimiento de la pared del dominio y rotación de la magnetización espontánea del dominio. Además, cuando la excitación externa cesa, estos dominios se mantienen orientados, constituyendo ahora un imán permanente.

La susceptibilidad magnética es de valor elevado, positivo e inversamente proporcional a la temperatura. Al superarse un cierto valor de temperatura, conocido como temperatura de Curie, el material pierde magnetización espontánea y comienza a comportarse como un material paramagnético.

El hierro, el níquel y el cobalto son tres ejemplos de materiales ferromagnéticos.

La relación entre el campo magnético externo aplicado y la inducción magnética resultante en el material se refleja en la curva de magnetización.

En un material ferromagnético, como se ha mencionado, al retirar la excitación externa no regresa a su estado original, pues conserva un magnetismo remanente. La histéresis magnética es el retraso de la inducción magnética respecto a la variación del campo magnético externo aplicado.

Ante una magnetización cíclica del material, la relación entre la inducción magnética y el campo excitador da lugar al ciclo de histéresis, cuyo análisis revelan las propiedades magnéticas del material y permiten realizar una nueva clasificación.

Para esta clasificación, atenderemos a los siguientes parámetros:

- **Campo coercitivo:** valor del campo externo necesario para anular la imantación. Es el corte del ciclo de histéresis con el eje de abscisas.
- **Inducción remanente:** valor de la inducción magnética que permanece en el material tras retirar el campo magnético externo.

Considerando esto, se realiza la siguiente clasificación:

- **Ferromagnéticos blandos:** Son aquellos materiales ferromagnéticos que presentan un campo coercitivo bajo (hasta 50 A/m) y una inducción remanente elevada, lo que da lugar en una curva de histéresis estrecha. Los materiales ferromagnéticos blandos son utilizados en la construcción de los núcleos de máquinas eléctricas.
- **Ferromagnéticos duros:** Los materiales ferromagnéticos duros presentan un elevado campo coercitivo, dando lugar a curvas de histéresis anchas, conllevando grandes pérdidas de energía. Estos materiales tienen su aplicación en la fabricación de imanes permanentes.

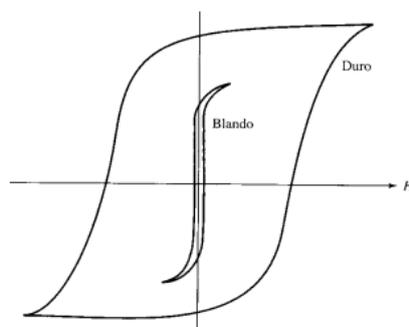


Figura 1. Diferencias en el ciclo de histéresis entre ferromagnéticos blandos y duros

3.2 Pérdidas magnéticas

En el estudio de cualquier dispositivo electromagnético, incluidos los relés en los que se centra este proyecto, es fundamental el análisis de las pérdidas que en él tiene lugar. Comprender y minimizar estas pérdidas es esencial para garantizar la eficiencia y vida útil del dispositivo.

Durante su operación, la magnetización cíclica que soportan provoca efectos adversos, como las pérdidas de energía por las corrientes inducidas en el propio material por acción del campo magnético (corrientes parásitas) o las pérdidas por la histéresis magnética.

3.2.1 Pérdidas por histéresis

La diferencia existente entre la energía empleada en la magnetización del material y la que se devuelve durante la desmagnetización supone una evidente pérdida de energía, que se pone de manifiesto en el calentamiento del material. El valor de la energía perdida por unidad de volumen en cada ciclo viene dado por el área encerrada por el contorno del ciclo de histéresis. Por tanto, dicho valor viene dado por la siguiente integral:

$$w = \oint H dB$$

Ecuación 12. Cálculo integral del área encerrada en el ciclo de histéresis

Analizando este cálculo, se puede entender el motivo por el que se utilizan materiales blandos para la construcción de máquinas eléctricas, pues su ciclo de histéresis es más estrecho y encierra un menor área, por lo que las pérdidas por histéresis también serán menores.

Dada la complejidad de la ecuación de las curvas de histéresis, es comúnmente utilizada la ecuación de Steinmetz para el cálculo de las pérdidas por histéresis unitarias:

$$p_h = f \cdot K_h \cdot B_m^n$$

Ecuación 13. Ecuación de Steinmetz para el cálculo de las pérdidas por histéresis

Donde f es la frecuencia de magnetización (Hz), K_h es una constante que depende del material y se obtendrá del fabricante o por ensayo, B_m es el valor de la inducción máxima y n es el exponente de Steinmetz, que también dependerá del material (habitualmente es 1,6).

3.2.2 Pérdidas por corrientes parásitas

Atendiendo a la ley de Faraday (ley de inducción magnética), en el material ferromagnético aparecerán unas corrientes inducidas (corrientes parásitas o corrientes de Foucault) como consecuencia de estar sometido a un campo magnético variable. La actuación de dichas

corrientes tiene lugar en planos perpendiculares a la inducción magnética y sentidos de circulación indicados por la regla de la mano derecha.

El módulo de las pérdidas por corrientes parásitas viene dado por la ecuación 14, donde K_f es una constante facilitada por el fabricante de la chapa, f es la frecuencia a la que trabajara el circuito magnético y B_m el valor de la inducción máxima.

$$P_f = K_f \cdot f^2 \cdot B_m^2$$

Ecuación 14. Cálculo de las pérdidas por corrientes parásitas

Son dos los problemas que acarrearán estas corrientes parásitas:

- **Pérdidas por efecto Joule:** en primer lugar, la resistividad del propio material limita la circulación de dichas corrientes, generando unas pérdidas caloríficas por el efecto Joule que son proporcionales al cuadrado de la intensidad.
- **Efecto desmagnetizante:** las corrientes parásitas provocan, según la Ley de Lenz, una oposición contra el flujo que las crea, reduciendo por tanto la inducción magnética. Se trata de un efecto importante en este estudio, pues el campo desmagnetizante creado por las corrientes parásitas provoca un retardo en el tiempo de respuesta del relé.

Para reducir la magnitud de estas pérdidas existen dos opciones: cambiar el material ferromagnético por otro con mayor resistividad, o la laminación del núcleo en láminas separadas por un aislante para limitar la circulación de las corrientes parásitas.

3.3 El relé

Los relés son dispositivos capaces de actuar como interruptores de circuitos eléctricos de gran potencia a partir de un circuito de control completamente independiente, permitiendo el encendido y apagado de equipos o la protección contra sobrecargas, entre otras muchas aplicaciones. En la actualidad, los relés se han convertido en un elemento básico en los sistemas de control y en la gestión eficiente de la energía utilizados en una amplia gama de aplicaciones.

La invención del relé se atribuye al físico estadounidense Joseph Henry en 1835, que creó una versión primitiva del dispositivo para mejorar su versión del telégrafo eléctrico. Desde entonces, estos dispositivos han sufrido una evolución considerable en términos de diseño y aplicaciones hasta llegar a los relés actuales.

Son varias las clasificaciones que pueden hacerse de los relés según los criterios que se consideren. Una clasificación habitual sería según su aplicación, donde pueden diferenciarse relés de enclavamiento, relés de frecuencia, relés diferenciales o relés temporizadores, entre otros tipos.

Sin embargo, en el contexto de este proyecto, resulta más interesante realizar una clasificación detallada según el principio de funcionamiento, pues donde se encuentra el relé electromagnético.

- **Relé de estado sólido:** son dispositivos que utilizan elementos semiconductores en vez de componentes mecánicos. Cuando el circuito de control recibe una señal, se enciende un LED que emite luz infrarroja. Un componente semiconductor fotosensible detecta esta luz y la convierte en una señal eléctrica para activar el interruptor. Son dispositivos con una velocidad de operación elevada y una larga vida útil, aunque provocan un considerable calentamiento por la caída de tensión propia del semiconductor.
- **Relé reed:** consiste en una bobina y un tubo de vidrio con dos láminas metálicas delgadas encapsuladas en su interior. Al energizar la bobina, las láminas ferromagnéticas se atraen entre sí para crear un circuito cerrado. Su mayor ventaja es la extensa vida útil que presentan, pues presentan una baja corrosión gracias al gas inerte situado en el interior del tubo de vidrio y un desgaste de los contactos prácticamente inexistente (no hay ningún movimiento inducido).
- **Relé térmico:** están formados por láminas bimetálicas de dos metales con coeficientes de dilatación diferentes, y rodeados por un bobinado. Cuando el conductor es atravesado por una corriente, la diferencia del coeficiente mencionado provoca que una lámina se dilate más que la otra, haciendo que se doble y cierre los contactos eléctricos. Son utilizados en la protección de motores eléctricos contra sobrecargas.

- **Relé electromagnético:** son dispositivos compuestos por una bobina y un contacto activado mecánicamente. Pueden ser utilizados con corriente continua o corriente alterna según su aplicación. Teniendo en cuenta la importancia de comprender el funcionamiento del relé electromecánico por ser el centro del estudio, se presenta a continuación un subapartado dedicado únicamente a este tipo de relés.

3.3.1 El relé electromagnético

Tal y como se acaba de mencionar, un relé electromagnético está formado, en esencia, por una bobina y un componente ferromagnético que se acciona mecánicamente. Para ser más exactos, el relé analizado en este proyecto está compuesto por una bobina, un núcleo móvil, el núcleo del estátor, la armadura y un resorte unido al componente móvil.

Al hacer circular una corriente por la bobina, siendo en el caso del relé estudiado corriente continua, se genera un flujo magnético como consecuencia de la fuerza magnetomotriz, que puede expresarse como el producto del número de vueltas de la bobina y la corriente que lo atraviesa.

$$F = N \cdot I$$

Ecuación 15. Fuerza magnetomotriz generada por la bobina.

Este flujo magnético ejerce una fuerza de atracción sobre el núcleo móvil del relé, que comienza a moverse cuando supera la fuerza del resorte unido a él. Al completar el movimiento, se produce la unión de los contactos que hacen conmutar el circuito externo. Una vez cesa la alimentación de la bobina, el relé se desmagnetiza y regresa a su posición inicial, gracias a la acción del muelle.

Una de las grandes desventajas que presentan los relés electromagnéticos es el arco eléctrico que tienden a formar los contactos cuando se separan, provocando un aumento en la resistencia con el paso del tiempo. A pesar de ello, este tipo de relés presentan varias ventajas que los convierten en componentes esenciales en una amplia gama de aplicaciones. Entre las más destacadas se encuentran las siguientes:

- **Aislamiento:** existe un completo aislamiento entre la bobina del circuito de control y los contactos utilizados para conmutar el circuito externo, permitiendo manejar tensiones y potencias elevadas con un altísimo grado de seguridad.
- **Fiabilidad:** gracias a su diseño simple y robusto, son dispositivos capaces de funcionar correctamente en condiciones normales de operación durante largos periodos de tiempo.
- **Versatilidad:** existen diversos tipos de relés electromagnéticos, con distintos números de contactos, tensiones de operación y características físicas, lo que permite encontrar el dispositivo adecuado para cada necesidad.
- **Fácil mantenimiento:** los componentes son sencillos y de fácil acceso, por lo que en caso de avería son fácilmente reemplazables.

Las aplicaciones de este tipo de relés son muy variadas, desde la domótica residencial hasta usos en equipos médicos. En el ámbito industrial, las aplicaciones principales se centran en tareas de automatización, control de equipos de potencia elevada o labores de seguridad y protección contra sobrecargas, cortocircuitos u otras anomalías.

3.3.2 Energización del relé

Al conectarse la bobina del relé a la fuente de alimentación y, por tanto, energizar el relé, pueden observarse ciertas variaciones en la corriente que circula por el conductor. La figura 2 muestra la variación de la corriente en la bobina de un relé al conectarse a una fuente de alimentación de corriente continua.

Para analizar esta representación se prestará mayor atención a la parte izquierda de la misma, correspondiente al proceso de energización del relé. Sobre esta zona se explicarán los distintos tramos en que se divide junto a una breve justificación del comportamiento de la corriente en cada uno de ellos.

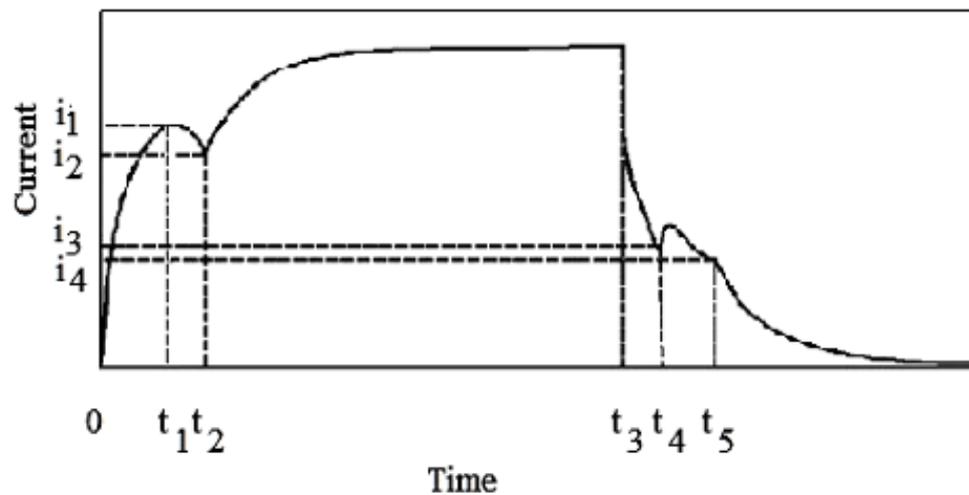


Figura 2. Variación de la corriente en la bobina de un relé de DC

Durante el primer segmento de la curva la fuerza de atracción no es suficiente para vencer la fuerza del resorte unido al núcleo móvil, por lo que no realiza ningún desplazamiento. La corriente durante este periodo crece de forma exponencial.

En cuanto al balance de energía, se puede expresar con la siguiente ecuación.

$$W_E(t) = W_{EL}(t) + W_{FL}(t) + W_{FS}(t)$$

Ecuación 16. Balance de energías en el primer en el intervalo (0, t₁) de la figura 2.

Los términos de esta ecuación son los siguientes:

- W_E : es la energía total suministrada por la fuente de alimentación.

$$W_E = \int_0^t U i(t) dt$$

Ecuación 17. Energía suministrada por la fuente de alimentación

- W_{EL} : energía disipada en forma de calor por la resistencia de la bobina debido al efecto Joule.

$$W_{EL} = \int_0^t i(t)^2 R dt$$

Ecuación 18. Energía disipada por la resistencia de la bobina

- W_{FL} : energía total perdida por histéresis y corrientes parásitas
- W_{FS} : energía almacenada en campos eléctricos y magnéticos.

$$W_{FS} = \int_0^{\Psi(t)} U d\Psi(t)$$

En estas ecuaciones U es la tensión aplicada a la bobina del relé, R su resistencia, $i(t)$ el valor instantáneo de la corriente y $\Psi(t)$ el valor instantáneo del enlace de flujo magnético en el núcleo del relé (*interlinkage flux*).

Durante el segundo intervalo de la gráfica, comprendido entre t_1 y t_2 , se produce el movimiento del núcleo móvil, por lo que al tiempo t_2 se le conoce también como tiempo de viaje o *travel time*.

Una vez finaliza este segundo segmento, aunque el relé ya ha sido energizado y el núcleo móvil ha completado su movimiento, la corriente de la bobina sigue aumentando exponencialmente.

Reflexionando sobre este último tramo, podría uno preguntarse qué razón hay para que, si el relé ya ha sido activado, la corriente siga aumentando si esto solo conduce a un mayor calentamiento de la bobina y un consumo eléctrico más alto. La respuesta a esta cuestión se encuentra en la diferencia entre la tensión nominal a la que se conecta la bobina y la tensión necesaria para que se produzca la activación del relé, conocida en inglés como *pick-up voltage*.

El cociente entre dichas tensiones determina el denominado *safety factor for pick-up* (ecuación 19), que normalmente toma valores entre 1.2 y 1.8 y debe ser considerado en el diseño del relé.

$$safety\ factor\ for\ pick - up = \frac{nominal\ voltage}{pick - up\ voltage}$$

Ecuación 19. Expresión para calcular el safety factor for pick-up

La importancia de esta diferencia reside, en primer lugar, en la gran diversidad de valores existentes en la producción de relés. En relés con una tensión nominal de 12 V, la tensión de

activación se encuentra normalmente comprendida entre 6 y 9 V. Sin embargo, para evitar problemas al fabricante, se establece que la tensión de funcionamiento sea 12 V.

Por otro lado, hay una razón de seguridad. Imaginando un relé cuya tensión de activación sea 5.8 V, resultaría muy común pensar que una tensión nominal de 6 V es ideal: se consigue la activación del relé con una pérdida energética mínima. No obstante, si por algún motivo la fuente de alimentación presenta un defecto de tan solo 0.3 V o hay un cambio considerable en las condiciones ambientales en las que opera el relé, existe un riesgo muy alto de que no se produzca la activación del relé, con todas las consecuencias que ello conlleva.

Por último, establecer la alimentación de la bobina por encima de la tensión de activación reduce considerablemente el tiempo de operación.

Todos estos factores deben ser tenidos en cuenta durante el diseño del relé, incluyendo el denominado *safety factor for pick-up*.

4 Condiciones preliminares

Este proyecto se plantea, como se ha comentado, con el objetivo de estudiar la respuesta dinámica de un relé electromagnético. En su funcionamiento, la bobina del relé genera un flujo magnético capaz de ejercer una fuerza de atracción sobre un componente móvil que cierra o abre unos contactos externos.

La magnitud de la fuerza de atracción depende, entre otros muchos factores, del flujo magnético generado por la bobina y de la distancia existente entre el núcleo del estátor y el componente móvil. En el relé estudiado, en el que el núcleo móvil no se desplaza de manera lineal, se encuentra una gran dificultad en el cálculo de dicha fuerza y la respuesta del relé tras ser energizado. Además, existen otros factores como las propiedades magnéticas no lineales de los componentes ferromagnéticos o las corrientes parásitas, que dificultan aún más el proceso y tienden a alejar los resultados obtenidos de la realidad.

Por este motivo, se selecciona el software de JMAG para realizar el análisis. Un estudio transitorio del campo magnético permite obtener la fuerza de atracción y otros muchos parámetros que determinan el comportamiento dinámico del relé teniendo en cuenta los factores mencionados.

JMAG es un software de simulación que permite la modelización y simulación de motores, transformadores y otros dispositivos electromagnéticos. Se trata de una aplicación precisa que, además de un análisis electromagnético, ofrece distintas posibilidades para analizar otros fenómenos físicos como la transmisión de calor o la mecánica estructural.

La primera versión de JMAG fue lanzada en 1983 por *JSOL CAE Solution*, y ha seguido evolucionando hasta llegar a la versión 23.0, lanzada el 21 diciembre de 2023 y empleada en este estudio.

Para la realización de las simulaciones necesarias en el entorno de JMAG-Designer, dada la complejidad del software, es necesaria la utilización de un ordenador con las características adecuadas. Por este motivo, se emplea una máquina situada en la ETSIIT de la Universidad de Cantabria con las siguientes especificaciones:

- Procesador Intel Xeon CPU E5-1660 de 3 GHz y 8 núcleos

- Memoria RAM instalada de 32 GB
- Tarjeta gráfica NVIDIA Quadro K2200
- Sistema operativo de 64 bits
- Windows 10 Enterprise en su versión 22H2

En lo relativo al estudio, se determinan los siguientes materiales a emplear:

Para el caso de la bobina, se selecciona el cobre. Aunque el aluminio podría ser utilizado sin problema alguno, al tratarse de una simulación computacional y no tenerse en cuenta el factor económico, se opta por la primera opción debido a sus propiedades más ventajosas.

En el caso del material ferromagnético necesario para modelizar los demás componentes del relé, se selecciona el SPCC, disponible en la base de datos de materiales que JSOL ofrece en el entorno de JMAG. El nombre de este material proviene de las iniciales de *Steel Plate Cold Rolled Commercial*, y más que al tipo de material, hace referencia al proceso al que es sometido durante su fabricación. Este proceso de laminación en frío le confiere unas características de conformabilidad y resistencia a la corrosión, que convierten este acero en un material útil en aplicaciones de carácter industrial que exigen un material de gran calidad, como puede ser la industria automotriz o electrónica, donde el uso de relés está muy extendido.

Por último, deben comentarse las condiciones preliminares del análisis térmico. En primer lugar, es importante mencionar que se ha considerado que la localización del dispositivo es una habitación con una temperatura ambiente de 20 °C, por lo que este valor es utilizado como temperatura de referencia en distintos puntos del estudio.

Por otro lado, considerando una transferencia de calor de los componentes ferromagnéticos con el aire mediante convección natural, se establece un coeficiente de transferencia de calor de 20 W/m² °C.

5 Documentos de referencia

- JMAG. (2024). *Manuales de Usuario*.
- JMAG (versión 23.0). *Help & Self Learning System [software]*.
- Gurevich, V. (2005). *Electric Relays: Principles and Applications*.
- Mantilla, L. F. (2018). *Fundamentos de Transformadores Eléctricos y Máquinas Eléctricas Rotativas*.
- Sudhoff, S. D. (2014). *Power Magnetic Devices: A Multi-Objective Design Approach*. John Wiley & Sons.
- Ministerio de Ciencia e Innovación. (2009). *Requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial* (Orden CIN/351/2009).
- Ministerio de Universidades. (2021). *Organización de las enseñanzas universitarias y del procedimiento de aseguramiento de su calidad* (Real Decreto 822/2021).
- Ministerio de Universidades. (2013). *Resolución de 15 abril de 2013, de la Universidad de Cantabria, por la que se publica el plan de estudios de Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales*.
- Universidad de Cantabria. (2008). *Memoria para la solicitud de verificación del Grado Universitario en Ingeniería en Tecnologías Industriales de la Universidad de Cantabria*.
- Universidad de Cantabria. (2023). *Normativa de gestión académica de los estudios oficiales de grado*.
- Universidad de Cantabria (2023). *Guía docente Trabajo de Fin de Grado (G733)*.
- Comisión Académica. (2021). *Normativa del Proyecto Fin de Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicación (ETSIIyT)*.
- Asociación Española de Normalización. (2019). *Criterios generales para la elaboración de informes periciales* (UNE 197001).

- Asociación Española de Normalización. (2014). *Criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico* (UNE 157001).
- Asociación Española de Normalización. (2013). *Directrices para la redacción de referencias bibliográficas y de citas de recursos de información* (UNE 197001).

6 Terminología

En este apartado se presentan las definiciones y explicaciones de aquellos conceptos clave necesarios para comprender el estudio.

6.1 Método por Elementos Finitos

La modelización por elementos finitos o FEM es un método numérico usado en el ámbito ingenieril para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales complejas. Con este método, se consigue transformar un medio continuo en un modelo discreto aproximado. Para ello es necesario realizar una discretización física del cuerpo, dividiéndolo en un número finito de elementos conectados entre sí por ciertos puntos característicos denominados nodos.

Para obtener una solución lo más exacta posible, se plantea necesario definir un número de elementos óptimo a la hora de realizar el mallado, de forma que se encuentre un equilibrio entre la precisión de los cálculos realizados y el tiempo y esfuerzo que le lleve a la computadora realizar la simulación.

6.2 FEM COIL

Se trata de una condición que ofrece JMAG para definir la energización de un conductor en el modelo de elementos finitos usando un circuito eléctrico. Para poder aplicarse correctamente, es estrictamente necesario crear previamente un circuito eléctrico que incluya este componente, donde se definirán el número de vueltas y la resistencia del bobinado. La corriente generada en el interior del conductor es calculada basándose en la diferencia de potencial entre los dos terminales del componente FEM Coil.

Durante el análisis, se considera la corriente prácticamente uniforme en el interior de la bobina, por lo que si el objetivo de la simulación pasa por considerar la generación de corrientes parásitas en el interior del conductor, debe utilizarse la condición de FEM Conductor.

6.3 Componentes del relé

En el contexto del presente trabajo, se menciona en repetidas ocasiones los distintos componentes que han sido modelizados para la simulación del relé. A continuación se recoge una breve explicación sobre cada uno de ellos para poder seguir las explicaciones recogidas más adelante.

6.3.1 Núcleo móvil

Es la parte del relé que se desplaza cuando se energiza la bobina del relé, realizando en este caso un movimiento de rotación. Su movimiento está influenciado por el campo magnético generado por la bobina y la acción de un resorte unido a uno de sus extremos. Tras completar su movimiento, permite la apertura o cierre de los contactos eléctricos del circuito que se desea controlar con el relé.

6.3.2 Núcleo del estátor

Se trata de la parte cilíndrica alrededor de la cual se arrolla la bobina, y que proporciona un camino magnético para el flujo generado por la bobina. En su parte superior presenta un engrosamiento que aumenta la fuerza de atracción ejercida sobre el núcleo móvil y mejora la respuesta del relé.

6.3.3 Armadura

La armadura es una estructura ferromagnética que permite el ensamblaje de los distintos componentes y proporciona una gran estabilidad mecánica al relé. Su parte superior constituye el apoyo de núcleo móvil y su eje de rotación. En su parte inferior presenta un orificio que es atravesado por el núcleo del estátor.

6.3.4 Bobina

Arrollamiento de un conductor de cobre alrededor del núcleo del estátor. En este estudio, se deja un espacio entre el componente ferromagnético y la bobina para representar el aislamiento presente en la mayoría de los relés.

6.4 Nomenclatura

2D	Dos dimensiones
3D	Tres dimensiones
A	Amperios
B	Campo magnético
Bm	Inducción máxima
D	Campo de deslizamiento eléctrico
div	Divergente
E	Campo eléctrico
ETSIIT	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones
f	Frecuencia
F	Fuerza magnetomotriz generada por la bobina
FEM	Finite Element Method (Método por Elementos Finitos)
GAIME	Grupo de Accionamientos Industriales y Máquinas Eléctrica
H	Intensidad de campo
I	Intensidad de corriente
i(t)	Corriente instantánea
I_s	Corriente de saturación
J	Densidad de corriente
K	Constante utilizada en la ecuación del funcionamiento de un diodo
Kh	Coeficiente de cada material para el cálculo de las pérdidas por histéresis
Km	Constante elástica del resorte
LED	Light Emitting Diode
M	magnetización
mm	Milímetros
ms	Milisegundos
N	Numero de vueltas de la bobina
P_f	Perdidas por corrientes parásitas
P_h	perdidas por histéresis
q	Carga neta encerrada
R	Resistencia
rot	Rotacional
s	Segundo
SPCC	Steel Plate Cold Rolled Commercial
T	Par de torsión
T	Teslas
TR	Módulo de análisis transitorio en JMAG
U	Tensión
V	Voltios
V(t)	Diferencia de potencial entres dos terminales de un diodo
w	Energía perdida por unidad de volumen en el ciclo de histéresis
W_e	Energía total suministrada por la fuente de alimentación

W_{EL}	Energía disipada por la resistencia intrínseca de la bobina
W_{FL}	Energía perdida por histéresis y corrientes parásitas
W_{FS}	Energía almacenada en campos magnéticos y eléctricos
ε₀	Permeabilidad eléctrica del vacío
θ	Angulo de rotación
μ₀	Permeabilidad magnética del vacío
ρ	Densidad de carga en un punto
χ	Susceptibilidad magnética
Ψ	Enlace de flujo magnético

7 Desarrollo del estudio

En este apartado se recogerá toda la información relacionada con la simulación del funcionamiento del relé, desde los primeros pasos en la modelización y preparación del software, hasta la simulación y el análisis de los resultados obtenidos.

7.1 Preparación de la simulación

Para la realización del estudio de la respuesta dinámica de un relé electromagnético en el software de JMAG, es necesario llevar a cabo un proceso ordenado con diferentes tareas que permitan llegar a una solución correcta.

En primer lugar, se realizará la modelización geométrica del relé utilizando el propio editor geométrico que ofrece JMAG. Se comenzará con un boceto en 2D de los distintos componentes para posteriormente convertirlos a 3D, asegurándose de que el ensamblado es correcto.

Tras esto se creará un nuevo estudio, en este caso un análisis magnético transitorio, en el que deberán definirse las propiedades y parámetros que regirán el comportamiento matemático del software durante la simulación.

Una vez definidas las propiedades del estudio se continuará preparando el modelo para su simulación. Para ello, se definirán los materiales y propiedades de las distintas partes, las condiciones de contorno del análisis, el mallado del modelo para el cálculo por elementos finitos y el circuito eléctrico necesario para hacer funcionar el relé.

Con todo esto ya se podría realizar la simulación para obtener las características de la respuesta dinámica del relé. Sobre este modelo se podrán modificar distintos parámetros para realizar estudios alternativos, en busca de nuevos resultados y una mejora del tiempo de activación del relé.

7.1.1 Modelización geométrica

El primer paso para llevar a cabo el estudio es realizar una representación geométrica del relé. Para ello, se comienza creando un nuevo proyecto, que se guardará con el nombre de

Electromagnetic_Relay_Analysis. Una vez creado, se abrirá el menú desplegable de este proyecto con el botón derecho del ratón, y se seleccionará *Geometry Editor > Create Geometry*, tal y como se indica en la figura 3 mostrada a continuación.

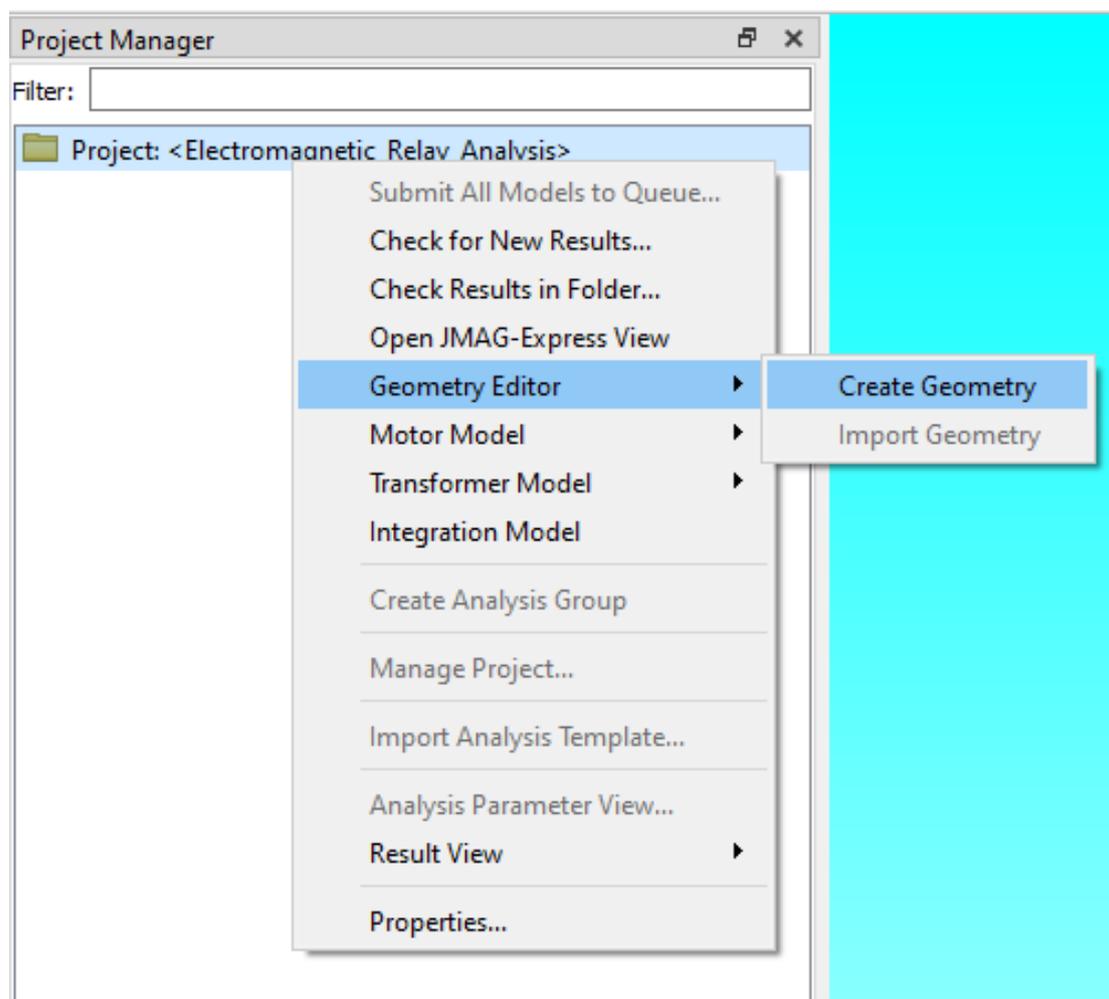


Figura 3. Menú desplegable para la creación del modelo geométrico

Al hacer esto, se abre una nueva ventana con el entorno de edición geométrica que facilita JMAG-Designer para la creación del dispositivo en el software. Dadas las dimensiones de los componentes y para facilitar el diseño, debe comprobarse que la unidad de longitud es el milímetro y que el tamaño de la cuadrícula es el adecuado. Para ello, se despliega el menú de *Tools* (herramientas) de la barra de opciones superior, y se selecciona *Preferences*, como se refleja en el apartado 1.1 de los planos. En las opciones del sistema se debe establecer el milímetro como unidad de longitud, y en las propiedades del documento los parámetros de la cuadrícula (*Grid*) que se indican en el plano 1.2.

Para la modelización del relé, se deberán crear de manera separada los distintos componentes que lo forman: el núcleo móvil, el núcleo del estátor, la armadura y el bobinado. A continuación, se indica el proceso seguido para cada una de las piezas.

Modelización del núcleo móvil en el editor geométrico de JMAG-Designer

En primer lugar, se debe crear una nueva parte. Para ello, se presionará el botón destacado en el plano 1.3 (*Create Part*). En esta nueva parte recién creada, se selecciona el plano ZX, que será tomado como plano de referencia durante todo el proceso de creación de la geometría, y se presionará la opción situada inmediatamente a la derecha de *Create Part*, a la que JMAG denomina *Create Sketch*. Esta opción permite crear un boceto en dos dimensiones de la pieza, para posteriormente convertirla a tres dimensiones con las diversas herramientas que ofrece el entorno.

Se comenzará la creación del boceto de esta pieza justamente en el origen de coordenadas. Es importante respetar este aspecto para evitar posibles problemas de colisión de piezas al realizar la simulación del movimiento del relé.

Además, para facilitar la realización del dibujo, se define la vista de la pantalla en el menú de *View Control* como se muestra en la figura 4.

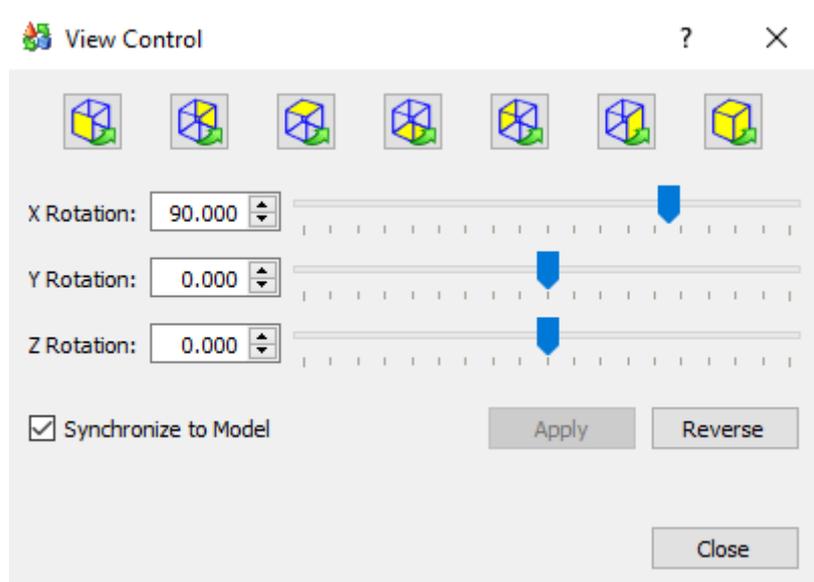


Figura 4. Parámetros del View Control para facilitar la realización del boceto

Mencionadas estas dos importantes consideraciones, se comienza con la realización del boceto. Para ello, se utilizará la herramienta de dibujo de líneas del editor, a las que posteriormente se definirá la longitud y otras restricciones (perpendicularidad, paralelismo...).

El primer paso será realizar una primera aproximación al perfil de esta pieza. Para ello, se van trazando líneas de forma aproximada y se establecen las restricciones pertinentes, en JMAG *constraints*, que se encuentran en el menú que aparece al seleccionar el elemento en cuestión y presionar el botón derecho del ratón (plano 1.4). El plano 1.5 muestra el perfil del núcleo móvil.

En el caso de este boceto, se utilizan las restricciones de distancia para establecer la longitud de las aristas, de perpendicularidad para establecer un ángulo de 90 grados entre dos segmentos y de ángulo entre dos líneas. Es especialmente importante la condición de 10 grados respecto a la horizontal y la vertical de los lados del perfil del núcleo móvil para asegurar un rango de movimiento angular de esta magnitud en la simulación posterior.

Para dar una forma redondeada a la esquina superior, se deben seleccionar los dos segmentos que se unen en dicho punto y presionar la opción de *Create Fillet*, donde se introduce un radio de 1 mm (plano 1.6). Para completar este boceto, se crea una región con el contorno realizado (plano 1.7) y se presiona la opción de *End Sketch*. La figura 5 mostrada a continuación muestra el aspecto del perfil creado.

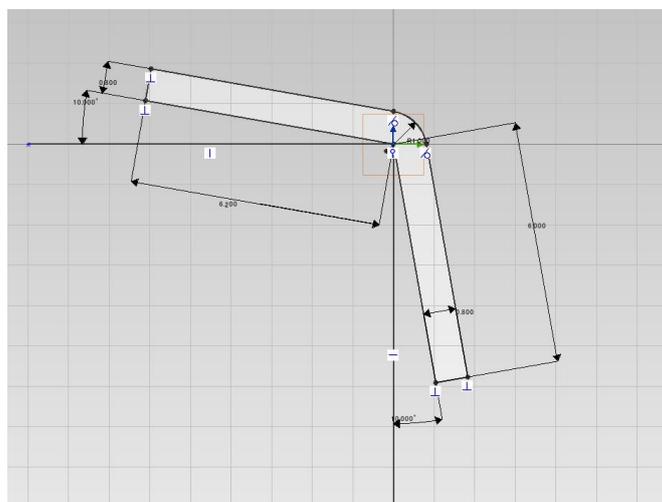


Figura 5. Región creada para el diseño del núcleo móvil del relé

Para convertir este boceto a tres dimensiones, se extruye la región creada una distancia de 2.4 mm en una sola dirección. Adicionalmente se realizará un redondeado a la arista destacada en el plano 1.8 de 2.3 mm con la herramienta de *Edge Fillet*.

Para modelizar el hueco que presenta este componente, se selecciona la cara sobre la que se desea realizar y se crea un nuevo boceto (plano 1.9). Para facilitar el dibujo del boceto, se utiliza la herramienta de *Project Outline to Sketch*, que permite visualizar las aristas de la pieza creada en el boceto que se está editando. Tras esto, se dibuja un rectángulo como el de la figura 6 situada a continuación, y se crea la región encerrada por el contorno.

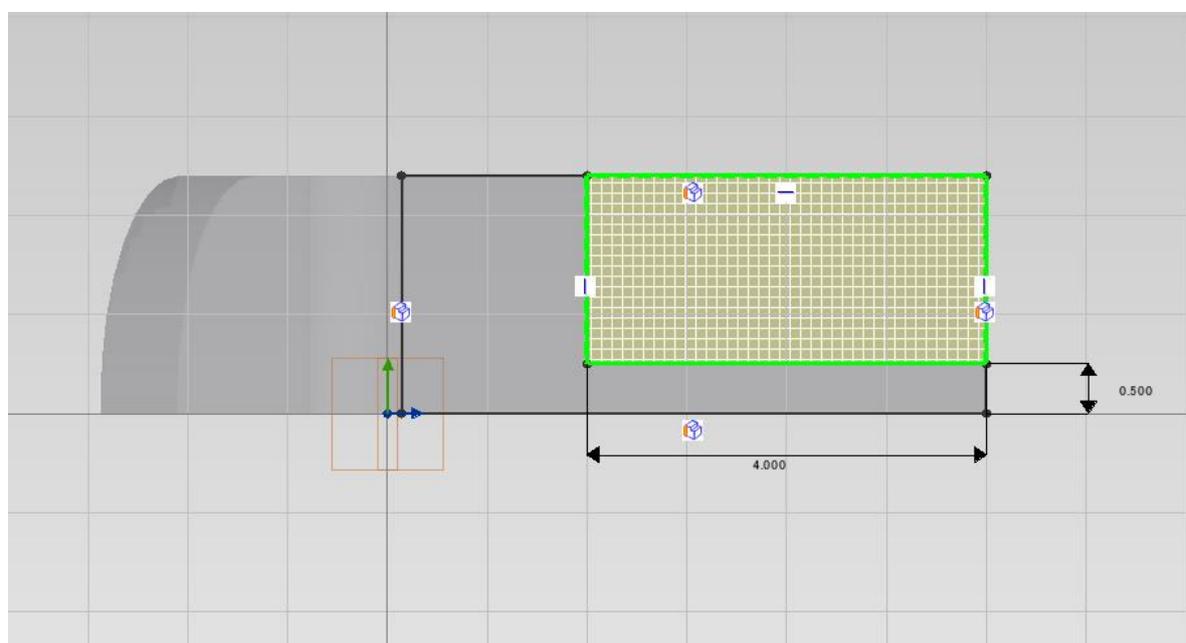


Figura 6. Rectángulo creado para realizar la hendidura del núcleo móvil

Con esta región creada, podemos finalizar el boceto y realizar la operación que JMAG denomina como *Extrude Cut* (plano 1.10), que permite proyectar la región creada en la dirección perpendicular y cortar los sólidos que encuentre a su paso.

Por último, se puede presionar el botón derecho sobre la pieza creada y, a continuación, el apartado de propiedades. Aquí se renombra la pieza como *MovableCore* y se le da un color verde para facilitar su identificación. Una vez finalizado, el núcleo móvil tiene el aspecto que se muestra en la figura 7.

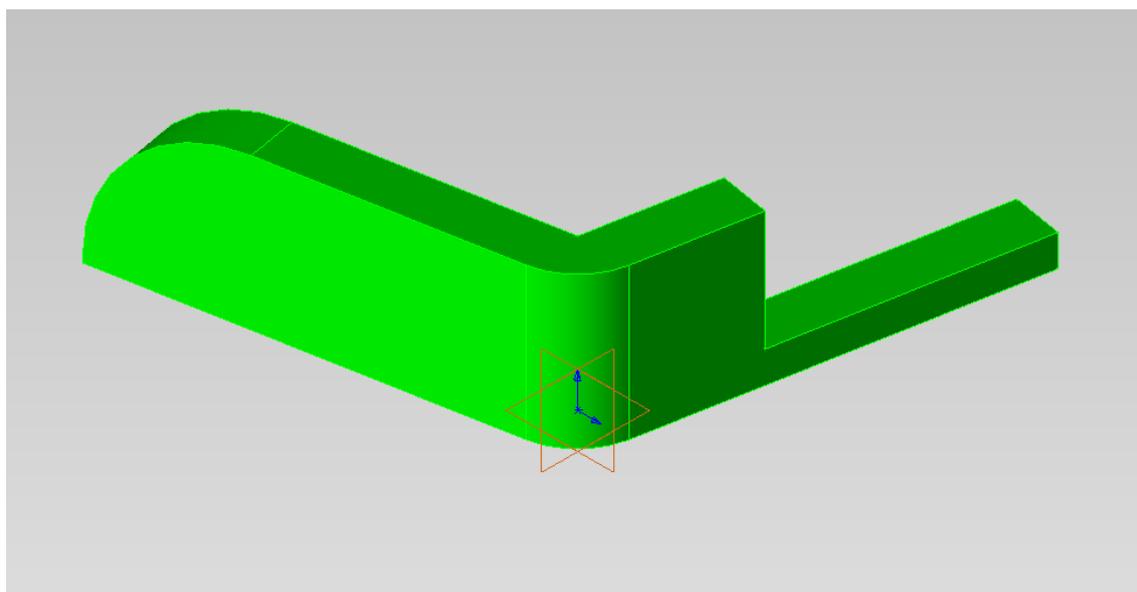


Figura 7. Aspecto final del núcleo móvil

Modelización de la armadura en el editor geométrico de JMAG-Designer

Para la creación de los demás componentes, es realmente importante ser cuidadoso con las líneas auxiliares que se deben trazar para realizar los bocetos. Establecer las longitudes y restricciones de dichas líneas de forma correcta permitirá que la posición relativa de las piezas sea adecuada, y que por tanto el ensamblaje del relé no cause ningún problema durante la simulación.

Para realizar este boceto, se debe comenzar de igual manera que con el núcleo móvil. Se crea una nueva parte, y a continuación, un nuevo boceto sobre el plano ZX. Es recomendable colocar de nuevo la vista de la pantalla de la figura 4 para evitar confusiones con la orientación de la pieza.

El primer paso será trazar una línea auxiliar horizontal y otra vertical que nazcan en el origen de coordenadas, para después establecer como restricción una separación de 0.04 milímetros entre dichas líneas y el cuerpo de la pieza.

A continuación, se debe dibujar el perfil aproximado de este componente con forma de L invertida. Se realizará un primer boceto como el mostrado en la figura 8 para posteriormente darle la forma correcta con las restricciones.

Tras finalizar el boceto, se debe realizar la operación *Extrude Cut* mostrada en el plano 1.14. En este caso, se selecciona el semicírculo creado y se le da una altura de 1 milímetro para que atraviese por completo la base de la armadura.

Con esta última operación se he completado la modelización del componente. De nuevo, cambiamos el nombre de la pieza a *Yoke* y le damos un color azul para identificarlo fácilmente. La figura 9 muestra el aspecto final de la armadura.

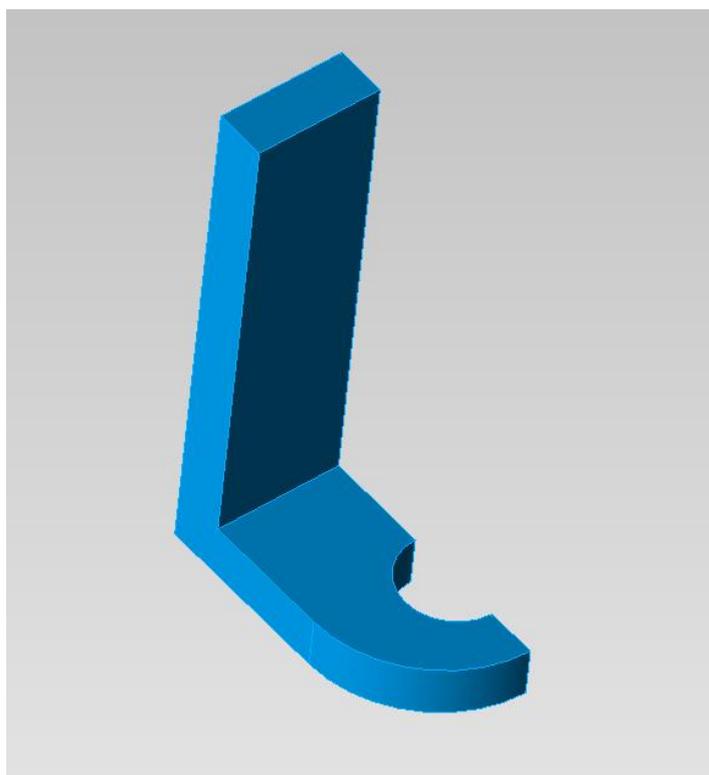


Figura 9. Aspecto final de la armadura

Modelización de la núcleo del estátor en el editor geométrico de JMAG-Designer

Para la construcción de este componente, se dibujará su perfil y se realizará una revolución respecto al eje correspondiente. Una vez más debe tenerse en cuenta la posición relativa respecto a los demás componentes para situar correctamente las líneas auxiliares previas a la realización del boceto.

De nuevo, se realizará un boceto aproximado del perfil del núcleo del estátor para posteriormente aplicar las restricciones necesarias hasta obtener la geometría definitiva. Este

boceto inicial se muestra en el plano 1.15, mientras que el perfil definitivo se muestra en el plano 1.16.

Tras finalizar el boceto se realiza la operación de revolución (figura 10), seleccionando la región creada y como eje de revolución la arista interna, tal y como muestra el plano 1.17. Además, teniendo en cuenta que se está representando solamente la mitad de relé, debe revolucionarse el perfil un ángulo de 180 grados, seleccionando la opción de *Reverse* para que se haga en el sentido correcto.

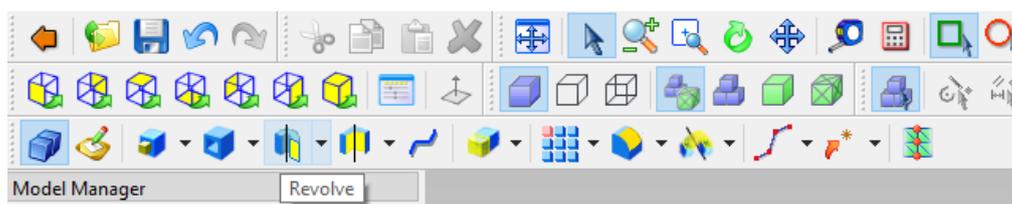


Figura 10. Operación de revolución en el editor geométrico

Una vez realizado esto, se puede dar por finalizada la pieza. El aspecto final del núcleo del estátor se muestra a continuación en la figura 11.

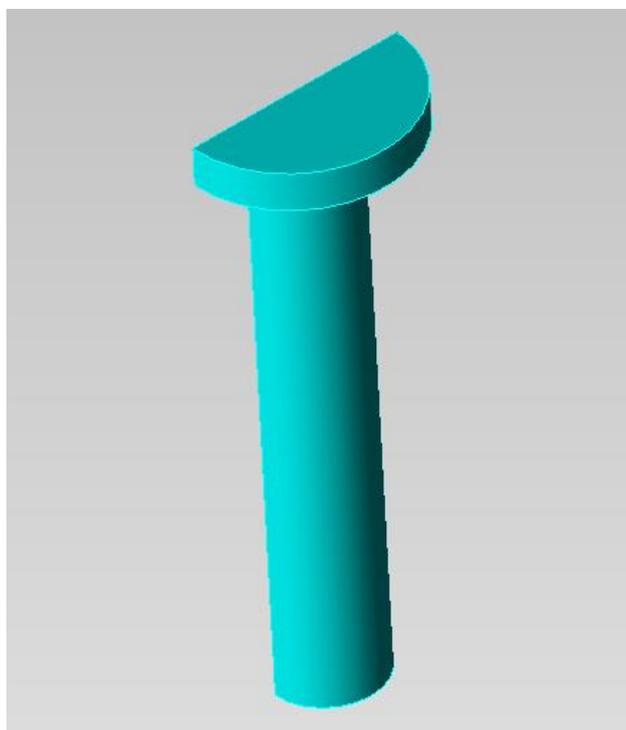


Figura 11. Aspecto final del núcleo del estátor

Modelización de la bobina en el editor geométrico de JMAG-Designer

Para finalizar la modelización geométrica del relé, es necesario crear la bobina. Este bobinado se arrolla alrededor del núcleo del estátor, por lo que sus respectivos ejes deben alinearse correctamente.

Se comienza trazando una línea auxiliar vertical que nace en el origen de coordenadas. A continuación, para crear el cuerpo de la bobina se dibuja un rectángulo de 1.15 mm de ancho y 7.4 mm de alto. Para conseguir que el eje de la bobina coincida con el eje del núcleo del estátor, se debe trazar una línea, que servirá de eje, a una distancia de 1.35 mm de la arista izquierda del rectángulo. Tras crear una región con el contorno trazado, el boceto tendrá el aspecto mostrado en el plano 1.18.

Para finalizar con la construcción de la bobina, se realiza una nueva operación de revolución. Para ello, se selecciona la región creada, y como eje de revolución la línea mencionada anteriormente. Como se muestra en el plano 1.19, se selecciona un ángulo de 180 grados y la opción de sentido inverso, para representar únicamente la mitad del componente.

Con esto, se puede finalizar la pieza, dándole el nombre de *Coil* y un color marrón. El aspecto final de la bobina se muestra a continuación en la figura 12.

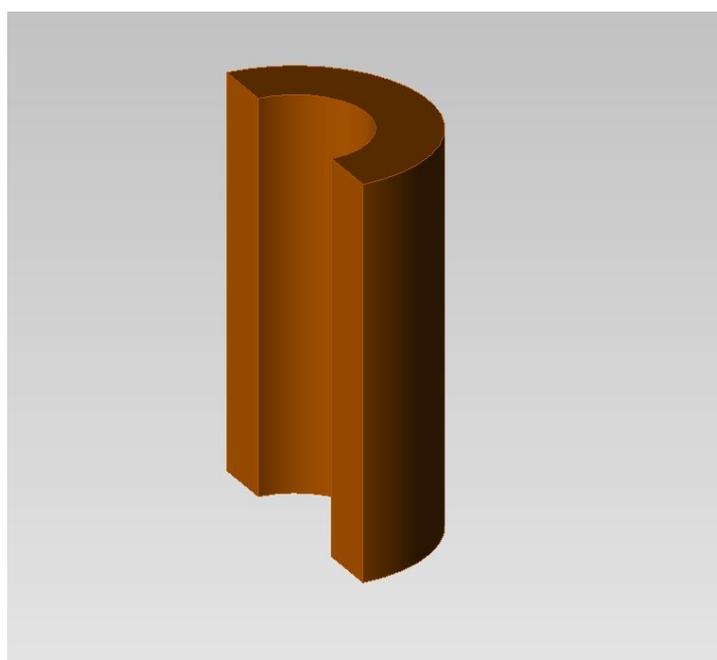


Figura 12. Aspecto final de la bobina

Al completar este último componente, es posible visualizar la modelización completa (figura 13), donde se debe comprobar que el ensamblaje de las distintas partes es el deseado.

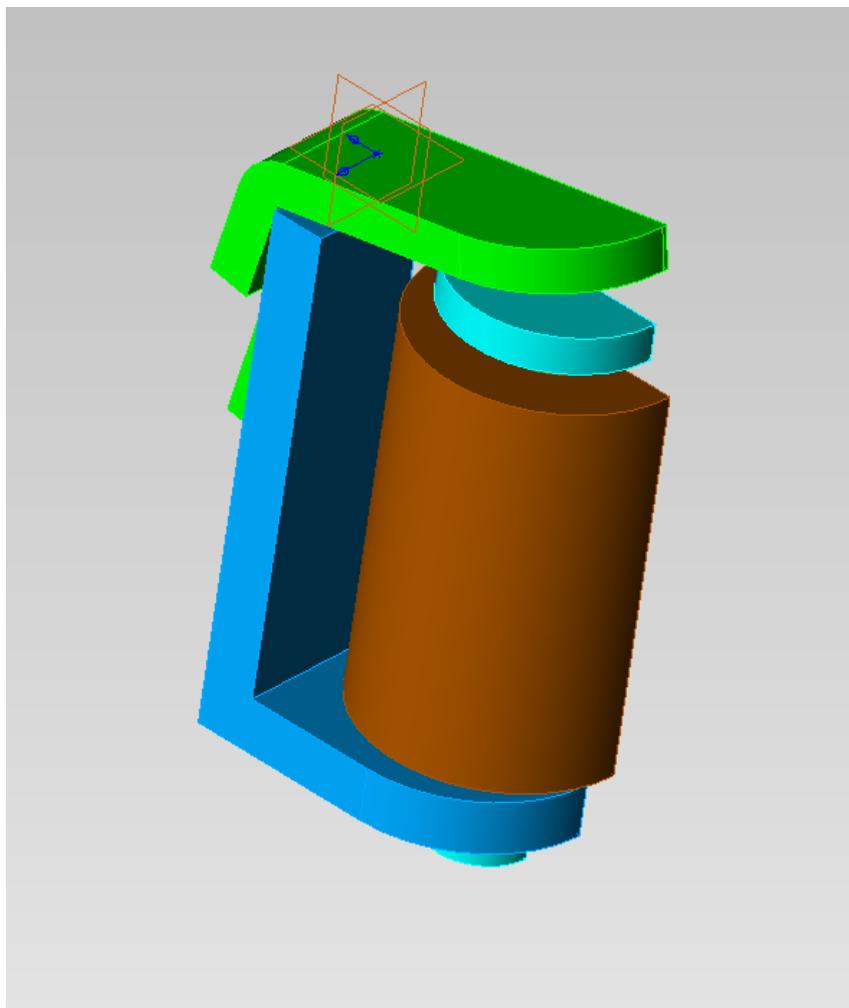


Figura 13. Ensamblaje final de todos los componentes del relé electromagnético

Tras finalizar la modelización geométrica del relé, se selecciona la opción *Back To JMAG-Designer* (figura 14) para regresar al entorno principal de JMAG-Designer. En el menú emergente debe seleccionarse la opción de *Update Model* (plano 1.20).

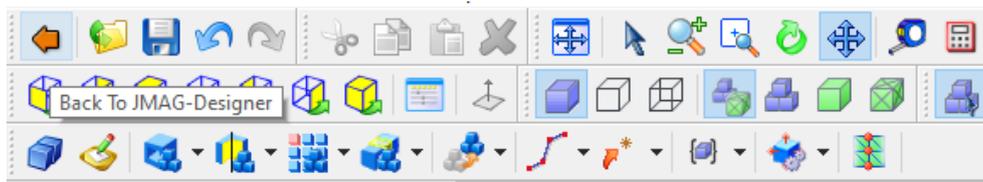


Figura 14. Opción de Back To JMAG-Designer

7.1.2 Ajustes previos de computación

Tras completar la modelización geométrica del relé, debe crearse un nuevo estudio sobre el que se ajustarán los parámetros necesarios para continuar con la simulación. Para ello, se debe presionar el botón derecho sobre el modelo creado y seleccionar el estudio adecuado.

Como se ha comentado en el apartado de Antecedentes, son las características del análisis lo que determina el tipo de estudio que debe seleccionarse. En este caso, es necesario un estudio magnético transitorio para simular los fenómenos físicos que tienen lugar en el modelo y poder analizar la apertura y el cierre del relé, puesto que la fuerza de atracción, la corriente o la fuerza del muelle, entre otras variables, varían con el movimiento del relé.

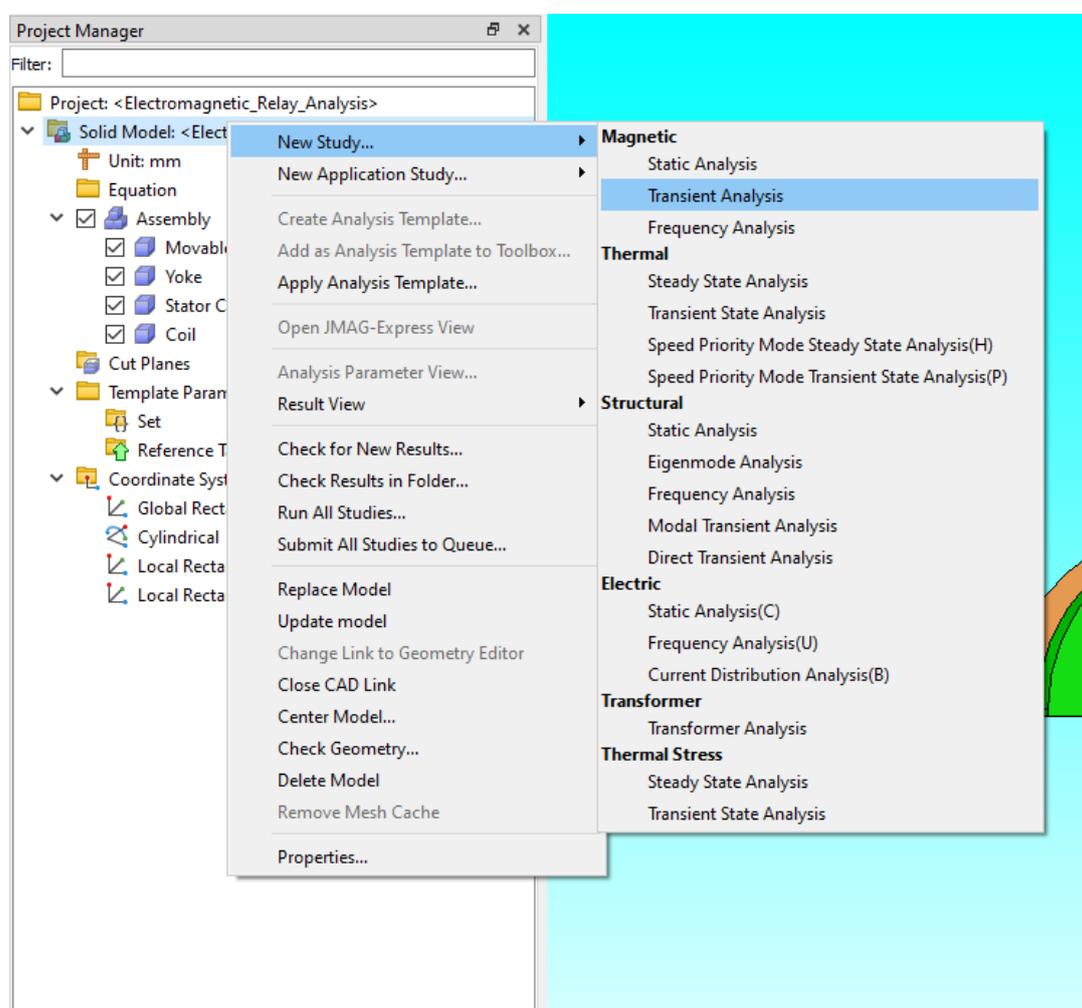


Figura 15. Menú desplegable para seleccionar el tipo de estudio

Al seleccionar esta opción, aparece en el apartado de *Project Manager* (columna situada a la izquierda de la pantalla) un nuevo apartado con distintas opciones que se modificarán más adelante.

Para obtener unos resultados correctos, es importante realizar una buena configuración de la simulación, definiendo los parámetros que tomará el ordenador durante los cálculos. Para ello, debe abrirse el menú desplegable que ofrece el nuevo estudio creado, y presionar la opción de propiedades. Esta acción abrirá una nueva ventana, en la que aparecen distintas opciones. A continuación, se explicarán aquellas en que deban hacerse modificaciones.

Step Control

Esta opción permite establecer la duración temporal de la simulación. JMAG es un software que realiza los cálculos paso a paso, por lo que definir un correcto número de *steps* determinará la duración de la simulación y la precisión de los resultados.

En este estudio, se selecciona la opción de intervalos regulares, en el que el rango de tiempo establecido (*Start Time* y *Finish Time*) se divide en intervalos de igual tamaño. Se establece una duración de un segundo y 5000 divisiones, de forma que el intervalo que se analiza en cada paso es de 0.0002 segundos.

Por otro lado, el número de pasos se establece en 51. De esta forma, y como se deduce de la ecuación 20, el tiempo de análisis es de 0.01 s, que será suficiente para estudiar el proceso de activación y desactivación del relé. Más adelante se explicará como establecer estas condiciones temporales en el circuito eléctrico para que la simulación abarque por completo el periodo de funcionamiento del relé.

$$\text{Analysys time} = \text{star time} + \frac{\text{end time} - \text{star time}}{\text{number of divisions}} \cdot (\text{number of steps} - 1)$$

Ecuación 20. Relación entre el tiempo de análisis y los pasos de la simulación

Full Model Conversion

Es una opción que debe tenerse en cuenta cuando se ha utilizado un modelo parcial en la realización del estudio, permitiendo que los resultados se conviertan al modelo completo.

En cuanto a las posibilidades que ofrece esta ventana, debe ajustarse el factor de conversión denominado *Other than Periodic Boundary* a 2. Este factor es utilizado cuando el modelo creado ha sido separado por un solo plano de simetría.

Esta configuración aparece reflejada en el plano 2.2.

Circuit Settings

Se trata de una opción utilizada para acoplar el análisis del campo magnético y de un circuito eléctrico. En el caso de este estudio, debe activarse la opción de *Convert (Series/Parallel)*. El número de series y paralelos se basa en la forma en que debe conectarse el modelo cuando se convierte uno parcial en uno completo. Teniendo en cuenta las características del circuito, se establece el número de series en 2 (figura 16).

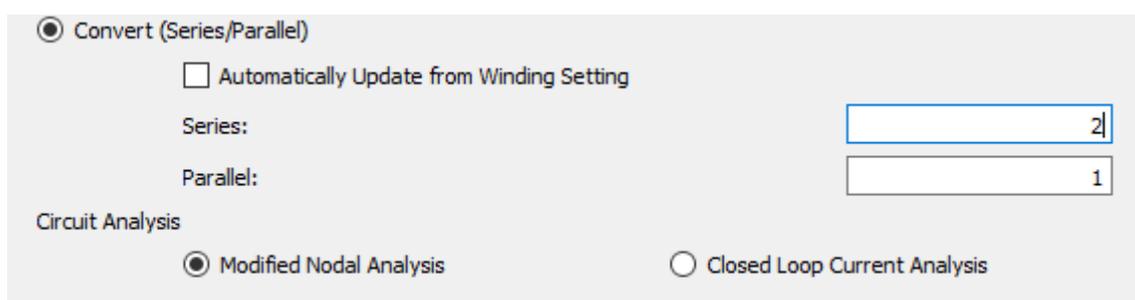


Figura 16. Configuración del apartado Circuit Settings

Aunque estos ajustes ya serían suficientes para realizar el análisis de forma correcta, existe una opción para mejorar la velocidad de cálculo del ordenador. Esta posibilidad aparece al presionar la casilla denominada *Show Advanced Settings*, en el apartado de *Parallel*. Modificar este apartado permitirá acelerar los cálculos realizados. Considerando las características del ordenador utilizado y la licencia adquirida por el grupo GAIME, es posible activar la computación en paralelo con ocho núcleos, lo cual acortará considerablemente los tiempos de simulación. El plano 2.4 muestra esta configuración.

Por último, se muestra a continuación el método seleccionado para resolver ecuaciones lineales simultáneas. Debido a que las partes en las que son consideradas las corrientes parásitas son grandes en relación con el modelo completo, es recomendable utilizar el método *A-phi Method 2* para mejorar la convergencia.

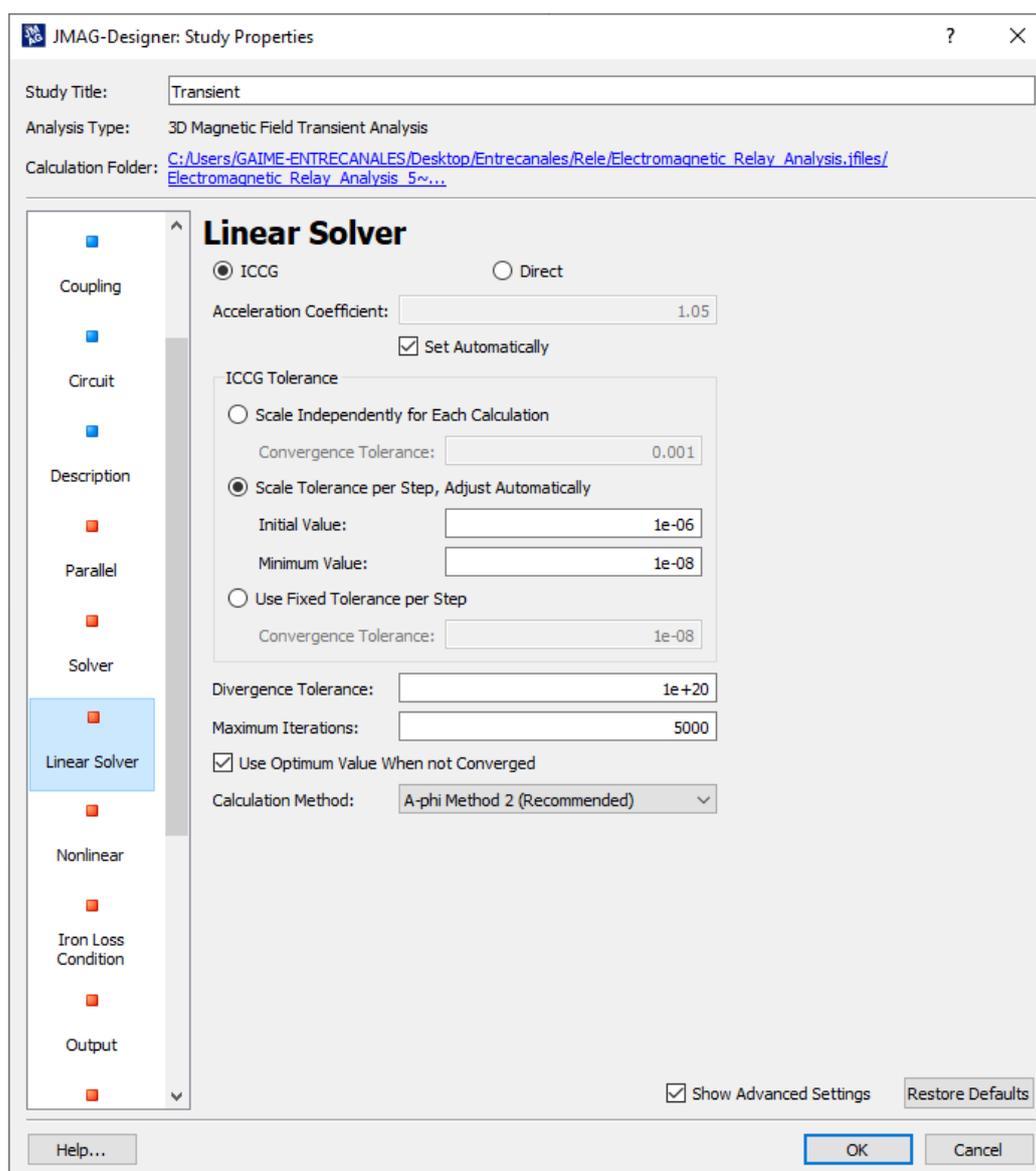


Figura 17. Configuración del Linear Solver

7.1.3 Asignación de materiales

Una vez se ha completado la configuración de los ajustes previos de la simulación, se puede seguir con la modelización del relé en el entorno de JMAG realizando la asignación de los materiales a los distintos componentes del relé. Para ello, se utiliza la biblioteca de materiales que facilita JMAG, situada a la derecha de la ventana de trabajo (plano 3.1).

En el caso de la bobina, podría construirse tanto de aluminio como de cobre, pues ambos presentan unas características óptimas para el funcionamiento del relé. En este estudio, se

selecciona el cobre pues, aunque su precio será mayor, tiene mejores prestaciones que permiten construir relés con alta eficiencia y durabilidad.

Para asignar el material, debe seleccionarse el cobre en la biblioteca de materiales y arrastrarse hasta la bobina de la ventana de trabajo. En la ventana que aparece en el lado izquierdo no debe modificarse ningún parámetro, como muestra la figura 18.

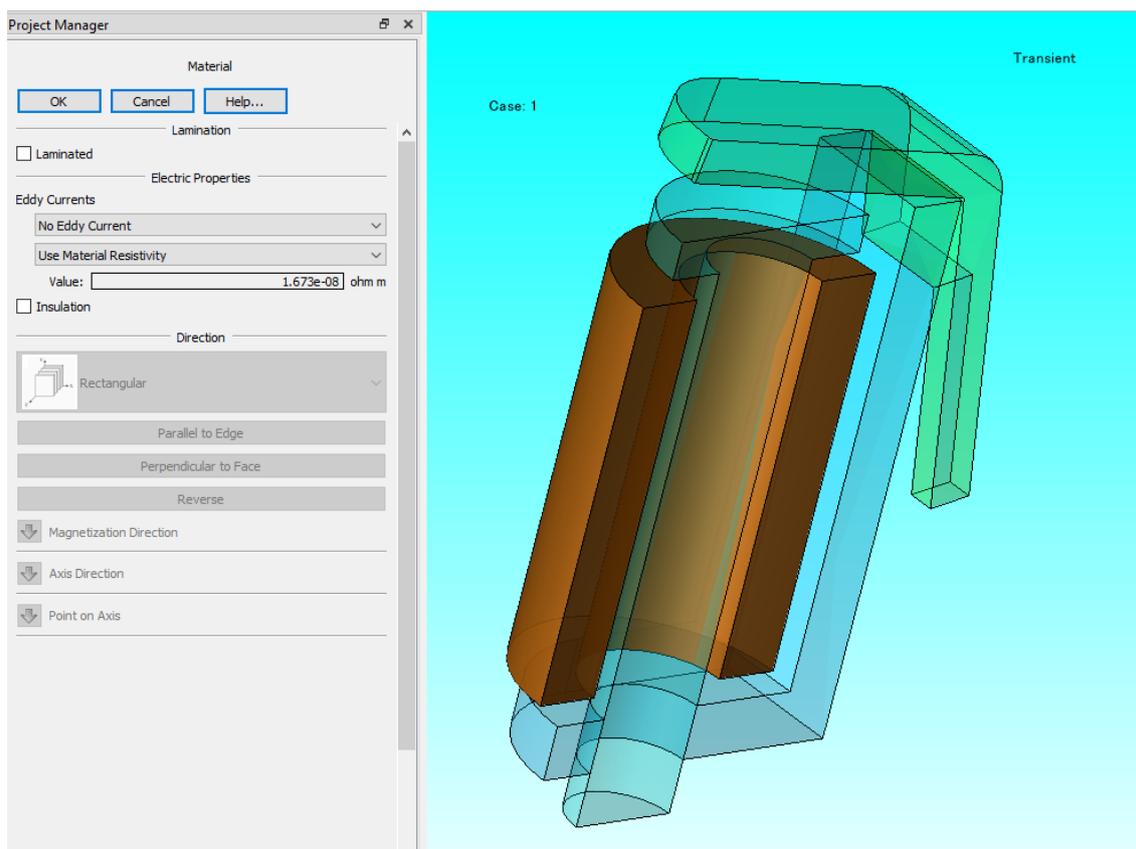


Figura 18. Asignación del cobre como material de la bobina

Para los componentes ferromagnéticos del relé, se selecciona el acero SPCC, situado en la biblioteca que facilita JSOL dentro del apartado de acero para estructura (*Steel for Structure*), como se muestra en el plano 3.2.

Como se ha comentado en el apartado 4 de la memoria (Condiciones preliminares), el acero SPCC es un tipo de chapa de acero laminada en frío que, gracias a su proceso de fabricación, presenta una gran resistencia y durabilidad.

Dado el objetivo del estudio, que consiste en el análisis de la respuesta dinámica del relé considerando las corrientes parásitas, es imprescindible activar esta opción. Para ello, tras arrastrar el material desde la biblioteca hasta la geometría del componente, deben modificarse las propiedades eléctricas de tal manera que se permitan dichas corrientes (*Allow Eddy Currents*), como se muestra en la figura 19.

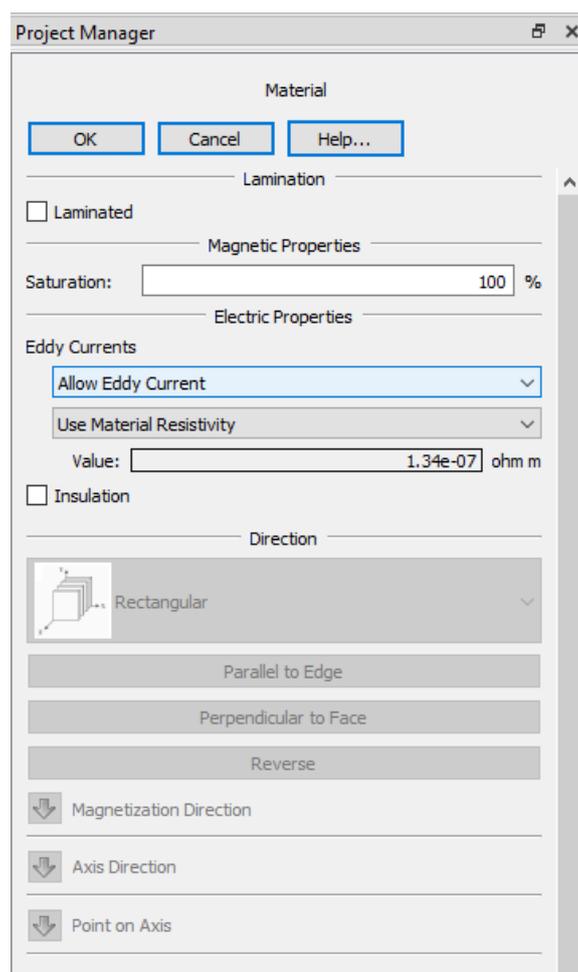


Figura 19. Activación de la opción Allow Eddy Currents

7.1.4 Creación del circuito eléctrico

Para continuar con la preparación de la simulación, es necesario crear el circuito eléctrico que registrará el funcionamiento de la bobina y, por tanto, el comportamiento de los distintos componentes ferromagnéticos del modelo.

En este estudio, se utilizan los siguientes componentes para la modelización del circuito:

- Fuente de alimentación: permitirá la alimentación de la bobina en corriente continua con la tensión establecida.
- Interruptor: este componente permite controlar el tiempo de alimentación del circuito, pues se podrá programar su cierre y apertura.
- FEM Coil: permite la conexión de la bobina con su correspondiente elemento del circuito eléctrico.
- Diodo: utilizado como protección contra la aparición posibles picos de tensión tras desconectar la bobina, que podrían ser de 10 veces la tensión de alimentación y causar problemas serios a los distintos componentes del relé.
- Conexión a tierra.

Para crear el circuito en JMAG, debe presionarse el botón derecho del ratón sobre el estudio creado y seleccionar la opción *Add Circuit* en el menú desplegable (plano 4.1). Esta acción abrirá una nueva ventana de JMAG-Designer que permitirá la edición de dicho circuito. La localización en la barra de herramientas de los componentes mencionados queda resaltada en el apartado 4.2 del documento de planos.

A continuación, se detallan los parámetros seleccionados para cada componente.

Fuente de alimentación

Al tratarse de un circuito alimentado por corriente continua, debe seleccionarse una función constante en el tipo de funcionamiento. La constante especificada será la tensión de alimentación de la fuente, que en el caso del estudio se establece en 12V. El plano 4.3 muestra esta configuración.

Interruptor

Para establecer los tiempos de apertura y cierre de este componente, puede elegirse entre una secuencia de puntos o la asignación de los parámetros de funcionamiento, opción elegida en este caso.

Son cuatro los parámetros que deben definirse para una correcta configuración del interruptor:

- *1-period*: establece el valor del periodo de funcionamiento del interruptor. En este estudio, tal y como se estableció en el apartado 7.1.2 (ajustes previos de computación), el tiempo de estudio es de 0.01 s, por lo que se establece este mismo tiempo como periodo de funcionamiento.
- *First transition*: representa el instante en el que el interruptor realiza la primera transición. En este caso, se desea que la bobina que alimentada prácticamente en el mismo instante en el que comienza la simulación, por lo que se establece en 0.001 milisegundos (tiempo próximo a cero).
- *Second transition*: indica el instante en el que el interruptor realiza la segunda transición y regresa a su posición inicial. Se ajusta este tiempo en 0.005 segundos para que cese la alimentación a la mitad del tiempo de simulación.
- *Initial State*: dada la forma en que JMAG define los parámetros de funcionamiento, se establece el estado inicial en apagado (*OFF*), aunque muy poco tiempo después realice la primera transición.

A continuación, la figura 20 muestra esta configuración.

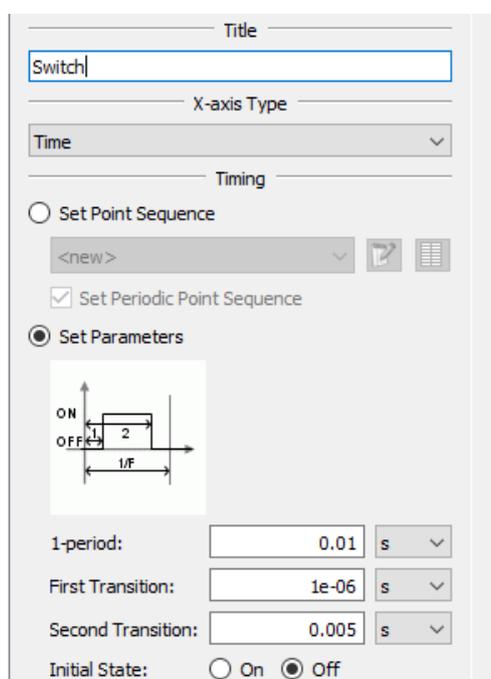


Figura 20. Parámetros de funcionamiento del interruptor

FEM Coil

Este componente representa la unión entre la modelización física de la bobina y el circuito eléctrico. Los valores que JMAG permite editar y elegir como variables son el número de vueltas y la resistencia de la bobina, que se establecen de la siguiente manera.

- Número de vueltas: 1460.
- Resistencia: 165 Ω .

Más adelante se explicará la forma en que debe añadirse la condición de FEM Coil al modelo para completar esta conexión y poder representar correctamente el funcionamiento de la bobina.

Diodo

Tal y como se ha mencionado, se trata de un componente imprescindible para asegurar un correcto funcionamiento del relé, especialmente tras la desconexión de la bobina. Para no interferir en el funcionamiento del circuito, se debe ser especialmente cuidadoso con la forma en que se conecta.

Para establecer las características de funcionamiento del diodo, se selecciona la opción de la función logarítmica, que responde a la ecuación 21.

$$V(t) = K \cdot \ln\left(\frac{I_s + I(t)}{I_s}\right)$$

Ecuación 21. Expresión logarítmica de funcionamiento del diodo

En esta ecuación, $V(t)$ es la diferencia de potencial entre dos terminales, K es una constante, I_s es la corriente de saturación e $I(t)$ es la corriente que atraviesa el diodo.

En JMAG, se establecen los siguiente parámetros (plano 4.5):

- *Exponential Coefficient K*: 0.025.
- *Saturation Current*: 1e-10 A.

Para completar el circuito, deben unirse los distintos componentes utilizando un cable (*Wire* en JMAG) para conseguir un aspecto como el mostrado en la figura 21. Es importante

comprobar que en todas las conexiones aparece un punto negro, que asegura que se ha realizado correctamente.

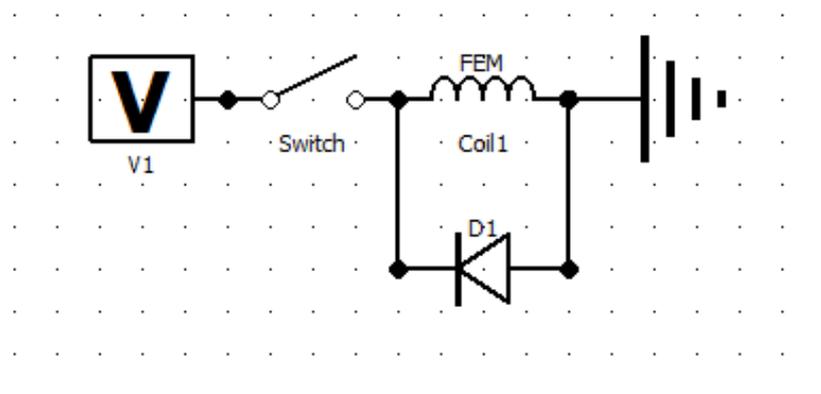


Figura 21. Circuito eléctrico para la conexión de la bobina

7.1.5 Definición de las condiciones

Para la realización de la simulación es necesario establecer las condiciones en que se realiza el estudio de entre las diversas opciones que ofrece JMAG en su catálogo de condiciones, recogido en el apartado 1.1 de los anexos.

En este estudio, además de la condición de FEM Coil ya mencionada para la relación de la bobina con el circuito eléctrico, es necesario establecer otras condiciones para definir el desplazamiento del núcleo móvil o la condición de simetría del modelo construido. Para asignar estas condiciones, deben seleccionarse en el catálogo situado a la derecha de la pantalla y arrastrarse hasta la columna de *Project Manager*, donde aparecerá un nuevo menú con los parámetros que JMAG permite modificar.

A continuación, se explica cada una de ellas en profundidad.

Condición de simetría o *Symmetry Boundary*

Establece los límites de simetría del modelo. Se trata de la condición que ha permitido la construcción de tan solo la mitad del relé para la simplificación del proceso y de los cálculos computacionales puesto que, como se mencionó previamente, se ha asumido que todo lo que ocurra a un lado del plano de simetría tendrá lugar de manera idéntica al otro lado.

Al definir esta condición, deben seleccionarse aquellas caras del modelo que formen parte del plano de simetría, tal y como se indica en el plano 5.1.

Condición de par o Torque Nodal Force

Esta condición es empleada para calcular el par que actúa sobre un determinado componente del modelo. Con ella, es posible obtener una distribución de la fuerza electromagnética en la región en la que se haya establecido la condición, en este caso, el núcleo móvil del relé.

Al aplicar esta condición sobre el modelo, debe seleccionarse el núcleo móvil como parte objetivo de la condición, y el eje Y como eje de rotación del componente. Esta configuración queda representada en el plano 5.2.

Condición de rotación o Rotation

Es una condición aplicada sobre aquellos cuerpos que presenten un movimiento de rotación respecto un eje, en este caso el núcleo móvil al magnetizarse el núcleo.

Tras arrastrar la condición a la geometría de este componente, aparece un menú en el que debe establecerse el eje de rotación (eje Y). Por otro lado, existen diversas posibilidades para indicar a JMAG el tipo de rotación en cuestión, pero en este caso se selecciona la ecuación de movimiento (*Equation of Motion*), tal y como se aprecia en la figura 22.

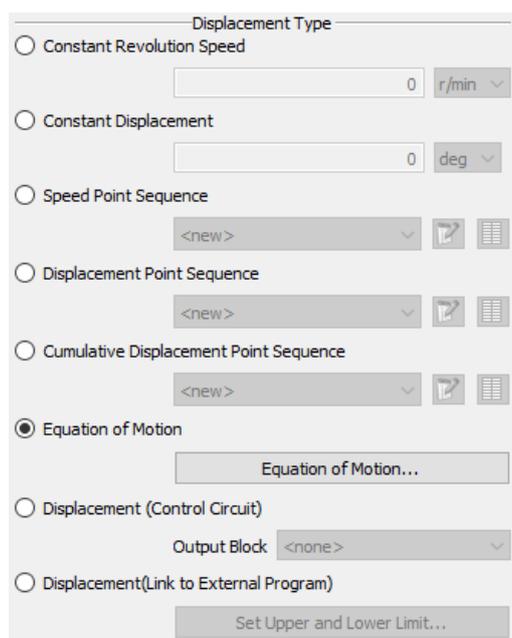


Figura 22. Posibilidades para definir el tipo de desplazamiento en JMAG

Al seleccionar esta opción, aparece una ventana emergente en mitad de la pantalla en la que se establecerán los parámetros necesarios para definir el movimiento de rotación del núcleo móvil (ecuación 22).

$$T = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + K_m(\theta + \theta_0) + \tau$$

Ecuación 22. Ecuación del movimiento de rotación en JMAG

El plano 5.3 muestra la pestaña que ofrece JMAG para definir esta ecuación del movimiento, donde aparecen identificados los distintos términos y opciones. A continuación, se detallarán aquellos parámetros necesarios para definir correctamente este movimiento de rotación.

- Par de torsión (*Torque*): para el par T_1 debe seleccionarse la condición de par establecida previamente, a la que se denominó *Force*, mientras que el par T_2 se fija en un valor nulo. Además, debe dejarse el multiplicador del par (*Torque Multiplier*) en la unidad, puesto que desea considerarse sin modificaciones la condición de par seleccionada.

$$T = kT_1 + T_2$$

Ecuación 23. Par de torsión

- Momento de inercia (*Inertia Moment*): al igual que en el término anterior, pueden definirse dos momentos de inercia. De nuevo, el segundo término (J_2) se deja en cero. Para el momento de inercia J_1 , se selecciona la opción de calcular durante el análisis, que permitirá el cálculo de este parámetro durante la simulación teniendo en cuenta el modelo geométrico completo, gracias al factor de conversión *Other Than Boundary* establecido en el apartado 7.1.2.

$$J = \rho J_1 + J_2$$

Ecuación 24. Momento de inercia

- Constante del muelle (*Spring Constant*): para este estudio, se establece un valor constante de $5 \cdot 10^{-5}$ Nm/deg.

- Rango de movimiento (*Range of Movements*): deben establecerse los límites superior e inferior del movimiento de rotación. En este caso, considerando la geometría del relé y la restricción que se aplicó durante la modelización del núcleo móvil, se establece un rango de movimiento de 10 grados.

Definiendo estos parámetros, puede darse por finalizada la condición de rotación del núcleo móvil.

Condición de FEM Coil

Para establecer la conexión entre la geometría de la bobina y el componente del circuito eléctrico que permitirá la simulación, debe aplicarse correctamente esta condición. Para ello, es importante considerar lo siguiente:

- *Linked FEM Coil*: debe seleccionarse el componente del circuito eléctrico con el que se desea establecer la conexión. En este estudio solo existe uno, pero en caso de haber más elementos de este tipo, se debe estar seguro de seleccionar el correcto.
- *Parts per Coils*: tras presionar esta ventana en blanco, debemos seleccionar la geometría de la bobina.
- *Direction Type*: al tratarse de un modelo parcial, se selecciona la opción que permite definir la cara por la que entrara la corriente. De nuevo, se presiona la ventana en blanco para posteriormente seleccionar la cara izquierda de la bobina, como se indica en el plano 5.4.

Con esta última condición se ha completado este apartado 7.1.5 de definición de las condiciones. Puede comprobarse en la pestaña de *Project Manager* que todas se han aplicado correctamente pasando el cursor por encima de ellas. La figura 23 muestra el apartado de condiciones.

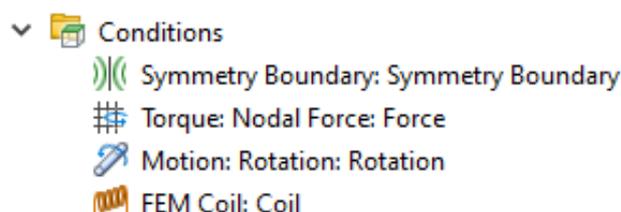


Figura 23. Apartado de condiciones en la ventana Project Manager

7.1.6 Generación del mallado

En una simulación basada en el cálculo por elementos finitos, cuanto menor sea el tamaño de los elementos en que se divide el modelo, más costoso pero a la vez preciso será el cálculo. Por este motivo, es imprescindible realizar un mallado óptimo que permita obtener resultados precisos sin un tiempo de simulación excesivo. Para ello, debe presionarse el botón derecho del ratón sobre el apartado *Mesh* y seleccionar la opción de propiedades (figura 24), donde se podrán configurar los ajustes básicos (plano 6.1).

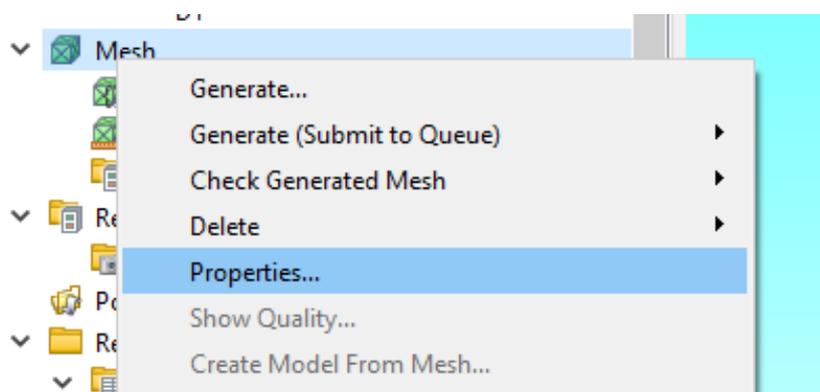


Figura 24. configuración de las propiedades del mallado

Teniendo en cuenta el movimiento del relé durante la simulación, debe seleccionarse el método de mallado que permite su creación en cada paso de la simulación (*Generate Mesh at Each Step*), puesto que un mallado fijo produciría problemas durante el análisis.

Por otro lado, aunque el circuito magnético puede considerarse cerrado en el cuerpo del relé, hay cierta probabilidad de que exista una dispersión del flujo magnético, por lo que la región del aire es creada. En términos generales es recomendado un tamaño de 1.05 a 2.5 veces las dimensiones del modelo, por lo que en este caso se fija en 2.

Para definir las dimensiones de los elementos creados, se debe añadir la opción de control del tamaño para cada parte. Para un correcto análisis de las corrientes parásitas en el modelo, se fija un tamaño de 0.2 mm para la armadura, el núcleo móvil y el núcleo del estátor. Por otro lado, el mallado de la bobina no es necesario que sea tan detallado, por lo que se establece un valor de 0.5 mm. Los planos 6.2.1 y 6.2.2 muestran este proceso.

7.2 Primera simulación y obtención de resultados

Tras haber realizado los pasos explicados previamente, es importante realizar una comprobación de los aspectos más relevantes antes de proceder con la simulación, pues una vez iniciada no podrán ser modificados.

Para realizar la simulación, debe abrirse el menú desplegable del estudio, y seleccionar la opción de *Run Active Case* (figura 25), que permitirá realizar los cálculos para el caso seleccionado. Otras opciones que ofrece JMAG en este menú serán explicadas más adelante, como la posibilidad de simular varios casos de forma consecutiva mediante un análisis paramétrico.

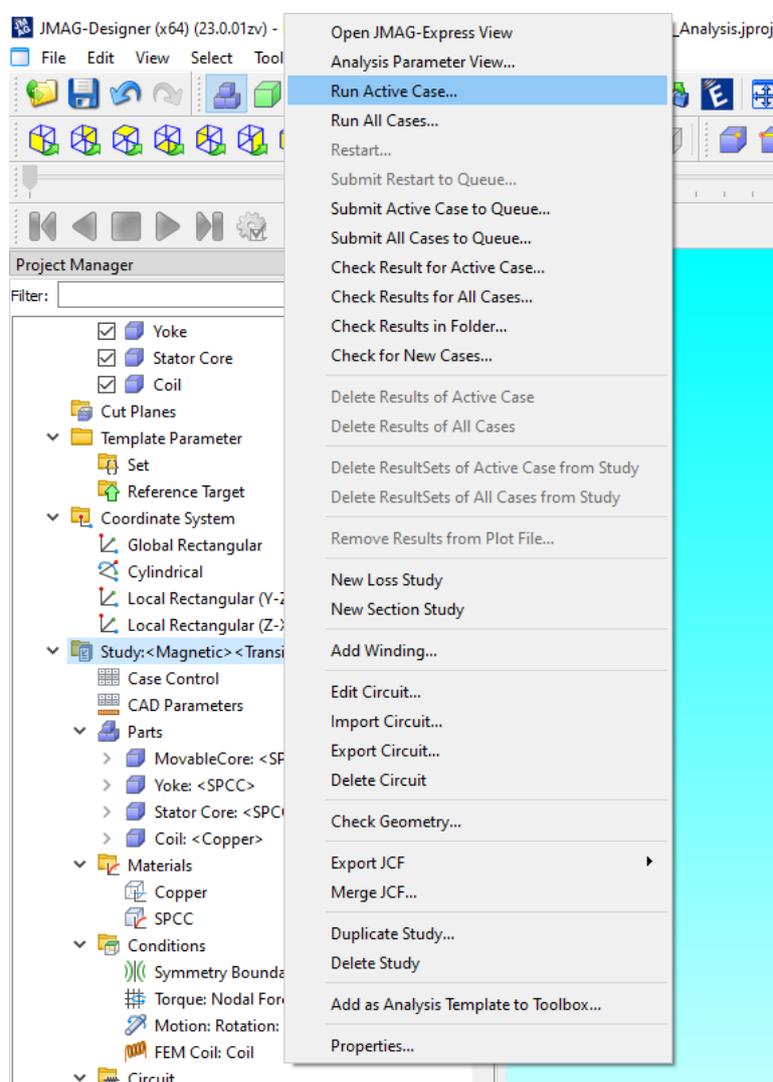


Figura 25. Menú desplegable para comenzar la simulación

En el plano 7.1 se muestra la ventana que aparece al comenzar la simulación. En ella, puede observarse información sobre el estado en el que se encuentra el estudio, como el caso que se está simulando, el paso en el que se encuentra la simulación, la duración esperada, el tiempo restante hasta completar el análisis o el progreso en porcentaje de la simulación. El gráfico que aparece puede modificarse en el apartado *Customize Monitor* para ver en tiempo real el estado de la variable seleccionada (en el caso del plano se puede ver como el núcleo móvil ya ha llegado al límite superior del movimiento, 10 grados). Por último, puede obtenerse información sobre la hora a la que se ha comenzado cada paso de la simulación y un mensaje informativo sobre la acción que se está llevando a cabo en cada instante.

Al completar la simulación, JMAG muestra un mensaje que informa sobre la calidad del mallado y la ubicación de los cálculos y los resultados. Adicionalmente, muestra los posibles avisos que hayan podido surgir durante la realización de la simulación. En este caso, aparece una advertencia sobre un posible error que podría darse con el mallado en caso de colisionar dos cuerpos, aunque la simulación se ha completado correctamente. El plano 7.2 muestra esta ventana.

Llegados a este punto, es posible comenzar con la visualización y análisis de los resultados.

7.2.1 Análisis de los resultados

Tras completar la simulación, llega el momento de tratar y analizar los resultados arrojados por la simulación.

Dentro de la pestaña de *Project Manager* se encuentra el apartado de resultados, donde se muestran todas las posibilidades que ofrece JMAG para mostrarlos. En este estudio, se utilizarán los siguientes:

- *Contour Plot*: permite la visualización de un mapa de colores sobre el propio modelo, en el que cada color está asociado a un valor de una determinada variable, como puede ser la densidad de flujo magnético, la magnetización o la fuerza aplicada sobre ciertos componentes.

- *Flux Line*: gráfico realizado sobre el propio modelo que permite analizar de forma visual el recorrido seguido por el parámetro seleccionado, como las líneas de flujo magnético o la fuerza del campo magnético.
- *Graphs*: permite la visualización de los valores numéricos que adopta una variable durante la simulación. Es posible visualizar el gráfico en el propio entorno de JMAG, o exportar los datos en forma de tabla para su representación en otro software.

Para obtener cada tipo de representación se deberá seguir siempre el mismo proceso. Se acudirá a la sección en cuestión dentro del apartado de resultados, y en el menú que aparece al presionar el botón derecho del ratón, seleccionar la opción deseada. La figura 26 muestra este proceso para la representación gráfica del desplazamiento respecto el tiempo.

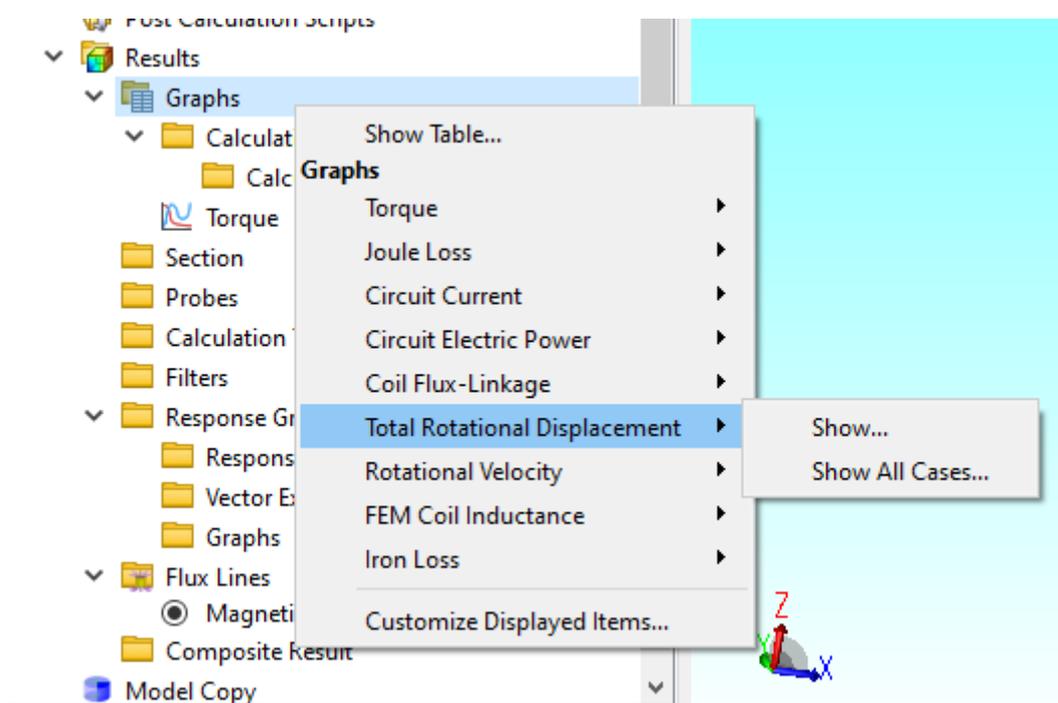


Figura 26. Creación del gráfico del desplazamiento respecto el tiempo

Considerando estas múltiples opciones, se comienza estudiando el desplazamiento del núcleo móvil respecto el tiempo, que permitirá analizar el tiempo de respuesta del relé tras ser activado. Este gráfico aparece representado en la figura 27.

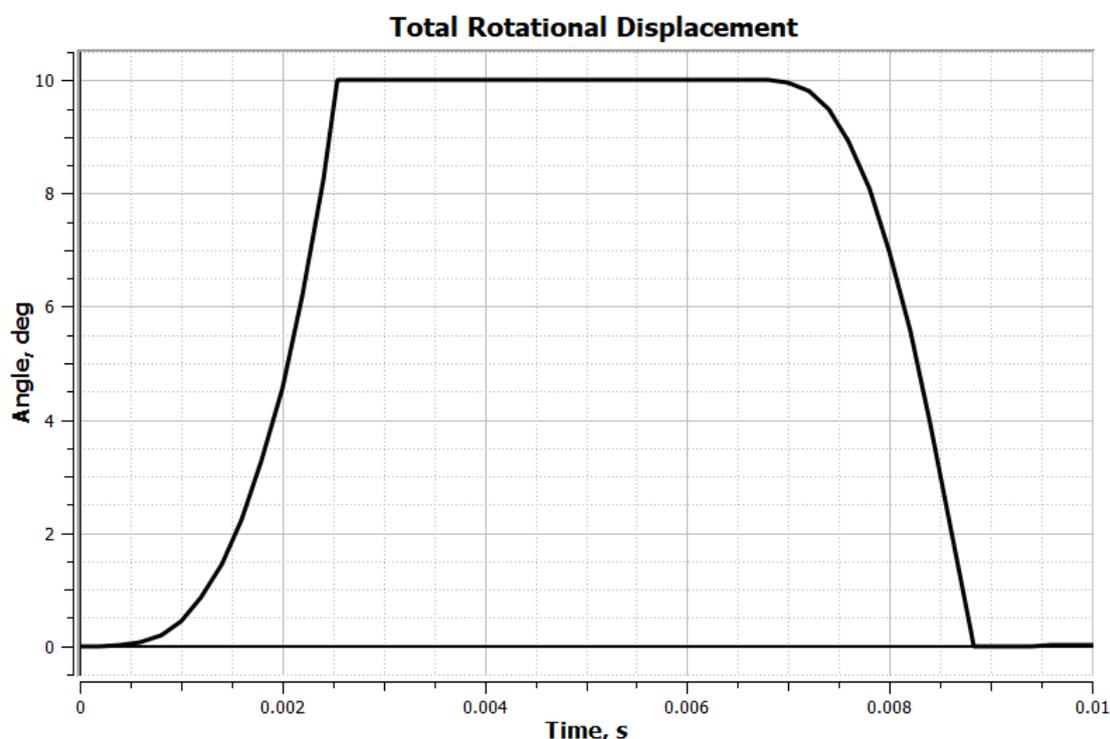


Figura 27. Representación gráfica del desplazamiento respecto el tiempo

Analizando la forma de la curva y los datos numéricos que pueden visualizarse en la tabla asociada, se observa que la activación del relé tiene lugar a los 2.55 ms, que es el primer instante de la simulación en el que el ángulo de desplazamiento del núcleo móvil alcanza los diez grados. Por otro lado, aunque la energización de la bobina cesa a los 5 ms del inicio de la simulación, el relé mantiene su posición hasta los 6.8 ms debido al magnetismo remanente presente en el material ferromagnético. Es en este momento cuando la fuerza que ejerce el resorte unido al núcleo móvil vence la fuerza magnética que lo mantiene y comienza el regreso a su posición inicial. En aquellas aplicaciones donde se requiera una gran precisión resultará interesante mejorar las propiedades de esta respuesta dinámica del relé, buscando una mejora tanto en el tiempo de activación como en el de regreso a su posición inicial.

En segundo lugar, resulta interesante realizar un análisis del comportamiento de la bobina cuando es energizada. Para ello, se extrae de JMAG el gráfico de la figura 28, que muestra la evolución de la corriente en la bobina con el tiempo. Para una correcta visualización se selecciona únicamente la bobina en las opciones del gráfico.

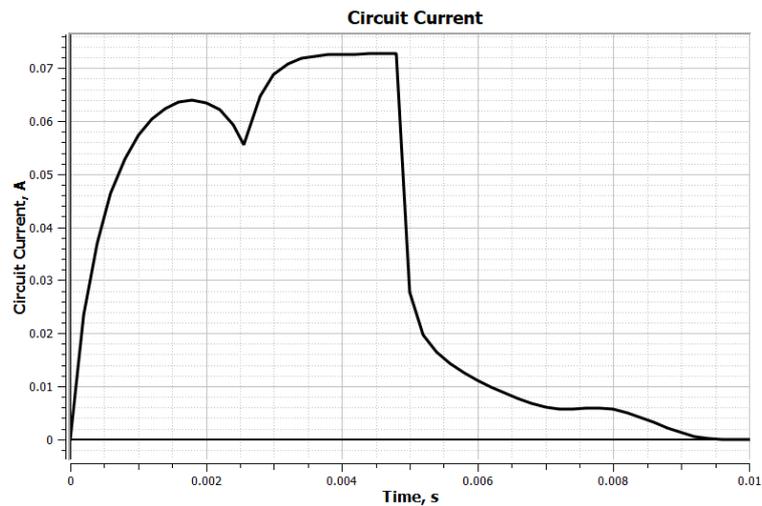


Figura 28. Representación gráfica de la variación de la corriente con el tiempo

Estudiando la forma de dicha gráfica y comparándola con la curva teórica comentada en el apartado 3.3.2, se observa una clara semejanza. Desde la conexión de la bobina a la fuente de alimentación hasta el primer máximo relativo de la gráfica, se produce un aumento exponencial de la corriente. Durante este tiempo, el núcleo móvil no comienza a desplazarse debido a que la atracción magnética no es lo suficientemente fuerte como para atraerlo. Tras esto, se llega a un periodo de tiempo donde la corriente en la bobina disminuye, coincidiendo con el desplazamiento del componente móvil. Ampliando la gráfica en la zona en que deja de decrecer (figura 29), se observa como el tiempo es exactamente 2.55 ms, instante en el que se completa el movimiento del núcleo móvil.

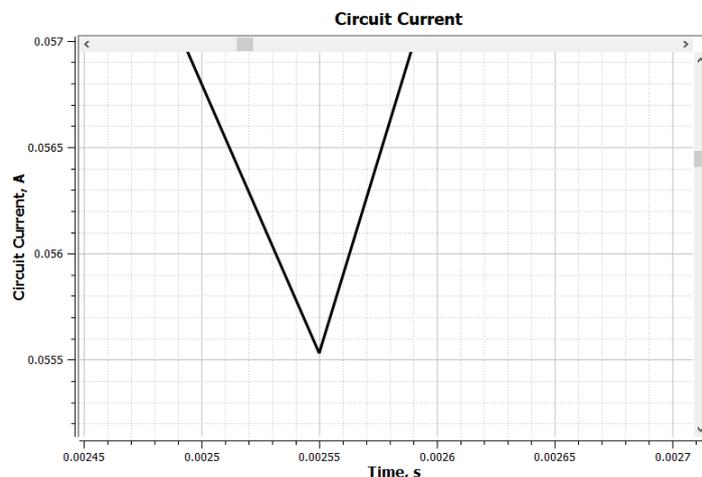


Figura 29. Instante en el que la corriente deja de decrecer

Por último, tras completarse el rango completo de movimiento, la corriente vuelve a incrementarse de forma exponencial hasta llegar a su valor de estado estacionario.

Una vez el interruptor del circuito eléctrico se abre, la corriente comienza a disminuir rápidamente gracias al circuito cerrado que se forma junto al diodo.

Tras este análisis de la variación de la corriente, se realiza una representación de la densidad de flujo magnético sobre los componentes ferromagnéticos del relé, ocultando para ello la bobina. Para esta representación, se definen los parámetros del plano 7.3.1, donde lo más importante es definir un rango fijo de valores en la escala que permita una mejor visualización de la variable. De otro modo, en cada paso se iría modificando la escala para que el número de colores seleccionados se adapten al valor máximo y mínimo presentes en ese instante. Este rango se establece entre 0 y 2 T.

El plano 7.3.1 recoge esta distribución del flujo magnético en tres instantes críticos durante el funcionamiento del relé.

En primer lugar, se muestra el instante previo al cese de la excitación de la bobina (paso 25 de la simulación). Se puede observar en este gráfico la gran densidad de flujo magnético existente, concentrado principalmente en el núcleo del estátor, que ha provocado la atracción del núcleo móvil.

En segundo lugar, se representa el instante posterior a la apertura del circuito (paso 26 de la simulación). En este caso, se aprecia una clara disminución de la densidad de flujo magnético, que sin embargo sigue siendo suficiente para mantener el relé activo.

Por último, se muestra el paso 36 de la simulación, que se corresponde con el instante previo al inicio del regreso del núcleo móvil a su posición inicial. Como era de esperar, el flujo magnético en este instante es considerablemente más débil, por lo que la fuerza de atracción es menor y vencida por la fuerza del resorte, permitiendo por tanto su regreso.

En el documento de planos se incluyen otros gráficos que pueden ser interesantes para comprender el funcionamiento del relé, entre los que se encuentra la representación gráfica del par de rotación o la visualización de las líneas de flujo magnético, donde se puede apreciar la magnetización del núcleo y el camino cerrado que se forma al desplazarse el núcleo móvil.

Una vez se ha completado este primer análisis, se presentan distintas posibilidades de estudios a realizar para seguir conociendo en profundidad los factores con mayor influencia la respuesta dinámica del relé electromagnético estudiado y, si fuera posible, mejorar sus características. Por ello, comienza a continuación un nuevo apartado destinado a otros estudios de interés.

7.3 Otros estudios de interés

A lo largo de esta sección, se explicará el contexto y el proceso a seguir de los diferentes estudios realizados junto a los resultados obtenidos tras las simulaciones.

En aquellos casos en que sea necesario, se seleccionará la opción de duplicar estudio o *Duplicate Study* que aparece en el menú desplegable del estudio inicial ya realizado. Esto permitirá la modificación de los parámetros necesarios sin perder la información relativa al primer análisis.

7.3.1 Influencia de las corrientes parásitas

Para la realización del primer estudio, fueron consideradas las corrientes parásitas que aparecen en los componentes ferromagnéticos durante el funcionamiento del relé, con el objetivo de obtener unos resultados fieles a la realidad.

Como bien se comentó en el apartado 3.2.2, estas corrientes de Foucault provocan un calentamiento del material y, lo que es más importante en este tipo de dispositivos, un efecto desmagnetizante que puede retrasar la activación del relé. Para comprobar la importancia de realizar esta consideración, se plantea este nuevo estudio, que analizará la respuesta del relé en idénticas condiciones pero sin considerar las corrientes parásitas.

Para ello, no es necesario crear un nuevo estudio, sino que se realizará un análisis paramétrico modificando únicamente la opción que permitía las corrientes parásitas en los materiales, como se vio en la figura 19.

Para la utilización de esta herramienta, debe abrirse el menú desplegable del estudio y seleccionar la opción *Analysis Parameter View* (plano 8.1). Al hacer esto, se abre una nueva ventana que ofrece varias opciones para realizar el estudio. En la parte inferior, se encuentran

los distintos parámetros que JMAG permite modificar en su análisis paramétrico, agrupados por categorías.

En este estudio, debe buscarse la opción de *Allow Eddy Currents* en el apartado de parámetros de diseño (*Design Parameters*) y seleccionarse para cada uno de los componentes ferromagnéticos, es decir, la armadura, el núcleo móvil y el núcleo del estátor.

Al realizar esto, aparece en la parte superior de la ventana el parámetro seleccionado. Es en este momento donde se puede seleccionar la opción de *Add Case* para añadir nuevos casos de estudio donde modificar esta opción. De esta forma, se ha creado un nuevo caso que no considera las corrientes parásitas (figura 30).

Study Title: <input type="text" value="Transient"/>		Analysis Type: 3D Magnetic Field Transient Analysis				
Case List: <input type="checkbox"/> Display Only Design Parameters						
<input checked="" type="checkbox"/> Case	Label	Geometry	Groups	MovableCore: Eddy Current	Yoke: Eddy Current	Stator Core: Eddy Current
<input checked="" type="checkbox"/> 1				Allow Eddy Current	Allow Eddy Current	Allow Eddy Current
<input checked="" type="checkbox"/> 2				No Eddy Current	No Eddy Current	No Eddy Current

Figura 30. Nuevo caso para el estudio de la respuesta dinámica sin considerar las corrientes parásitas

Una vez se ha configurado el análisis paramétrico, se puede iniciar la simulación. Para ello, es importante seleccionar la opción de *Run All Cases* del menú desplegable del estudio, que permitirá la simulación de ambos estudios de manera consecutiva e ininterrumpida. Tras completar los cálculos, JMAG muestra de nuevo una ventana con información sobre cómo fue la simulación. Al cerrar dicha ventana, se puede comenzar con el análisis de los resultados.

Análisis de los resultados

Sin duda alguna, el aspecto más relevante que se desea analizar en este estudio es la influencia de las corrientes parásitas en la velocidad de respuesta del relé.

Como se puede observar en la figura 31 situada a continuación, hay cierta diferencia entre ambos casos. Al no considerar las corrientes parásitas, el tiempo de activación del relé se reduce en 0.2 ms, que aunque puede parecer poco significativo, supone una disminución del

7.84%. Como consecuencia, también el regreso del núcleo móvil a su posición inicial se adelanta en 0.4 ms, algo que podría ser perjudicial según la aplicación del relé.

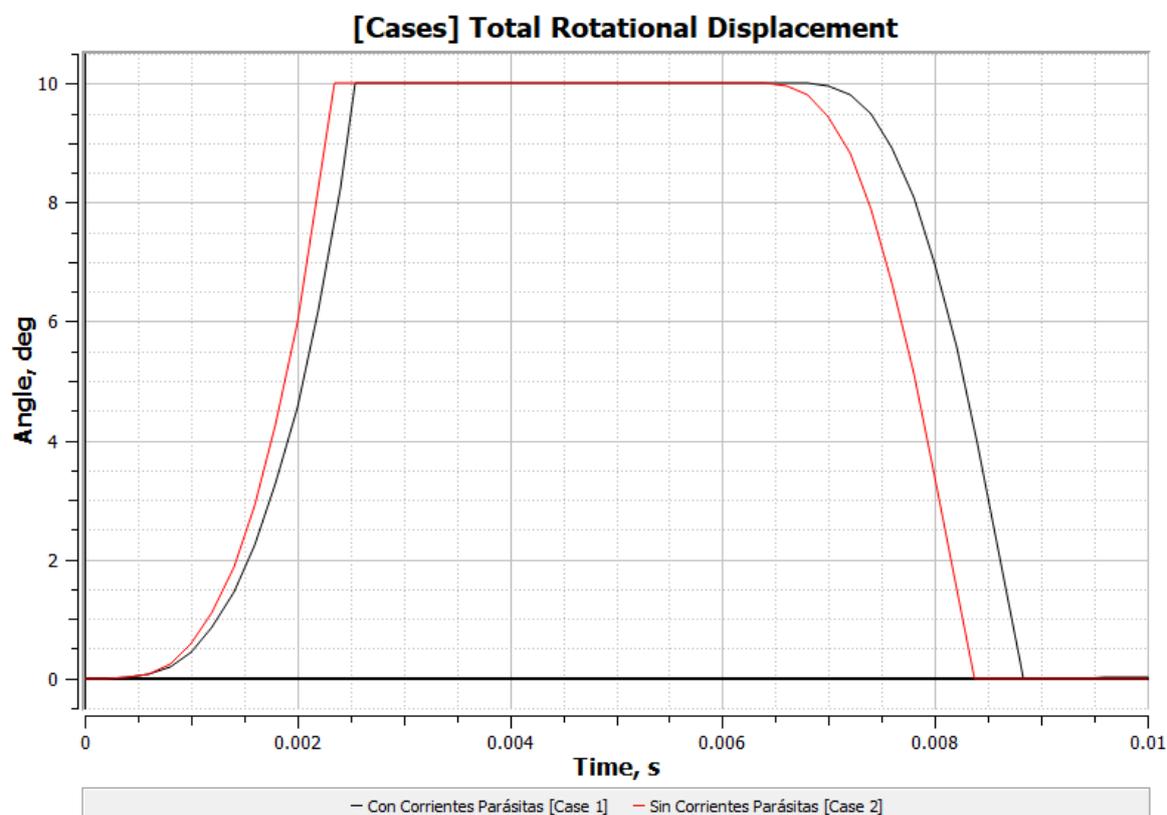


Figura 31. Comparativa de la corriente eléctrica en la bobina según la consideración o no de las corrientes parásitas

De esta forma, dada la importancia de la precisión y velocidad de los relés en el ámbito industrial, la consideración de las corrientes parásitas se convierte en un factor importante a la hora de simular su comportamiento, pues de otro modo se obtendrían resultados lejos de la realidad que podrían llevar a serios problemas de funcionamiento una vez son implementados.

Por otro lado, se puede comprobar el efecto desmagnetizante ya comentado que generan las corrientes parásitas. En la gráfica del plano 8.3, se puede observar como en el primer caso (con corrientes parásitas), el flujo magnético que atraviesa la bobina es mayor que en el segundo, debido al campo magnético generado por las corrientes parásitas que se oponen al campo magnético primario.

Por último, se presenta en el plano 8.4 una comparación de la densidad de flujo magnético en los componentes ferromagnéticos en distintos instantes. En estas imágenes, se puede comprobar como la ausencia de corrientes parásitas generan una distribución más uniforme y de mayor magnitud durante la energización del relé que, como se ha visto, conduce a una activación del relé más rápida. Sin embargo, tras la apertura del circuito eléctrico, es el segundo caso (sin corrientes parásitas) el que presenta una densidad de flujo magnético menor.

7.3.2 Influencia de la tensión de alimentación

En el relé estudiado anteriormente, la tensión de alimentación era de 12 V. Como se explicó en el apartado 3.3.2, es importante dejar un cierto margen entre la tensión mínima necesaria para que se produzca la activación del relé (*pick-up voltage*) y la tensión nominal, definiéndose entre ambas tensiones el denominado *safety factor for pick-up*.

Es en este contexto en el que se desarrolla este estudio, donde se realizará un análisis paramétrico de la tensión de alimentación con distintos valores normalizados. De manera adicional, se realizará el cálculo necesario para obtener la tensión mínima de activación utilizando la herramienta de optimización facilitada por JMAG.

Para ambas simulaciones, se crea un nuevo estudio (duplicando el estudio inicial) al que se denominará *Analysis_Supply_Voltage* (figura 32).

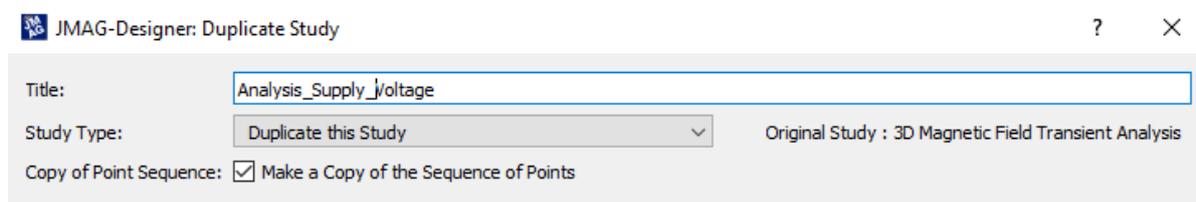


Figura 32. Creación del estudio para el análisis de la tensión de alimentación

Análisis paramétrico de la tensión de alimentación

De nuevo, se empleará la herramienta de análisis paramétrico. En este caso, se debe buscar y seleccionar la amplitud de la fuente de alimentación del circuito eléctrico, tal y como se aprecia en la figura 33.

Design Parameter	Variable N	Type	Current Val
<ul style="list-style-type: none"> ▼ Circuit <ul style="list-style-type: none"> ▼ Electric Potential Source(1 terminal) <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> X-axis type <input type="checkbox"/> Use Voltage Manual Setting <input type="checkbox"/> X-axis offset <input type="checkbox"/> Use start point <input type="checkbox"/> Use end point <input checked="" type="checkbox"/> Constant ▼ Switch <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Initial state <input type="checkbox"/> X-axis type 	Power S...		
		Flag	Time
		Flag	Off
		Real	0 s
		Flag	Off
		Flag	Off
	<variabl...	Real	12 V
		Flag	Off
		Flag	Time

Figura 33. Selección del parámetro de la tensión de la fuente de alimentación

Para el estudio que se desea realizar, se seleccionan cuatro valores arbitrarios que permitirán hacerse una idea de la influencia que tiene este parámetro sobre el funcionamiento del relé, que son 5, 9, 18 y 24 V, además de los 12 V que permitirá realizar la comparación con el estudio anterior.

Tras haberse definido los cinco casos (uno para cada valor de tensión de alimentación), se procede a la simulación con la opción de *Run All Cases*, de manera idéntica que en el estudio anterior.

Análisis de los resultados

Tras completar la simulación, el primer paso para analizar los distintos valores de tensión establecidos en el análisis paramétrico es comprobar aquellos que son capaces de producir la activación del relé.

En la figura 34 mostrada a continuación, se realiza una nueva representación gráfica del desplazamiento del núcleo móvil respecto del tiempo para los seis casos simulados.

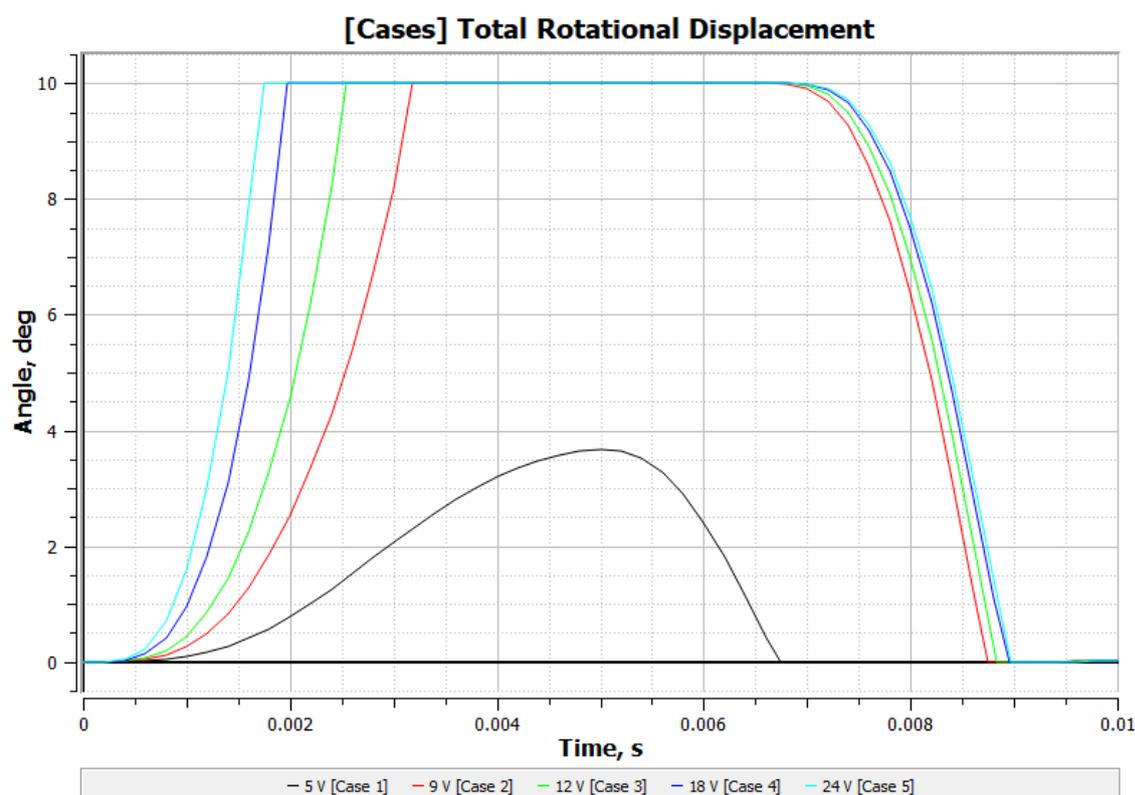


Figura 34. Comparación del desplazamiento del núcleo móvil según el valor de la tensión de alimentación

Se puede observar en dicho gráfico como la tensión de 5 V de no es capaz de hacer que este componente móvil complete su movimiento, por lo que el relé no sería capaz de abrir o cerrar los contactos del circuito externo. Por otro lado, tanto la tensión de 12 V que se aplicó en el estudio inicial, como las tensiones de 9, 18 y 24 V son capaces de producir la activación del relé.

Además, analizando el tiempo de activación de estos cuatro valores de tensión, se puede comprobar una de las grandes ventajas que presenta este incremento de la tensión de alimentación: la reducción considerable del tiempo de operación del relé.

Sin embargo, se debe ser cauteloso a la hora de incrementar el valor de la tensión, puesto que al mismo que tiempo que se produce una disminución del tiempo de respuesta, hay un importante incremento de las pérdidas caloríficas que tienen lugar en la bobina, como se puede observar en el gráfico del plano 9.1. Por este motivo, hay que analizar con detenimiento las ventajas e inconvenientes que supone tomar esta medida.

De manera adicional, se incluyen en el documento de planos otros gráficos comparativos de los valores de flujo magnético a través de la bobina y el par de rotación del núcleo móvil, variables en las que también se produce un incremento ante un aumento en la tensión de alimentación. Por último, se recogen imágenes de la representación de la densidad de flujo magnético de los cinco casos en el instante anterior a la apertura del circuito, que permite hacerse una idea de la influencia de la tensión sobre dicha variable.

Cálculo de la tensión mínima de activación del relé (pick-up voltage)

Para calcular la tensión mínima de activación del relé se emplea la potente herramienta de optimización de la que dispone JMAG. Esta herramienta modificará la magnitud de la variable definida para cumplir con la función objetivo introducida.

Para que el software de JMAG sea capaz de crear nuevos casos con distintos valores del parámetro seleccionado, debe establecerse un rango de valores entre los que el programa adecuado. Es por tanto labor del usuario crear este intervalo para facilitar los cálculos computacionales y llegar a unos resultados más precisos y de una forma más veloz.

Para ello, se realiza un nuevo análisis paramétrico en el que se modificará la tensión de alimentación. Para seleccionar los nuevos valores se debe prestar atención al estudio anterior, en el que se observa como la tensión de 5 V no es capaz de generar la fuerza de atracción necesaria para que el núcleo complete su movimiento, mientras que un valor de 9 V sí. Por ello, se realiza una simulación con valores de la tensión de alimentación de 6, 6.5 y 7 V, que se intuyen próximos al valor de la tensión mínima de activación.

Una vez realizada la simulación y analizando los resultados obtenidos (plano 9.5.1), se deduce que la tensión mínima que puede producir la activación del relé se encontrará entre 6 y 6.5 V. De esta forma, queda definido el intervalo previamente mencionado y se puede proceder a la configuración de la optimización.

Para abrir el menú que permite modificar los parámetros necesarios, se presiona el botón derecho sobre el apartado de *Case Control* de la pestaña de *Project Manager*, situado justo debajo del estudio actual, y se selecciona la opción de *Optimization*, como se indica en la figura 35.

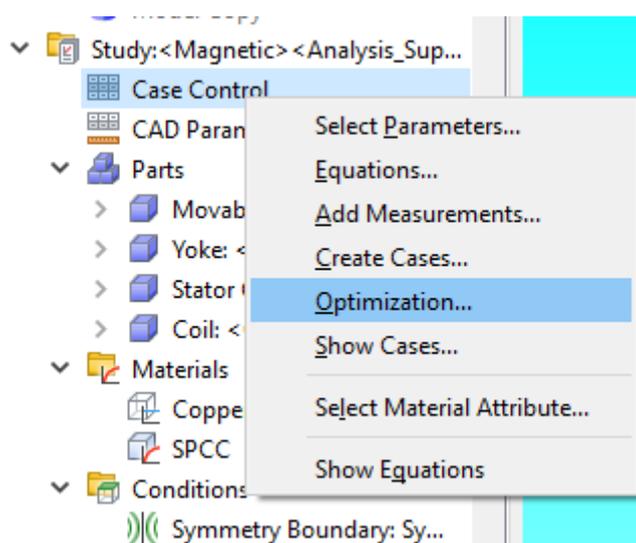


Figura 35. Selección de la herramienta de optimización.

Al hacer esto, se abre una ventana con toda la información que debe detallarse para poder realizar al cálculo de optimización.

En primer lugar, debe introducirse el rango de valores de 6 a 6.5 V. Tras ello, deben seleccionarse las variables que se desean optimizar. Para el estudio que va a realizarse, se selecciona el ángulo de desplazamiento y la corriente del circuito (plano 9.5.3). Es importante comprobar que al seleccionar el ángulo de desplazamiento se utilice como método de cálculo el valor máximo, que será de diez grados en aquellos casos en los que se produzca la activación del relé. En el caso de la corriente, puede dejarse el modo por defecto de valor medio.

Una vez seleccionadas estas variables, se definen las funciones objetivo de la optimización. Dado que JMAG no permite seleccionar la propia tensión del circuito como función objetivo, se establece que el valor de la corriente debe ser mínimo, puesto que dicho valor estará asociado a un valor mínimo de tensión. Por parte del desplazamiento del núcleo móvil, la función objetivo es de maximizar su valor para asegurar la activación del relé.

Para seleccionar el método a utilizar y definir las características de la simulación, se debe acudir a la pestaña de opciones (*Options*). En este caso, se selecciona como modo de optimización el denominado *Genetic Algorithm*, que permite realizar una optimización de un solo objetivo.

Este método permite modificar los siguientes parámetros:

- *Number of Generations*: establece el número máximo de generaciones que se realizarán durante la optimización. El proceso finalizará cuando se alcance el número máximo de generaciones o el criterio de parada, lo que antes suceda. Considerando la exigencia computacional de los cálculos y las necesidades de precisión, se establece un límite de 10 generaciones.
- *Population Size*: número máximo de individuos creado en cada generación, definiéndose un individuo como cada uno de los valores únicos de la variable parametrizada.
- *Number of Children*: establece el número de casos nuevos creados en cada generación.
- *Step-Size Parameter*: determinará el desplazamiento que se realiza en cada nueva generación, siempre en la dirección marcada por aquel individuo que más se acerque al cumplimiento de las funciones objetivo establecidas.
- *Stopping Criteria*: cuando la mejor opción obtenida durante el proceso no cambia en el número de generaciones definido en este apartado, se considera que la optimización ha llegado a su fin. Los valores más comunes se encuentran entre un 20 y 25% del número máximo de iteraciones, por lo que en este estudio se fija en 2.

Una vez configurada la optimización, puede utilizarse la herramienta de comprobar (*Check*) que indicará si se ha cometido algún error durante el proceso. En este caso, no detecta ningún error y pueden comenzarse los cálculos.

Al iniciar la simulación con la opción de *Run*, JMAG procede a crear distintos casos modificando el valor de la tensión. A medida que la optimización avanza, las variaciones son cada vez más pequeñas hasta que, idealmente, se alcanza un valor de tensión que satisface los objetivos definidos. Al finalizar el proceso, el software muestra una ventana (plano 9.5.6) informando sobre el estado en que el proceso llega a su fin. En este caso, aparece reflejado que la optimización ha finalizado sin converger, además de indicar que el caso que mejor satisface las condiciones definidas es el número 29.

Para comprobar los resultados obtenidos, puede abrirse el apartado nombrado *View Response Graphs*, situado en el apartado de resultados y mostrado en la figura 36.

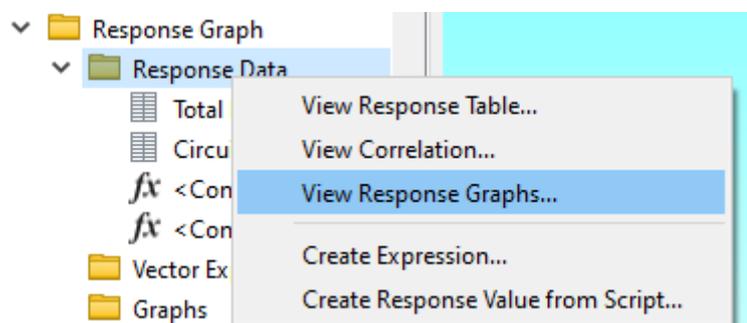


Figura 36. visualización de los resultados de la optimización.

En la ventana emergente, puede comprobarse el valor del desplazamiento total del núcleo móvil para cada valor de la tensión. Analizando estos resultados (plano 9.5.7), se puede concluir que, aunque la convergencia no es completa, el valor mínimo de la tensión se encuentra alrededor de 6.07 V, que afectos prácticos puede aproximarse a 6.1 V. Con este valor, es posible calcular el *safety factor for pick-up*.

$$safety\ factor\ for\ pick - up = \frac{nominal\ voltage}{pick - up\ voltage} = \frac{12}{6.1} = 1.97$$

Ecuación 25. Cálculo del *safety factor for pick-up* a partir de la tensión mínima de activación obtenida por simulación

Para finalizar con este estudio, se recoge en el plano 9.5.8 la representación gráfica de los distintos valores de desplazamiento para cada valor de tensión aplicada.

7.3.3 Influencia de las dimensiones geométricas del núcleo del estátor

Una vez se cierra el interruptor del circuito y comienza a circular corriente por la bobina, se inicia el proceso de magnetización del material ferromagnético. El flujo magnético genera, a través del núcleo del estátor, una fuerza de atracción en el núcleo móvil que provoca su movimiento.

Uno de los factores que intervienen en la magnitud de dicha fuerza y que, por tanto, se podría modificar para mejorar el tiempo de operación de relé, es la sección transversal del núcleo

del estátor. En la propia modelización geométrica del componente ya se tuvo en cuenta dicho factor, pues se realizó un engrosamiento en la zona superior del componente para aumentar la superficie de contacto con el núcleo móvil y mejorar la respuesta dinámica del relé.

Este nuevo estudio, que en JMAG se denominará *Stator_Core_Size*, se plantea con el objetivo de comprender la influencia de las dimensiones geométricas del estátor en el tiempo de operación del relé e intentar realizar una mejora si fuera posible.

Para poder realizar un análisis paramétrico con distintas medidas del diámetro del núcleo del estátor, es necesario seleccionar el parámetro adecuado. Para ello, se acude al apartado denominado *CAD Parameters* y se selecciona la opción de *Select CAD Parameters* en el menú desplegable (figura 37).

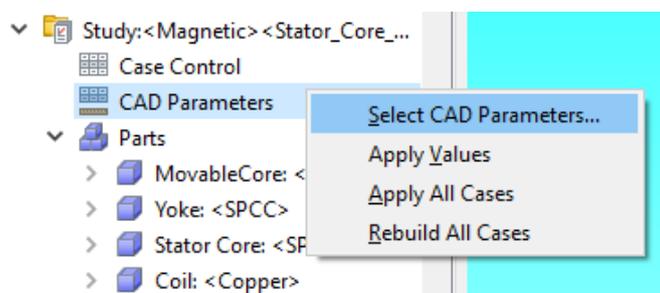


Figura 37. Apertura del menú para seleccionar el diámetro del estátor como parámetro

Al hacer esto, se muestra un mensaje donde debe seleccionarse la opción de *Restore CAD Link*, que abrirá de nuevo el editor geométrico de JMAG con el modelo del relé tal y como se realizó en el apartado 7.1.1. Para poder realizar correctamente la modificación del diámetro del engrosamiento, es necesario cambiar las restricciones aplicadas sobre el perfil, obteniendo el boceto del plano 10.1.

Una vez modificado, si se sitúa el cursor del ratón sobre la medida indicada, aparece resaltada la restricción asociada en la pestaña de *Model Manager* situada a la izquierda de la pantalla (plano 10.2). A continuación, debe abrirse el menú de propiedades de dicha restricción y modificar el nombre para facilitar su modificación en el análisis paramétrico, como se muestra en la figura 38.

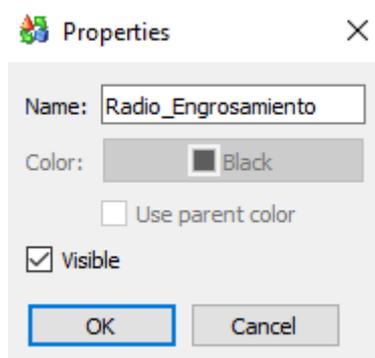


Figura 38. Renombramiento de la restricción asociada al radio del engrosamiento del núcleo del estátor

Llegados a esta punto, puede cerrarse el editor geométrico y actualizar el modelo con las modificaciones realizadas. Ahora, al utilizar la herramienta *Select CAD Parameters*, es posible buscar la restricción denominada *Radio_Engrosamiento* y seleccionarla (plano 10.3). De esta forma, puede abrirse el menú de configuración del análisis paramétrico y crear los distintos casos con sus respectivos valores del radio del estátor.

Para el estudio que se desea realizar, se eligen cuatro valores tanto menores como mayores que el radio del modelo original de 2 mm, así como el caso más extremo en el que todo el estátor tiene la misma sección transversal. El plano 10.4 muestra la configuración del análisis paramétrico.

Análisis de los resultados

Tras ejecutar la simulación de todos los casos creados en el análisis paramétrico, puede procederse al análisis de los resultados obtenidos.

Una vez más, se realiza la representación gráfica del desplazamiento del núcleo móvil respecto al tiempo, que permite obtener una visión sobre el impacto que la sección transversal del núcleo del estátor tiene sobre el tiempo de operación del relé. La figura 39 muestra el gráfico para los distintos valores del radio del engrosamiento.

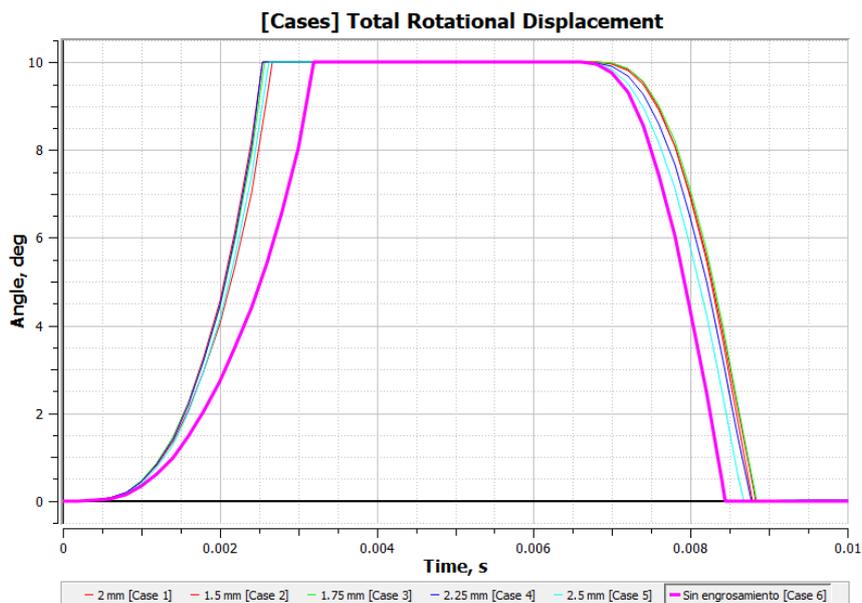


Figura 39. Representación gráfica del desplazamiento del núcleo móvil según el radio del engrosamiento del núcleo del estátor

Analizando este gráfico, se puede comprobar la clara mejora que supone realizar un aumento de la sección transversal del estátor en la zona superior, mostrándose en magenta y con mayor intensidad el desplazamiento correspondiente al núcleo del estátor modelizado como un cilindro macizo. El movimiento en este caso se completa a los 3.197 ms, frente a los 2.55 ms del estudio original, lo que supone una diferencia del 25.37%.

Respecto al valor óptimo que debe tener dicho engrosamiento para obtener la mejor respuesta posible del relé, se observa una diferencia mínima entre los distintos valores seleccionados (plano 10.5). De hecho, se puede observar cómo no es posible realizar un aumento desmesurado de la sección transversal, puesto que un valor de 2 o 2.25 mm tiene un mejor impacto que un radio de 2.5 mm.

Por lo tanto, se puede concluir con esta simulación que un radio de 2 milímetros en la zona superior para un núcleo cilíndrico de 1 milímetro de radio es la medida óptima para reducir el tiempo de respuesta del relé.

7.4 Análisis térmico

Como ya se comentó previamente, realizar un análisis térmico en las condiciones de funcionamiento definidas anteriormente no presenta un gran interés, pues dado el breve tiempo de activación y la magnitud de la corriente que atraviesa la bobina, no se prevén grandes calentamientos.

Sin embargo, aparece la posibilidad de analizar el comportamiento térmico del relé tras ser activado y desactivado varias veces de manera consecutiva. Este estudio puede arrojar unos resultados interesantes que podrían llegar a ser considerados en el diseño y utilización del dispositivo.

Para llevar a cabo este análisis, será necesario definir dos estudios de manera separada (uno magnético y otro térmico) para unirlos posteriormente en la simulación. Para ello, se emplea la herramienta que JMAG denomina *Two-way Coupled Analysis*, que permite la co-simulación de dos análisis que intercambian información de forma cooperativa para obtener los resultados.

En este caso, la correcta combinación del análisis magnético y el térmico permitirá obtener la distribución de temperaturas y la generación de calor en los distintos componentes del relé en función de los efectos del campo magnético y las corrientes parásitas.

A continuación se explicará el proceso que debe seguirse y los resultados obtenidos tras la simulación.

7.4.1 Preparación del estudio

Para evitar problemas con los análisis realizados en los subapartados anteriores, se crea una copia del proyecto y se nombra *Electromagnetic_Relay_ThermalAnalysis*, en el que se eliminarán todos los estudios salvo el caso inicial. Al hacer esto, el proyecto se encuentra en las mismas condiciones que al inicio del apartado 7.2 de este documento.

Para permitir que JMAG pueda importar la información del análisis térmico durante la simulación, es necesario introducir una nueva condición de contorno en el estudio magnético, situada en la categoría de condiciones de unión y denominada *Temperature Distribution*.

Para aplicar correctamente esta condición, debe seleccionarse de la biblioteca situada a la derecha de la pantalla y arrastrarse hasta la pestaña de *Project Manager*. Al hacer esto se abre una nueva ventana que permite modificar los parámetros necesarios. Tras seleccionar los componentes ferromagnéticos del modelo, es importante seleccionar como método de acoplamiento el denominado *Direct Coupling*, que permite al análisis magnético obtener los resultados obtenidos del análisis térmico en cada paso de la simulación. El plano 11.1.1 muestra esta configuración.

Por otro lado, es necesario modificar el tiempo de simulación y la configuración del circuito eléctrico para recrear el funcionamiento repetitivo del relé ya mencionado.

En primer lugar se establece un nuevo modo de funcionamiento del interruptor que rige el comportamiento del circuito eléctrico. En vez de definir los parámetros para una única activación, se establecen los distintos puntos clave del funcionamiento del interruptor que permitirán una activación periódica del relé. Para ello, es importante dejar claro que un valor de 1 cierra el interruptor y un valor de 0 lo abre.

Habiendo aclarado esto, se define la tabla mostrada en el plano 11.1.2. En ella se puede observar cómo, dada la imposibilidad de que un instante de tiempo tenga asociadas dos posiciones del interruptor, se debe dejar una diferencia mínima de tiempo entre la apertura y el cierre. Además, es importante destacar el margen de 5 ms que se deja tras abrirse el circuito para permitir que el núcleo móvil vuelva a su posición inicial. La figura 40 muestra la representación gráfica del funcionamiento del interruptor.

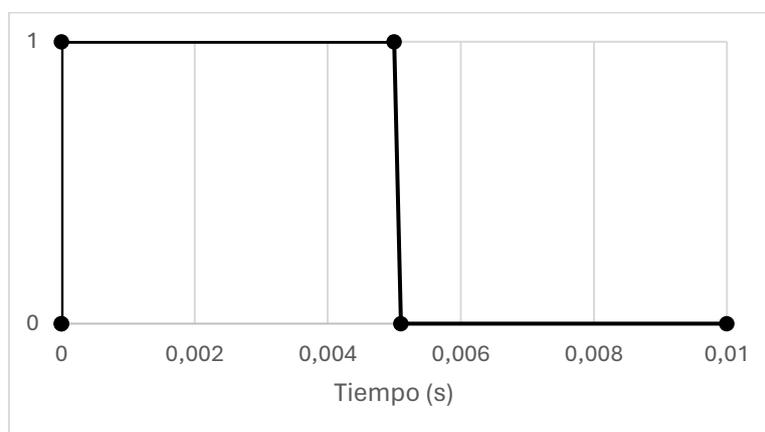


Figura 40. Representación gráfica de los puntos de funcionamiento del interruptor

Tras realizar esta configuración, puede cerrarse el editor del circuito eléctrico y regresar al entorno principal de JMAG. El siguiente paso que debe realizarse es modificar la duración de la simulación para que puedan analizarse el número de activaciones deseadas. En este caso, se desea realizar 10 activaciones consecutivas, por lo que en el apartado de *Step Control* de la ventana de propiedades del estudio se establecen los parámetros mostrados a continuación.

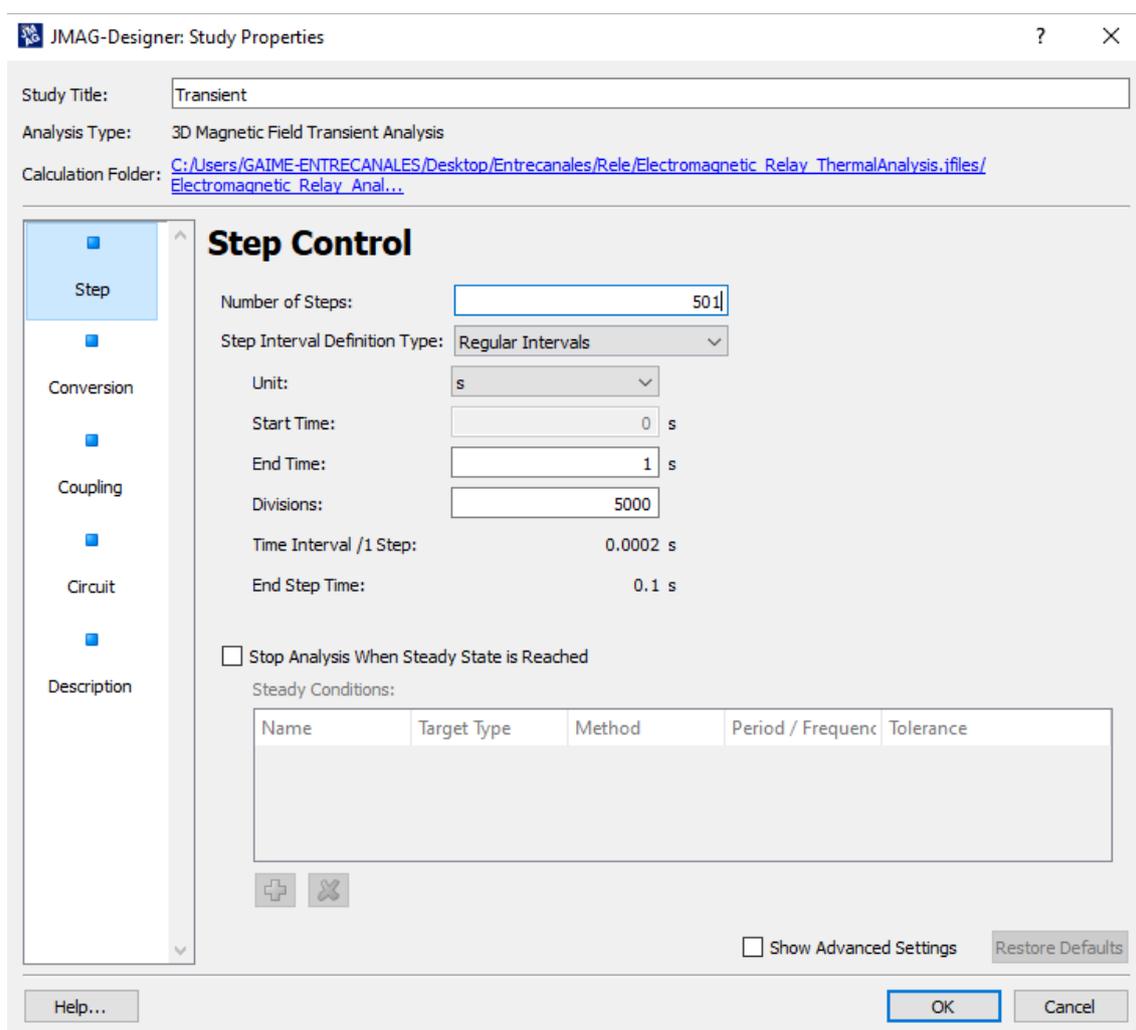


Figura 41. Definición de la nueva duración de la simulación

Por último, debe seleccionarse la opción denominada *Coupling* en la ventana de propiedades (figura superior), y activarse la opción que permite el análisis acoplado (plano 11.1.3).

Una vez configurado el estudio magnético, se debe crear un nuevo estudio. Para ello, se presiona el botón derecho sobre el modelo geométrico en la pestaña de *Project Manager* y se selecciona la opción de *New Study > Transient State Analysis*.

Sobre este nuevo estudio, deben realizarse los siguientes ajustes:

Ajustes de computación

Se ajusta el mismo tiempo de simulación que en el estudio magnético, por lo que se establecen los parámetros mostrados en el plano 11.2.1. Además, debe comprobarse que la opción que permite el análisis acoplado se encuentra activada, al igual que en el análisis magnético. Por último, debe activarse la computación en paralelo con 8 núcleos para acortar el tiempo de simulación.

Asignación de materiales

Al igual que en los estudios magnéticos anteriores, es necesario asignar a cada componente su material correspondiente. Siguiendo el procedimiento ya explicado en el apartado 7.1.3, se selecciona el material adecuado en la ventana de herramientas (*Toolbox*) y se arrastra hasta el componente. En este caso, no es necesario realizar ninguna modificación en los parámetros que JMAG muestra tras asignar el material.

Tras realizar esto, la ventana de *Project Manager* muestra la información mostrada en la figura 42, donde se observa que el material de la bobina es el cobre y el de los componentes ferromagnéticos el acero SPCC.

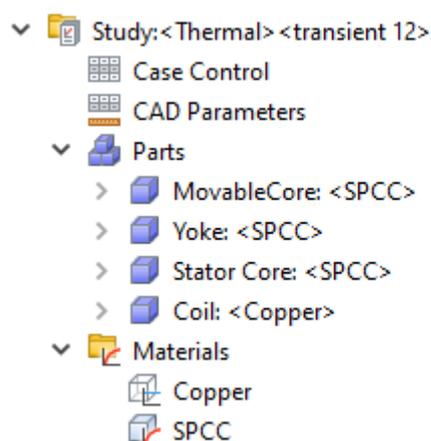


Figura 42. Materiales de los componentes en el estudio térmico

Definición de las condiciones

Para una correcta simulación, es necesario aplicar las siguientes condiciones:

- *Heat Transfer Boundary*: condición necesaria para definir las caras del relé que están en contacto con el aire. Tras seleccionar todas las caras de los componentes ferromagnéticos (salvo las caras del plano de simetría) se establece, según lo mencionado en las condiciones preliminares, una temperatura de referencia en 20 °C y coeficiente de transferencia de calor de 20 W/m²°C
- *Initial Temperature*: establece la temperatura inicial de las partes seleccionadas, en este caso, los componentes ferromagnéticos en los que se desea estudiar el comportamiento térmico. De nuevo, se establece en 20 °C.
- *Natural Boundary*: en un análisis térmico se establece esta condición a aquellas caras o partes en las que el flujo de calor es nulo, en este caso las caras del plano de simetría.
- *Heat Source*: se trata de la condición que debe aplicarse a aquellos componentes que se comportan como generadores de calor según los datos del análisis magnético, en este caso los componentes ferromagnéticos del relé. En cuanto a los parámetros de esta condición, debe marcarse la opción de *Direct Coupling* para que tome correctamente los datos necesarios.

Las imágenes necesarias para comprender la configuración de las condiciones comentadas se encuentran en el apartado 11.2.2 del documento de planos.

Generación del mallado

Dado que el análisis térmico intercambiará la información necesaria con el análisis magnético para obtener la generación de calor, se utiliza el mismo tamaño del mallado en los componentes. De este modo, se añade un elemento de control del tamaño tanto a los componentes ferromagnéticos (0.2 mm) como a la bobina (0.5 mm). El apartado 11.2.3 de los planos muestra la información relativa a las propiedades del mallado.

Una vez se han realizado estos ajustes, se puede realizar la simulación.

7.4.2 Simulación del estudio

Para poder realizar una simulación conjunta de los dos estudios creados, debe crearse un grupo de análisis (*Analysis Group*). Para ello, debe presionarse el botón derecho sobre el nombre del proyecto en la ventana de *Project Manager* y seleccionarse esta opción, como se muestra en la figura 43.

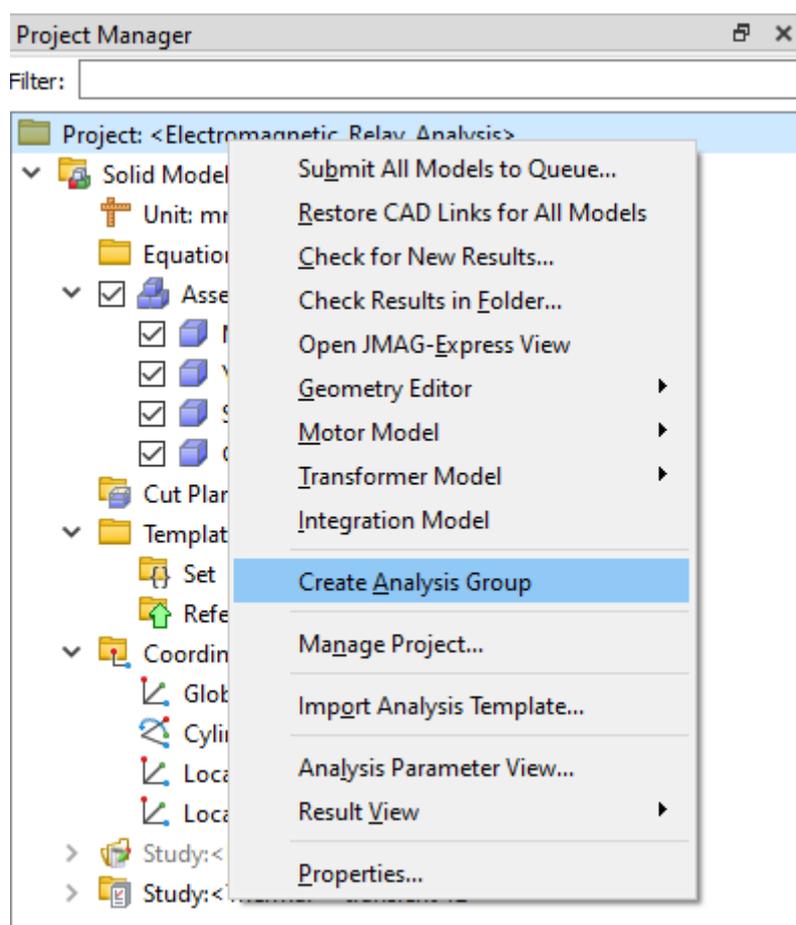


Figura 43. Creación de un grupo de análisis

Al hacer esto, se abre una nueva ventana (plano 11.3.1). En ella, debe seleccionarse la opción de *Direct Coupling* como tipo de cálculo, y seleccionar los dos estudios creados anteriormente.

Tras configurar adecuadamente esta ventana, se puede proceder a la simulación del grupo en el nuevo apartado que ha aparecido en la ventana de *Project Manager* (figura 44). Para ello,

debe seleccionarse la opción de simular el caso activo en el menú desplegable del grupo de análisis.

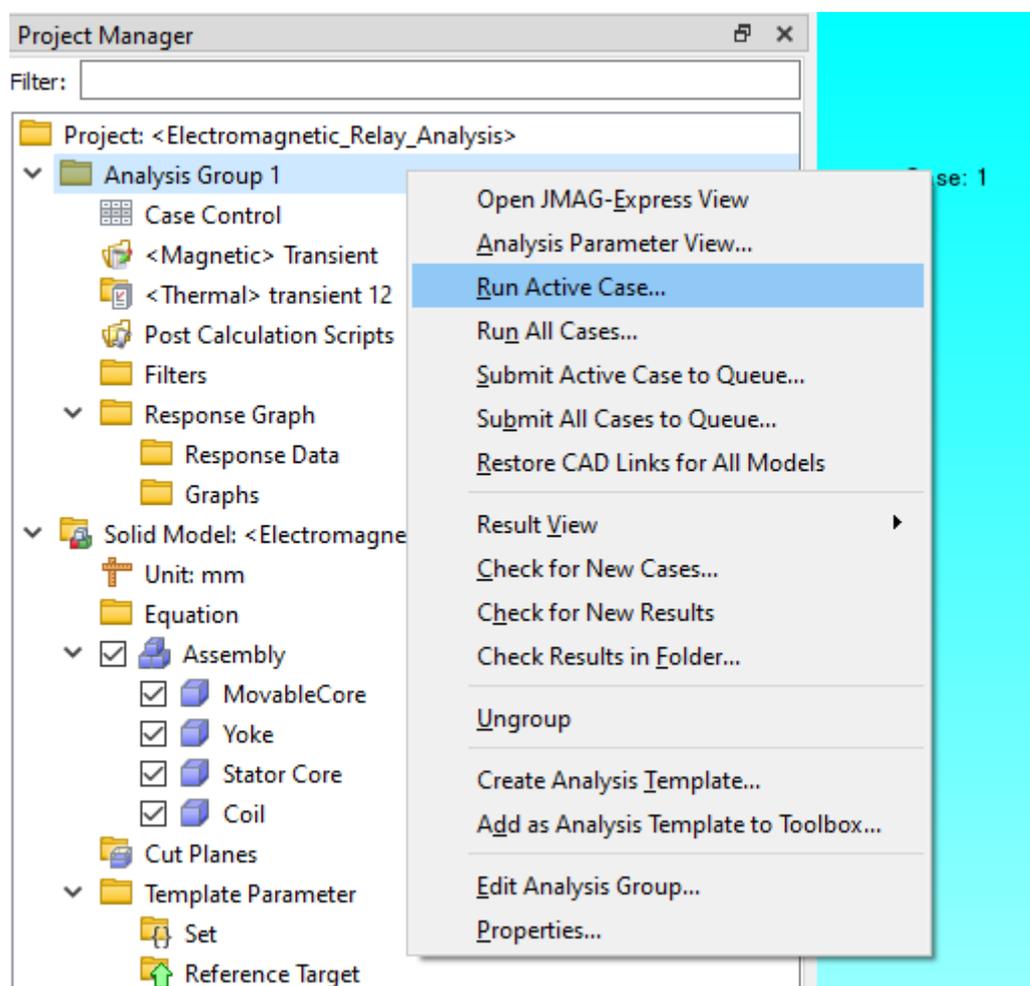


Figura 44. Simulación del grupo de análisis

Dado el aumento del tiempo de simulación por el accionamiento repetitivo del relé y la realización de dos simulaciones de manera simultánea, se trata de un proceso más exigente para la máquina que se traduce en una mayor duración de la simulación. Tras algo más de dos horas, JMAG muestra la ventana del plano 11.3.3 que indica que la simulación se ha completado.

7.4.3 Análisis de los resultados

Una vez se ha completado la simulación, se puede comenzar a analizar los resultados obtenidos. Para ello, se procede de igual forma que en los estudios realizados previamente,

con la excepción de que se deberá acudir a un estudio u otro según la variable que se desee representar.

En primer lugar, se realiza una representación gráfica del desplazamiento angular del núcleo móvil (figura 45). Esto permite comprobar que, tal y como se deseaba, el relé ha sido activado y desactivado 10 veces en el periodo de tiempo simulado. Además, se observa como el margen de 5 ms definido en el funcionamiento del interruptor tras la apertura del circuito permite al núcleo móvil regresar a su posición inicial.

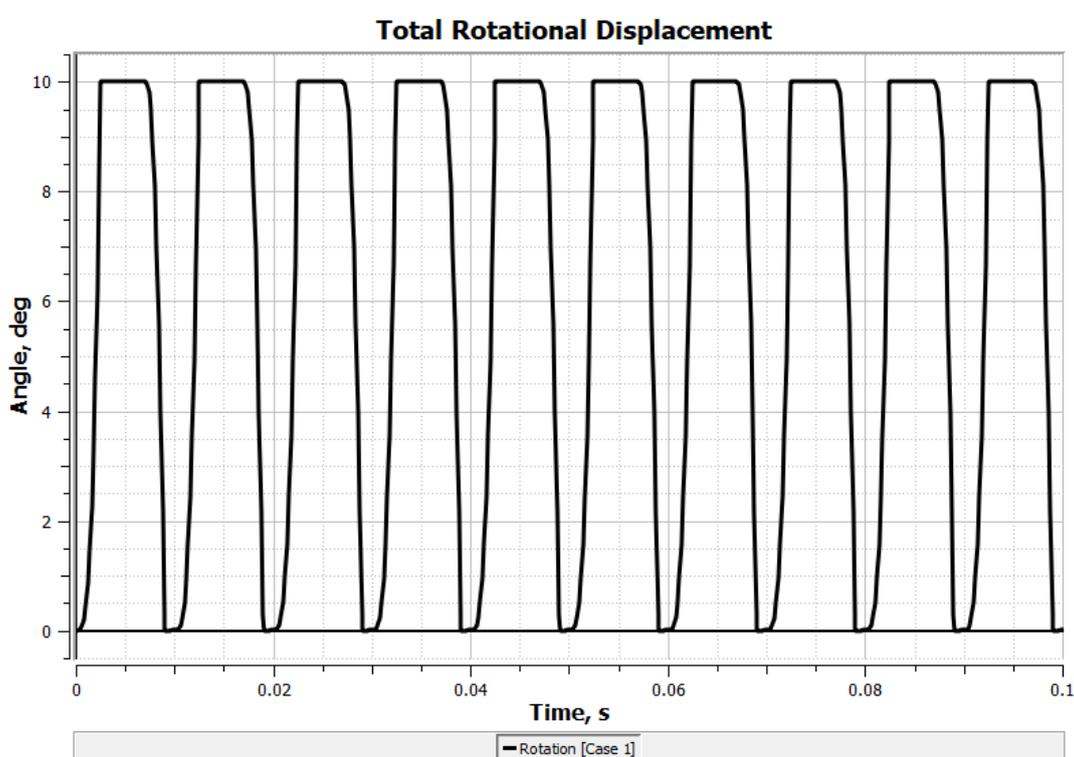


Figura 45. Representación gráfica del desplazamiento del núcleo móvil

Aunque se podría realizar un análisis más detallado de los resultados obtenidos en el estudio magnético, se trata de información muy similar a la obtenida en el apartado 7.2.1 de este documento. El verdadero interés de este estudio reside en el análisis de la respuesta térmica del relé en las condiciones explicadas previamente.

Observando los valores numéricos arrojados por la simulación (*Graphs > Show Table*), se puede afirmar que el cambio producido en la temperatura de los componentes ferromagnéticos es prácticamente despreciable puesto que, tras la última activación de relé,

la temperatura media tan solo ha cambiado de 20 °C a 20.003 °C aproximadamente. A pesar de ello, se realiza un ajuste de la escala de los ejes (figura 46) para representar gráficamente este incremento en la temperatura media de los distintos componentes.

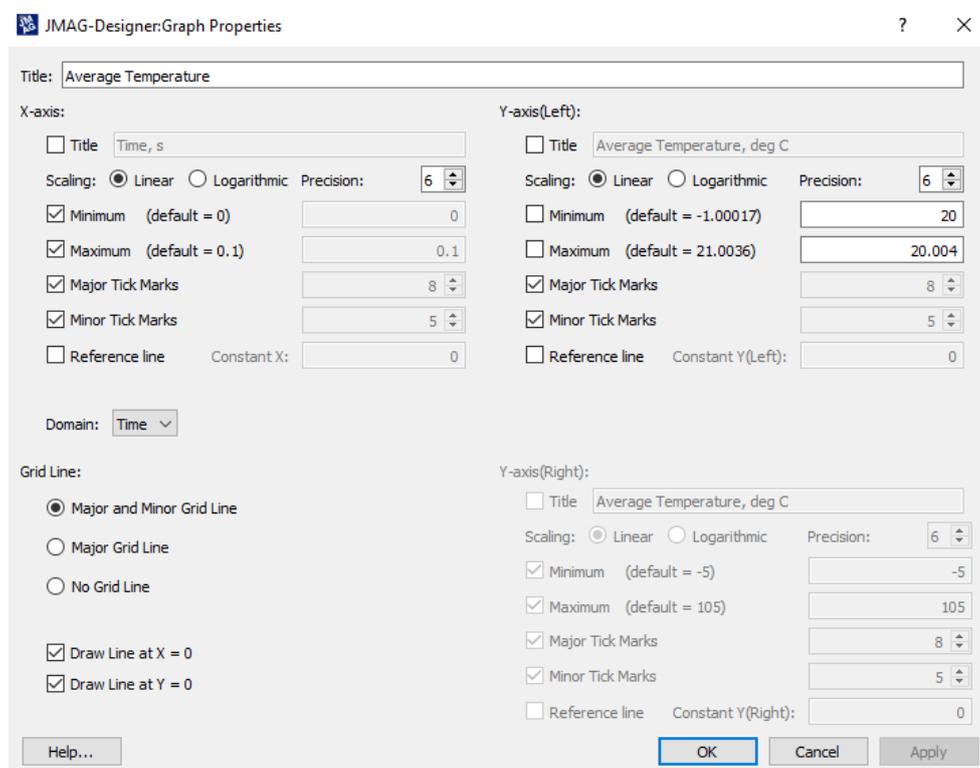


Figura 46. Ajuste de la escala del eje Y para la representación del incremento de la temperatura media

En esta gráfica, mostrada en el plano 11.4.1, se puede observar como el núcleo del estátor es el componente que mayor incremento ha sufrido.

Por otro lado, se recoge en el plano 11.4.2 la representación gráfica de la generación de calor de cada componente. En esta otra gráfica, se puede visualizar el obvio comportamiento cíclico de esta variable, donde de nuevo es el núcleo del estátor el componente que más calor genera.

Analizando estos resultados, se puede concluir que el calentamiento que sufre el relé es prácticamente despreciable, puesto que incluso en una situación extrema en la que es activado hasta 10 veces en una décima de segundo, se produce un incremento de la temperatura media de menos de 0.005 °C.

Aprovechando otras herramientas que JMAG ofrece para la visualización de los resultados, se realizan las representaciones explicadas a continuación.

El plano 11.4.3 muestra el gráfico de contorno con la distribución de la temperatura en el relé. Manteniendo una escala fija entre 20 y 20.005 °C, se captura esta distribución tras la segunda, la sexta y la décima simulación. Con esto, se puede comprobar el calentamiento progresivo ya observado en la representación gráfica de la temperatura media. No debe olvidarse que, aunque por la escala utilizada se vean colores rojos y naranjas, se trata de un calentamiento prácticamente despreciable.

Por último, se recoge en el plano 11.4.4 el gráfico de contorno de la distribución de la generación de calor en los componentes ferromagnéticos correspondientes al último instante de la simulación. Para comprender esta distribución, se muestra en este mismo apartado de los planos un gráfico de contorno con la densidad de corriente en el relé. Analizando ambas representaciones de manera conjunta, se puede observar el evidente impacto que las corrientes parásitas tienen en la disipación de energía en forma de calor.

8 Conclusiones

La simulación con JMAG de la respuesta dinámica del relé electromagnético modelizado ha permitido extraer varias conclusiones de su funcionamiento.

En primer lugar, se ha podido comprobar la correspondencia entre los resultados de la simulación y la teoría explicada en el apartado 3.3.1 en lo que a la energización del relé respecta. En condiciones normales de funcionamiento, la corriente que atraviesa la bobina pasa por distintas fases. Tras un incremento exponencial de la corriente, tiene lugar un periodo de disminución que coincide con el movimiento del núcleo móvil del relé. Una vez este componente completa el rango de movimiento establecido, tiene lugar un nuevo aumento de la corriente hasta alcanzar su valor de régimen estacionario.

Por otro lado, se ha demostrado la importancia de considerar las corrientes parásitas en los distintos componentes ferromagnéticos durante la simulación. Si se desea obtener unos resultados representativos que puedan ser utilizados para el diseño de un relé que cumpla con unas determinadas condiciones, es fundamental considerar este aspecto. De otro modo, la simulación estaría sobreestimando la velocidad de respuesta del relé, que una vez construido e implementado, daría lugar a tiempos de operación considerablemente más lentos.

Adicionalmente, los distintos estudios realizados han permitido analizar ciertos parámetros críticos que pueden afectar al funcionamiento del relé.

La tensión del circuito que alimenta la bobina debe ser considerablemente mayor que la tensión mínima necesaria para la activación del relé (*pick-up voltage*), definiéndose un factor de seguridad de 1.97 en este caso, y que se recomienda no sea inferior de 1.6. Además, se ha comprobado la influencia que esta magnitud tiene sobre el tiempo de operación del relé. Pese al incremento de la corriente con la tensión y sus consecuentes pérdidas caloríficas, se puede obtener una gran mejora de la respuesta dinámica. Sin embargo, sería necesario realizar un análisis térmico y otras pruebas experimentales para determinar la viabilidad del aumento de la tensión de alimentación.

Otro de los grandes factores que pueden determinar las características de la respuesta dinámica del relé son sus dimensiones geométricas. Entre las diversas posibilidades que existen, este estudio ha demostrado la importancia de realizar un aumento de la sección transversal del núcleo del estátor en su zona superior. Tomar esta medida se puede considerar fundamental dada la mejora del 25% en el tiempo de respuesta. En cuanto al diámetro que debe tener este engrosamiento, se puede considerar óptimo en el doble del diámetro del cuerpo del estátor, aunque no se aprecian grandes diferencias con valores próximos.

Por último, la realización del estudio térmico tras diez activaciones consecutivas del relé ha permitido concluir que el calentamiento producido no es de gran relevancia, puesto que el incremento de la temperatura media es de aproximadamente 0.015%. Además, se ha comprobado el efecto negativo que las corrientes parásitas tienen en los componentes ferromagnéticos, puesto que son las zonas con mayor densidad de corriente las que mayor disipación de calor presentan.

Dejando a un lado aspectos técnicos relacionados con la respuesta del relé, es interesante concluir este proyecto considerando el aprendizaje adquirido durante su realización.

En primer lugar, se ha utilizado la potente herramienta de simulación JMAG. Durante la elaboración del trabajo se sucedieron distintas etapas, desde una familiarización con las opciones más básicas del entorno hasta la utilización de herramientas más potentes como el análisis paramétrico o la optimización. Además, se ha concluido el estudio con la utilización del análisis acoplado, que permite realizar un análisis térmico y magnético de manera conjunta. Se trata de una herramienta muy versátil que puede utilizarse con otros fines, como el estudio de un calentamiento térmico con corrientes de alta frecuencia.

Por otro lado, se trata de un proyecto que ha permitido afianzar conocimientos ya adquiridos durante los estudios y aprender otros nuevos relacionados con el funcionamiento de las máquinas eléctricas, desde conceptos básicos del electromagnetismo hasta aspectos más específicos relacionados con la respuesta dinámica y térmica de un relé electromagnético.

9 Relación de figuras

Figura 1. Diferencias en el ciclo de histéresis entre ferromagnéticos blandos y duros	14
Figura 2. Variación de la corriente en la bobina de un relé de DC	20
Figura 3. Menú desplegable para la creación del modelo geométrico	32
Figura 4. Parámetros del View Control para facilitar la realización del boceto	33
Figura 5. Región creada para el diseño del núcleo móvil del relé	34
Figura 6. Rectángulo creado para realizar la hendidura del núcleo móvil	35
Figura 7. Aspecto final del núcleo móvil	36
Figura 8. Boceto inicial del perfil de la armadura del relé	37
Figura 9. Aspecto final de la armadura	38
Figura 10. Operación de revolución en el editor geométrico.....	39
Figura 11. Aspecto final del núcleo del estátor	39
Figura 12. Aspecto final de la bobina.....	40
Figura 13. Ensamblaje final de todos los componentes del relé electromagnético.....	41
Figura 14. Opción de Back To JMAG-Designer.....	41
Figura 15. Menú desplegable para seleccionar el tipo de estudio	42
Figura 16. Configuración del apartado Circuit Settings	44
Figura 17. Configuración del Linear Solver	45
Figura 18. Asignación del cobre como material de la bobina.....	46
Figura 19. Activación de la opción Allow Eddy Currents	47
Figura 20. Parámetros de funcionamiento del interruptor	49
Figura 21. Circuito eléctrico para la conexión de la bobina.....	51
Figura 22. Posibilidades para definir el tipo de desplazamiento en JMAG	52
Figura 23. Apartado de condiciones en la ventana Project Manager	54

Figura 24. configuración de las propiedades del mallado	55
Figura 25. Menú desplegable para comenzar la simulación	56
Figura 26. Creación del grafico del desplazamiento respecto el tiempo	58
Figura 27. Representación gráfica del desplazamiento respecto el tiempo	59
Figura 28. Representación gráfica de la variación de la corriente con el tiempo	60
Figura 29. Instante en el que la corriente deja de decrecer	60
Figura 30. Nuevo caso para el estudio de la respuesta dinámica sin considerar las corrientes parásitas.....	63
Figura 31. Comparativa de la corriente eléctrica en la bobina según la consideración o no de las corrientes parásitas	64
Figura 32. Creación del estudio para el análisis de la tensión de alimentación	65
Figura 33. Selección del parámetro de la tensión de la fuente de alimentación	66
Figura 34. Comparación del desplazamiento del núcleo móvil según el valor de la tensión de alimentación	67
Figura 35. Selección de la herramienta de optimización.....	69
Figura 36. visualización de los resultados de la optimización.	71
Figura 37. Apertura del menú para seleccionar el diámetro del estátor como parámetro	72
Figura 38. Renombramiento de la restricción asociada al radio del engrosamiento del núcleo del estátor	73
Figura 39. Representación gráfica del desplazamiento del núcleo móvil según el radio del engrosamiento del núcleo del estátor.....	74
Figura 40. Representación gráfica de los puntos de funcionamiento del interruptor	76
Figura 41. Definición de la nueva duración de la simulación	77
Figura 42. Materiales de los componentes en el estudio térmico	78
Figura 43. Creación de un grupo de análisis	80

Figura 44. Simulación del grupo de análisis.....81

10 Relación de ecuaciones

Ecuación 1. Ley de Gauss para el campo eléctrico en forma integral	10
Ecuación 2. Ley de Gauss para el campo eléctrico en forma diferencial	10
Ecuación 3. Ley de Gauss para el campo magnético en forma integral	10
Ecuación 4. Ley de Gauss para el campo magnético en forma diferencial	11
Ecuación 5. Ley de Faraday-Lenz en forma integral	11
Ecuación 6. Ley de Faraday-Lenz en forma diferencial.....	11
Ecuación 7. Ley de Ampère-Maxwell en forma integral.....	11
Ecuación 8. Ley de Ampère-Maxwell en forma diferencial	11
Ecuación 9. Cálculo de la magnetización	12
Ecuación 10. Relación entre el campo magnético, el vector de magnetización y la inducción magnética.....	12
Ecuación 11. Susceptibilidad magnética χ	13
Ecuación 12. Cálculo integral del área encerrada en el ciclo de histéresis	15
Ecuación 13. Ecuación de Steinmetz para el cálculo de las pérdidas por histéresis	15
Ecuación 14. Cálculo de las pérdidas por corrientes parásitas.....	16
Ecuación 15. Fuerza magnetomotriz generada por la bobina.....	18
Ecuación 16. Balance de energías en el primer en el intervalo $(0, t_1)$ de la figura 2.....	20
Ecuación 17. Energía suministrada por la fuente de alimentación	20
Ecuación 18. Energía disipada por la resistencia de la bobina	20
Ecuación 19. Expresión para calcular el safety factor for pick-up.....	21
Ecuación 20. Relación entre el tiempo de análisis y los pasos de la simulación	43
Ecuación 21. Expresión logarítmica de funcionamiento del diodo	50
Ecuación 22. Ecuación del movimiento de rotación en JMAG	53

Ecuación 23. Par de torsión	53
Ecuación 24. Momento de inercia	53
Ecuación 25. Cálculo del safety factor for pick-up a partir de la tensión mínima de activación obtenida por simulación	71

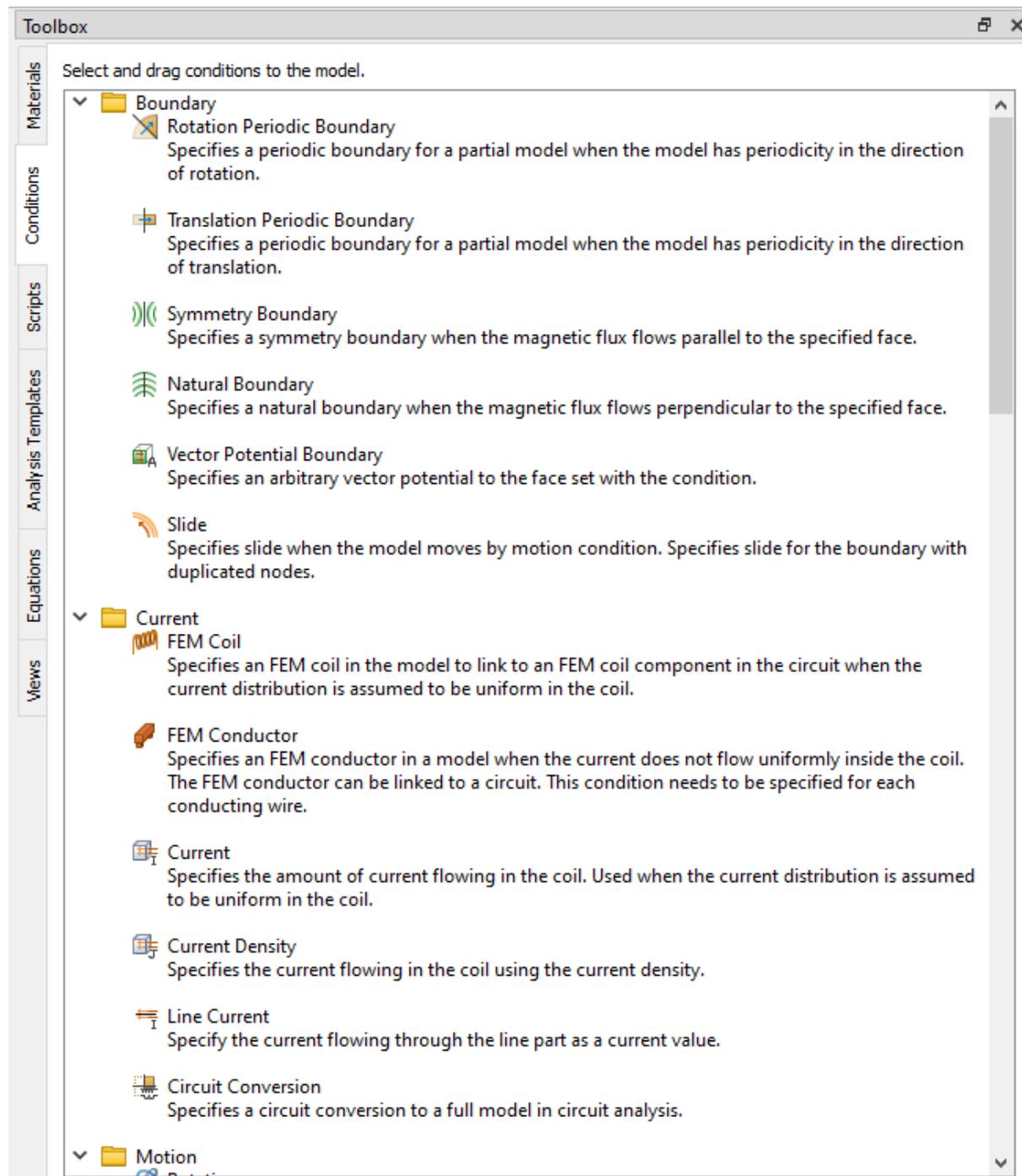
ANEXOS

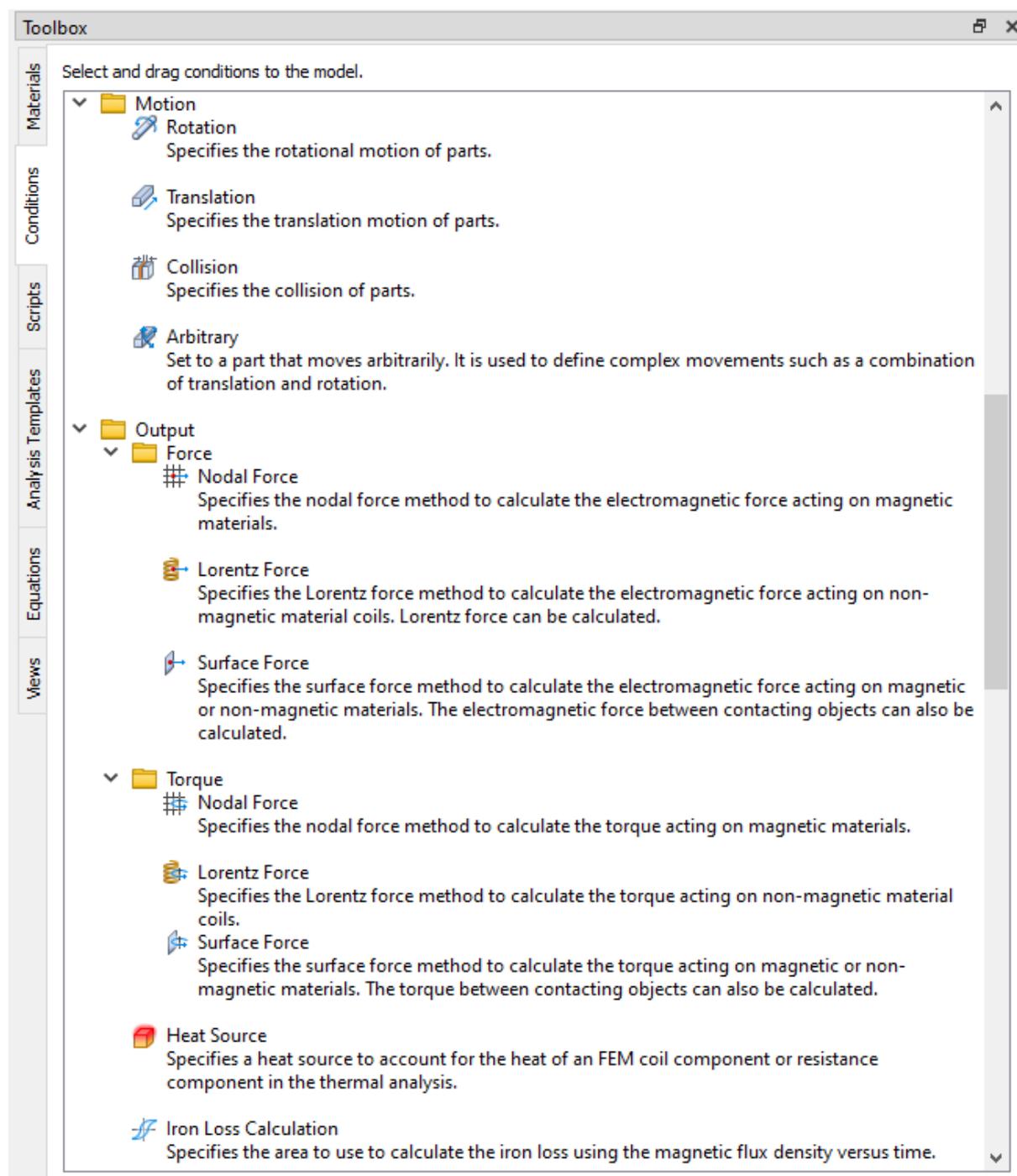
ÍNDICE ANEXOS

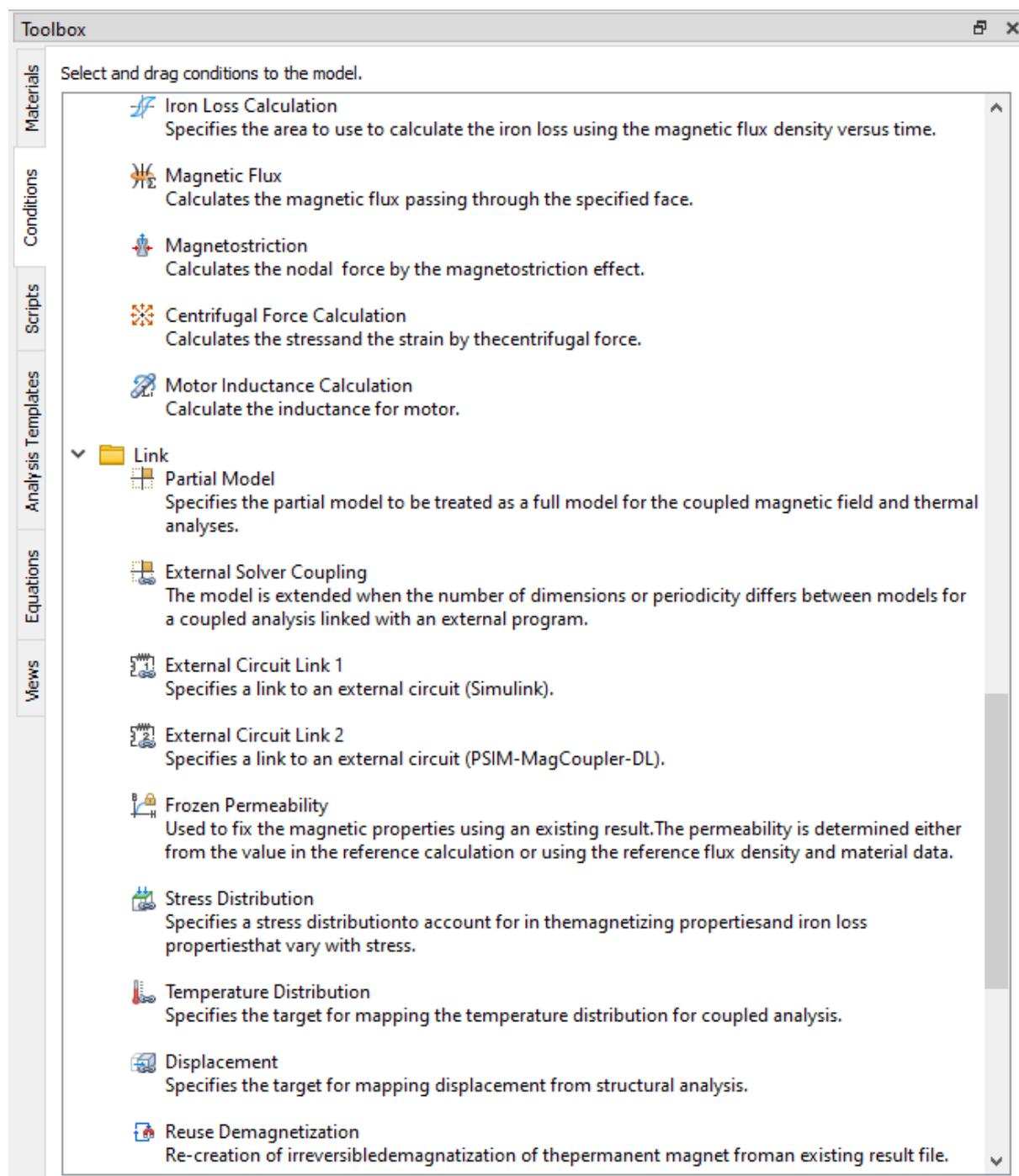
1	Biblioteca de condiciones de JMAG	94
1.1	Análisis magnético	94
1.2	Análisis térmico.....	98
2	Propiedades de los materiales utilizados	100
2.1	Cobre.....	100
2.1.1	Propiedades magnéticas.....	100
2.1.2	Propiedades eléctricas	101
2.1.3	Propiedades mecánicas	102
2.1.4	Propiedades térmicas	103
2.2	Acero SPCC.....	104
2.2.1	Propiedades magnéticas.....	104
2.2.2	Propiedades eléctricas	105
2.2.3	Propiedades mecánicas	106
2.2.4	Propiedades térmicas	107

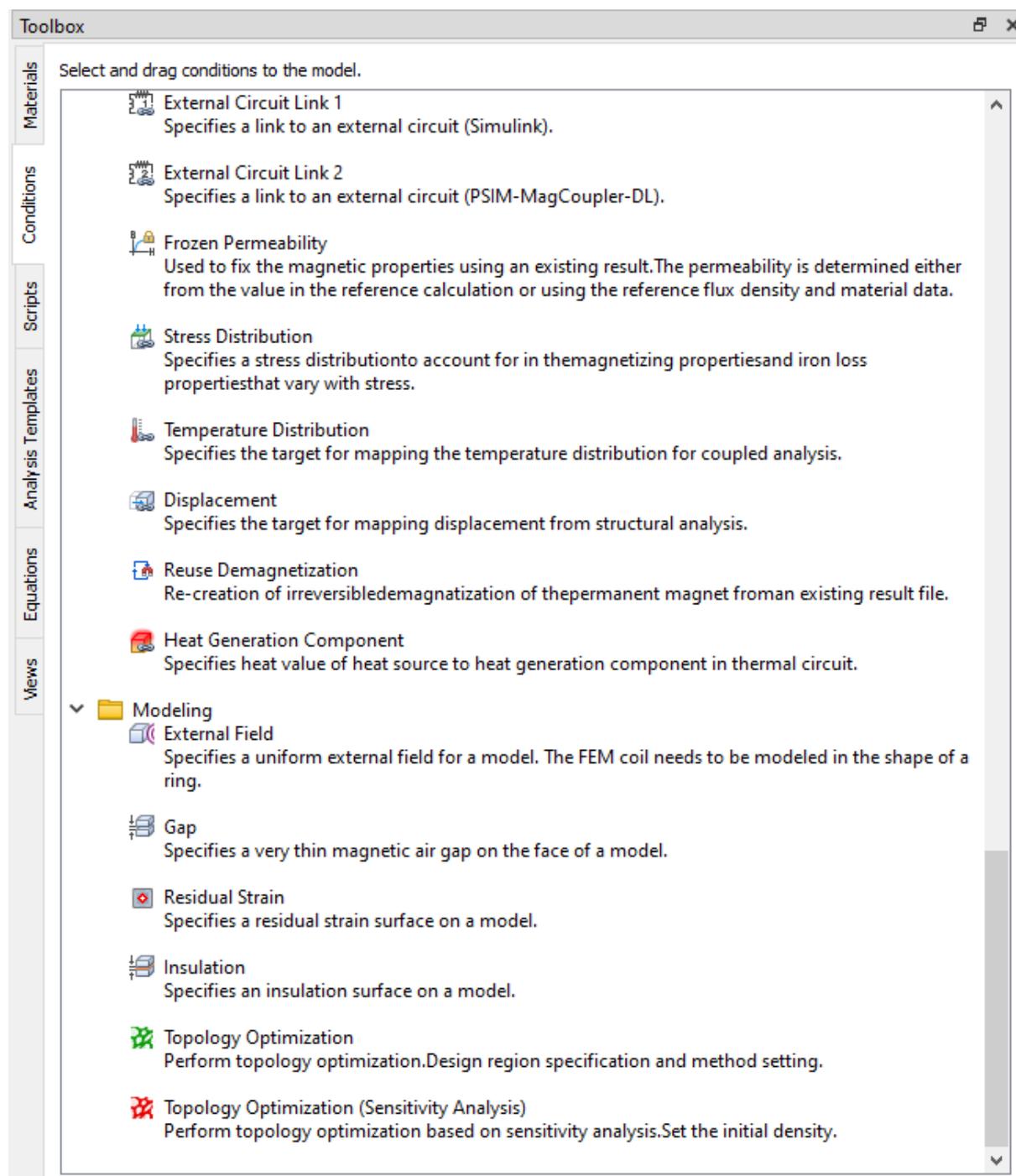
1 Biblioteca de condiciones de JMAG

1.1 Análisis magnético

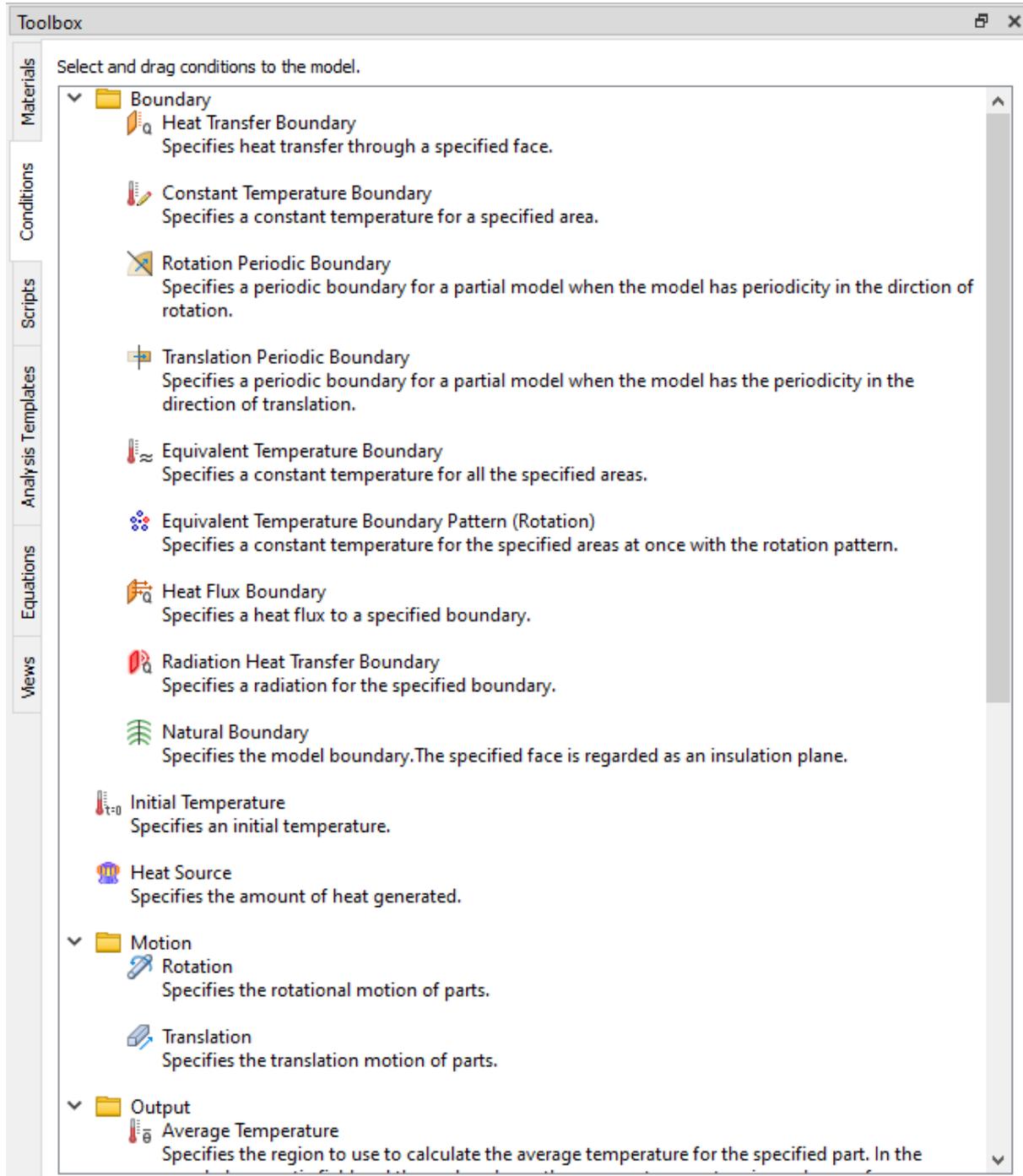


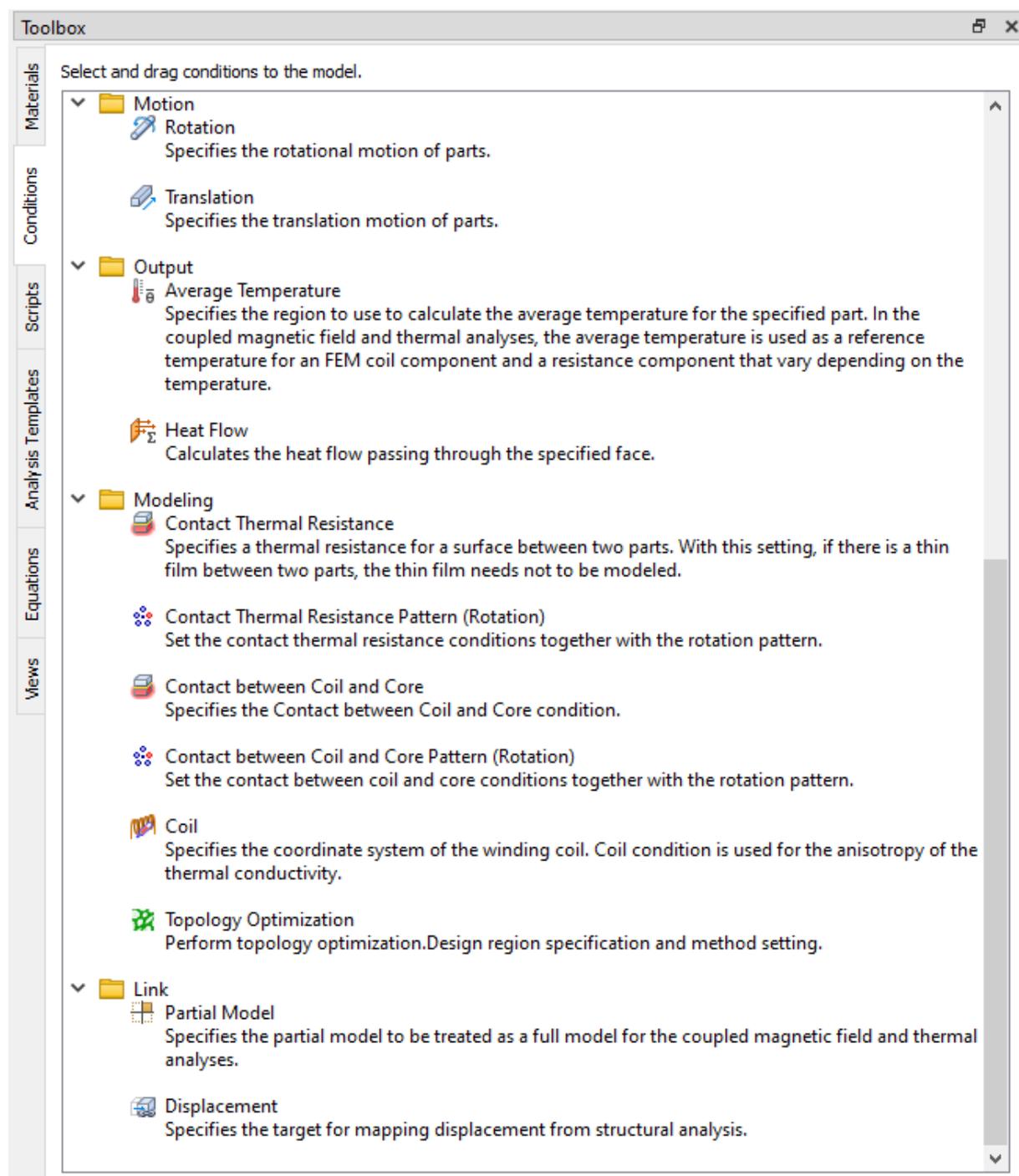






1.2 Análisis térmico

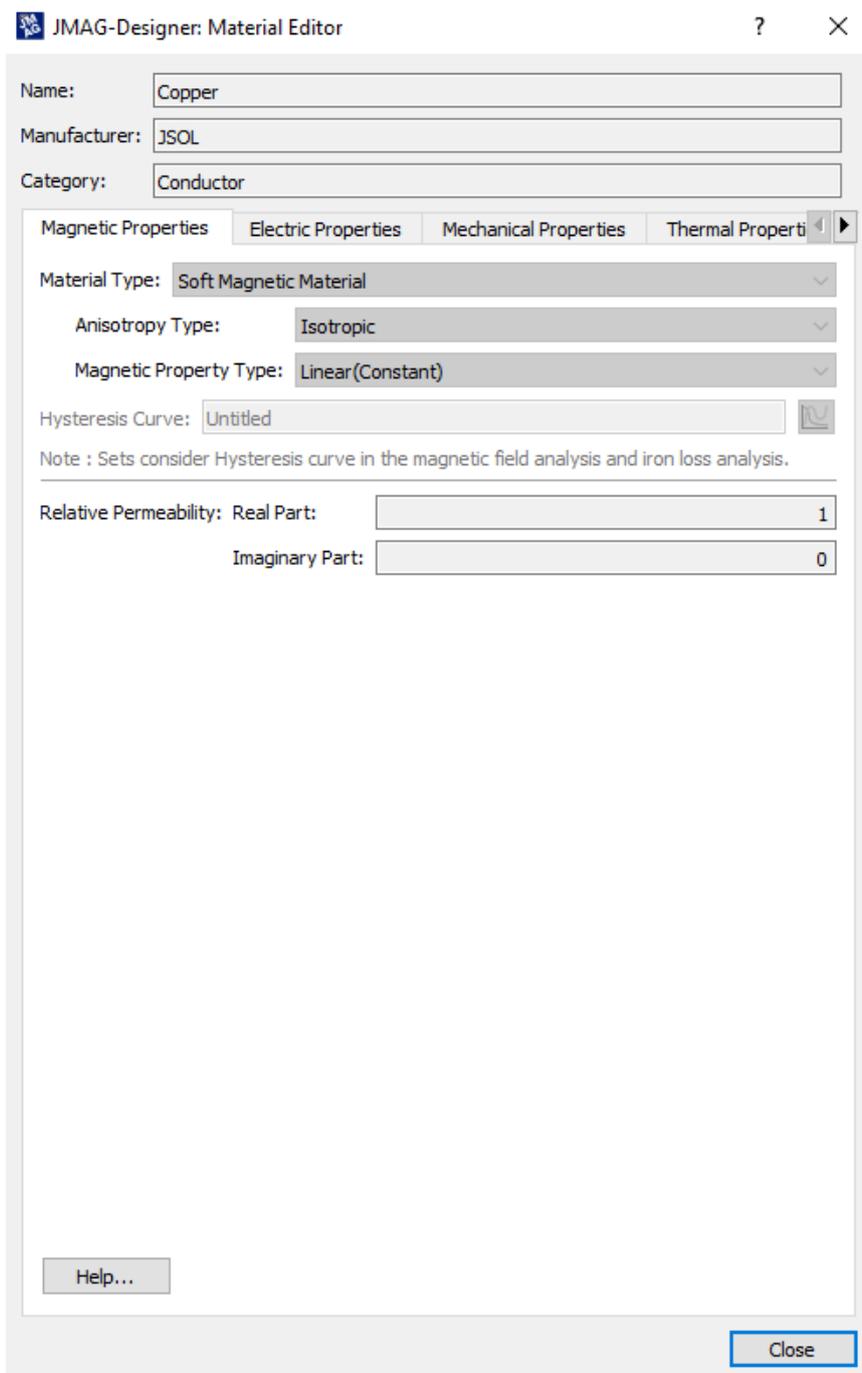




2 Propiedades de los materiales utilizados

2.1 Cobre

2.1.1 Propiedades magnéticas



The screenshot shows the 'JMAG-Designer: Material Editor' window. The 'Name' field is set to 'Copper', 'Manufacturer' is 'JSOL', and 'Category' is 'Conductor'. The 'Magnetic Properties' tab is active, showing 'Material Type' as 'Soft Magnetic Material', 'Anisotropy Type' as 'Isotropic', and 'Magnetic Property Type' as 'Linear(Constant)'. The 'Hysteresis Curve' is 'Untitled'. A note states: 'Note : Sets consider Hysteresis curve in the magnetic field analysis and iron loss analysis.' The 'Relative Permeability' is set to 'Real Part: 1' and 'Imaginary Part: 0'. There are 'Help...' and 'Close' buttons at the bottom.

JMAG-Designer: Material Editor

Name: Copper

Manufacturer: JSOL

Category: Conductor

Magnetic Properties | Electric Properties | Mechanical Properties | Thermal Properties

Material Type: Soft Magnetic Material

Anisotropy Type: Isotropic

Magnetic Property Type: Linear(Constant)

Hysteresis Curve: Untitled

Note : Sets consider Hysteresis curve in the magnetic field analysis and iron loss analysis.

Relative Permeability: Real Part: 1

Imaginary Part: 0

Help...

Close

2.1.2 Propiedades eléctricas

JMAG-Designer: Material Editor

Name:

Manufacturer:

Category:

Magnetic Properties | **Electric Properties** | Mechanical Properties | Thermal Properties

Conductivity

Conductivity Type:

Constant

Permittivity

Permittivity Type:

Real Part:

Imaginary Part:

Dielectric Strength

Help...

Close

2.1.3 Propiedades mecánicas

JMAG-Designer: Material Editor

Name:

Manufacturer:

Category:

Magnetic Properties | Electric Properties | **Mechanical Properties** | Thermal Properties

Anisotropy Type:

Mechanical Property Type:

Density: Constant

kg/m³

Young's Modulus: MPa

Shear Modulus: MPa

Poisson's Ratio:

Thermal Expansion: 1/deg C

Reference Temperature: deg C

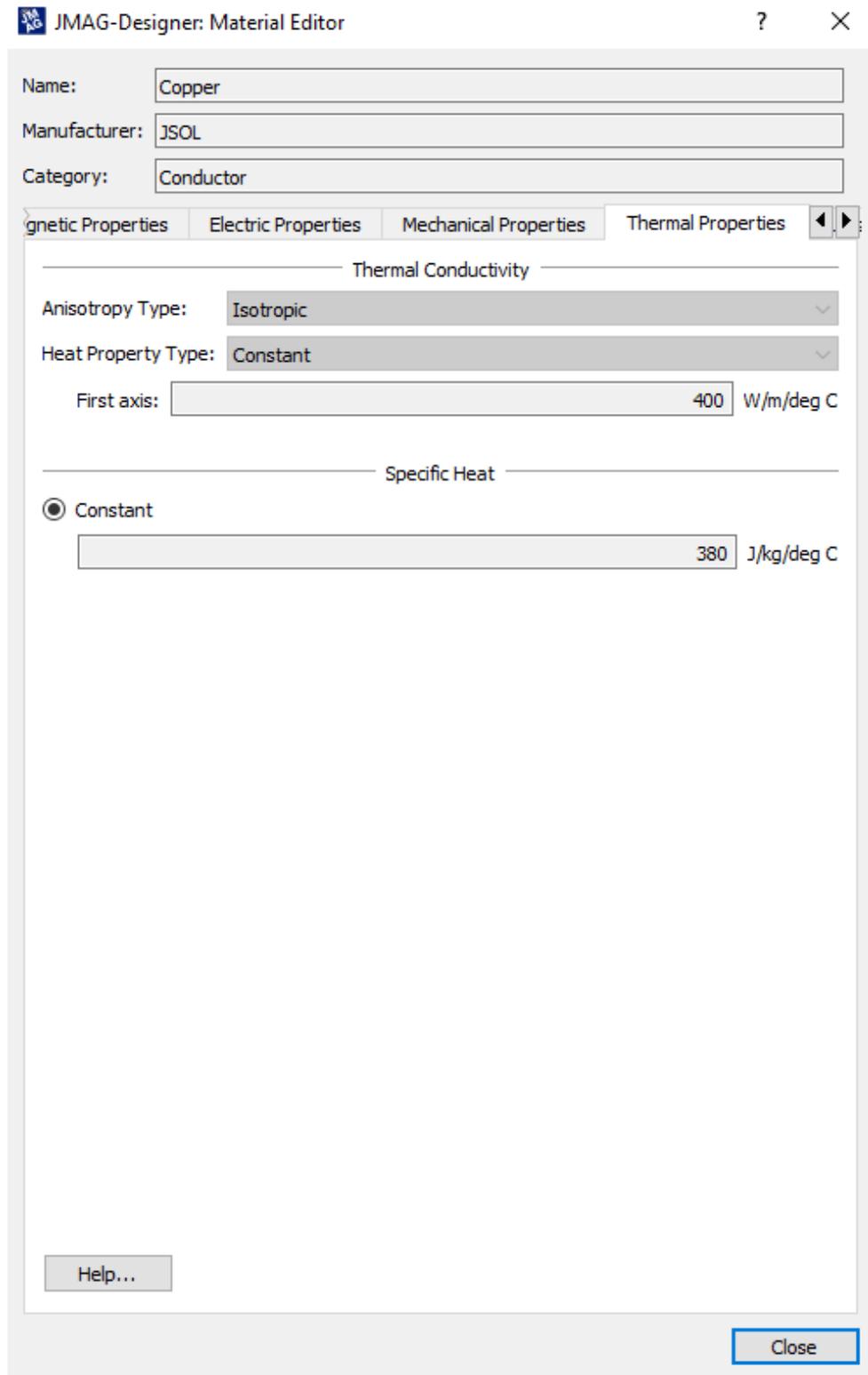
Magnetostriction Type:

B-ε Curve: 

Help...

Close

2.1.4 Propiedades térmicas



The image shows a screenshot of the "JMAG-Designer: Material Editor" dialog box. The window title is "JMAG-Designer: Material Editor" with a question mark and a close button. The dialog contains the following fields and sections:

- Name:** Copper
- Manufacturer:** JSOL
- Category:** Conductor
- Property Tabs:** Magnetic Properties, Electric Properties, Mechanical Properties, Thermal Properties (selected).
- Thermal Conductivity Section:**
 - Anisotropy Type:** Isotropic
 - Heat Property Type:** Constant
 - First axis:** 400 W/m/deg C
- Specific Heat Section:**
 - Constant:** (selected)
 - Value:** 380 J/kg/deg C
- Buttons:** Help... (bottom left), Close (bottom right).

2.2 Acero SPCC

2.2.1 Propiedades magnéticas

JMAG-Designer: Material Editor

Name: SPCC

Manufacturer: JSOL

Category: Steel for Structure

Magnetic Properties | Electric Properties | Mechanical Properties | Thermal Properties

Material Type: Soft Magnetic Material

Anisotropy Type: Isotropic

Magnetic Property Type: B-H Curve

Residual Strain Magnetic Correction (Edge / Face) Untitled

Residual Strain Permeability Correction (Region) Untitled

Decay Constant α : 0

Extrapolation Method: Permeability of vacuum

Hysteresis Curve: Untitled

Note : Sets consider Hysteresis curve in the magnetic field analysis and iron loss analysis.

Flux Density vs Magnetic Field

Magnetic Field (A/m)	Flux Density (T)
0	0
1000	1.4
2000	1.5
4000	1.6
6000	1.65
8000	1.68
10000	1.7
12000	1.72
14000	1.75

Help... Close

2.2.2 Propiedades eléctricas

JMAG-Designer: Material Editor

Name: SPCC

Manufacturer: JSOL

Category: Steel for Structure

Magnetic Properties | **Electric Properties** | Mechanical Properties | Thermal Properties

Conductivity

Conductivity Type: Electric Resistivity

Constant

1.34e-07 ohm m

Permittivity

Permittivity Type: Constant

Real Part: 0

Imaginary Part: 0

Dielectric Strength

0 V/m

Help...

Close

2.2.3 Propiedades mecánicas

JMAG-Designer: Material Editor

Name: SPCC

Manufacturer: JSOL

Category: Steel for Structure

Magnetic Properties | Electric Properties | Mechanical Properties | Thermal Properties

Anisotropy Type: Isotropy

Mechanical Property Type: Linear

Density: Constant

7830 kg/m³

Young's Modulus: 213200 MPa

Shear Modulus: 0 MPa

Poisson's Ratio: 0.26

Thermal Expansion: 0 1/deg C

Reference Temperature: 20 deg C

Magnetostriction Type: Isotropic

B-ε Curve: Untitled

Help...

Close

2.2.4 Propiedades térmicas

JMAG-Designer: Material Editor

Name: SPCC

Manufacturer: JSOL

Category: Steel for Structure

agnetic Properties Electric Properties Mechanical Properties Thermal Properties

Thermal Conductivity

Anisotropy Type: Isotropic

Heat Property Type: Constant

First axis: 64.6 W/m/deg C

Specific Heat

Constant

461 J/kg/deg C

Help...

Close

PLANOS

ÍNDICE PLANOS

1	Modelización geométrica del relé	114
1.1	Preferencias del editor geométrico de JMAG-Designer	114
1.2	Unidades de longitud del sistema y configuración de la cuadrícula	115
1.3	Opción de <i>Create Part</i> del editor geométrico	115
1.4	Restricciones disponibles para una línea	116
1.5	Perfil inicial del núcleo móvil	117
1.6	Redondeado de la esquina superior (<i>Create Fillet</i>)	117
1.7	Región del perfil del núcleo móvil	118
1.8	Redondeado de la esquina del núcleo móvil (<i>Edge Fillet</i>)	119
1.9	Creación de un boceto sobre una superficie	119
1.10	Operación de <i>Extrude Cut</i> para realizar un corte en el núcleo móvil	120
1.11	Restricción de distancia para la posición relativa de la armadura	120
1.12	Región con el perfil de la armadura	121
1.13	Boceto para el orificio de la base de la armadura	121
1.14	Operación de <i>Extrude Cut</i> para el orificio de la armadura	122
1.15	Boceto inicial para la modelización del núcleo del estátor	123
1.16	Perfil acotado del núcleo del estátor	124
1.17	Operación de revolución para la construcción del núcleo del estátor	124
1.18	Boceto acotado para la modelización de la bobina	125
1.19	Operación de revolución para la construcción de la bobina	126
1.20	Opción de <i>Update Model</i> tras cerrar el editor geométrico	126
2	Ajustes previos de computación	127
2.1	<i>Step Control</i>	127

2.2	<i>Full Model Conversion</i>	128
2.3	<i>Circuit Settings</i>	129
2.4	Configuración de la opción <i>Parallel</i> para acelerar la simulación.....	130
2.5	<i>Linear Solver</i>	130
2.6	<i>Nonlinear Calculation</i>	131
3	Asignación de materiales.....	132
3.1	Biblioteca de materiales de JMAG	132
3.2	Acero SPCC de la base de datos de JSOL	133
4	Creación del circuito eléctrico	134
4.1	Opción de añadir circuito o <i>Add Circuit</i>	134
4.2	Componentes utilizados en el circuito eléctrico.....	135
4.2.1	Fuente de alimentación	135
4.2.2	Interruptor	135
4.2.3	FEM Coil	135
4.2.4	Diodo.....	135
4.2.5	Toma de tierra	136
4.3	Configuración de la fuente de alimentación.....	136
4.4	Configuración del FEM Coil	137
4.5	Configuración del diodo.....	137
5	Definición de las condiciones.....	138
5.1	Condición de simetría o <i>Symmetry Boundary</i>	138
5.2	Condición de par o <i>Torque Nodal Force</i>	138
5.3	Definición de la ecuación de movimiento	139
5.4	Condición de <i>FEM Coil</i>	140
6	Generación del mallado.....	141

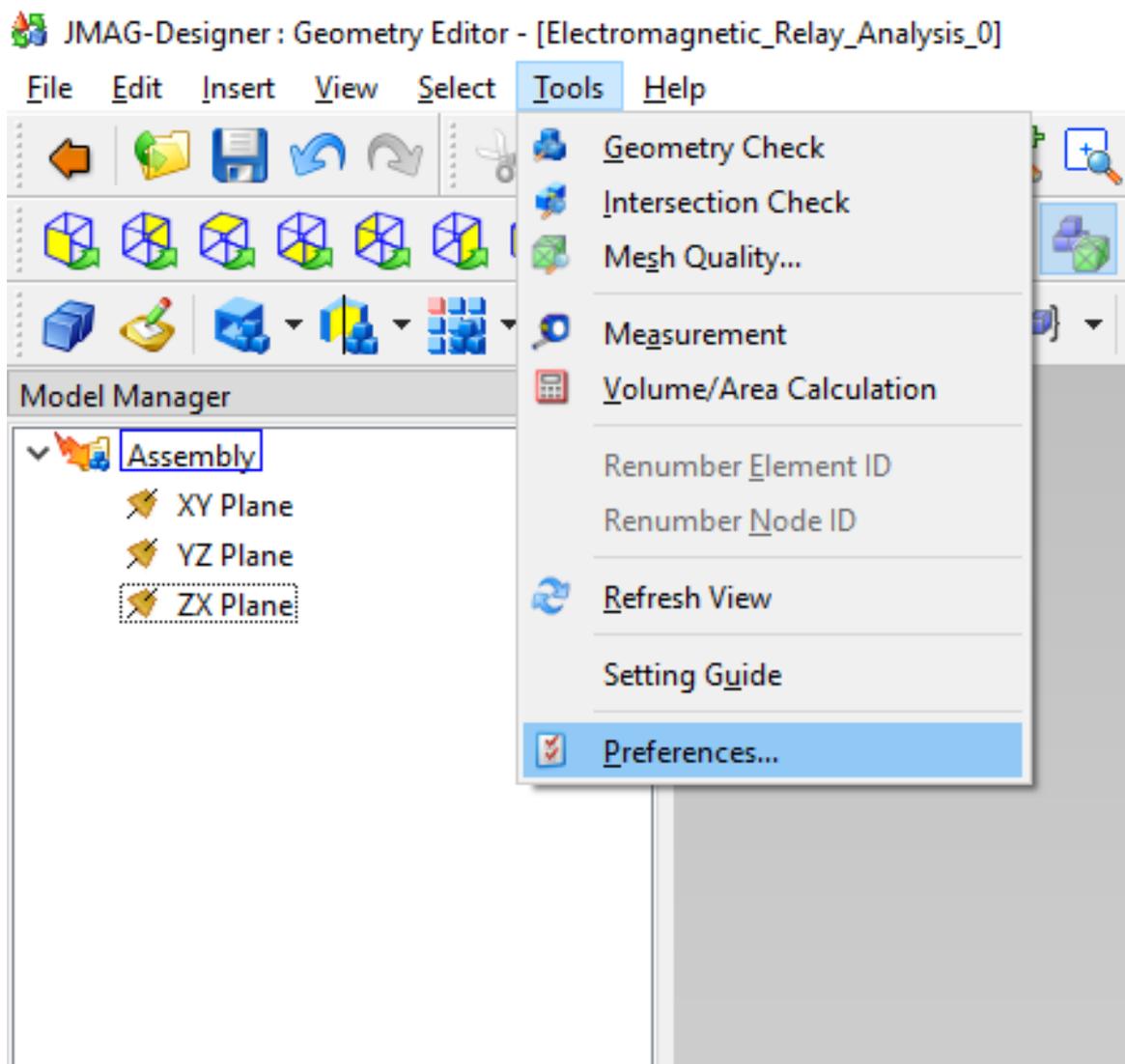
6.1	Ajustes básicos del mallado	141
6.2	Control del tamaño del mallado	142
6.2.1	Componentes ferromagnéticos	142
6.2.2	Bobina	142
7	Primera simulación	143
7.1	Ventana informativa sobre el estado de la simulación	143
7.2	Ventana emergente tras finalizar la simulación	144
7.3	Resultados obtenidos	145
7.3.1	Gráfico tipo <i>Contour Plot</i> de la densidad de flujo magnético	145
7.3.2	Grafica tipo <i>Flux Lines</i> para las líneas de flujo magnético	148
7.3.3	Gráfico tipo <i>Graph</i> para la variación del par con el tiempo	149
8	Estudio de la influencia de las corrientes parásitas.....	150
8.1	Apertura del menú de configuración del análisis paramétrico	150
8.2	Ventana para la configuración del análisis paramétrico	151
8.3	Gráfico del flujo magnético a través de la bobina	151
8.4	Gráfico tipo <i>Contour Plot</i> para la comparación de la densidad de flujo magnético en distintos instantes.....	152
9	Estudio de la influencia de la tensión de alimentación	155
9.1	Gráfico comparativo de las pérdidas por efecto Joule en la bobina	155
9.2	Gráfico comparativo del flujo magnético a través de la bobina.....	156
9.3	Gráfico comparativo del par de rotación en el núcleo móvil	156
9.4	Gráfico tipo <i>Contour Plot</i> para la comparación de la densidad de flujo magnético según la tensión de alimentación	157
9.5	Cálculo de la tensión mínima de activación del relé (<i>pick-up voltage</i>)	159
9.5.1	Análisis paramétrico para definir el rango de valores de la optimización	159

9.5.2	Definición del rango de valores para la parametrización de la tensión	160
9.5.3	Selección de las variables para las funciones objetivo de la simulación	160
9.5.4	Definición de las funciones objetivo de la optimización	162
9.5.5	Configuración de las opciones de la optimización.....	163
9.5.6	Ventana mostrada tras finalizar la optimización	163
9.5.7	Resultados de la optimización	164
9.5.8	Valores del desplazamiento angular para cada valor de tensión	164
10	Estudio de la influencia de las dimensiones geométricas del núcleo del estátor	165
10.1	Boceto con las nuevas restricciones necesarias para el estudio	165
10.2	Restricción asociada al radio del engrosamiento del estátor.....	166
10.3	Selección del radio del engrosamiento en el apartado <i>Select CAD Parameters</i> ...	167
10.4	Configuración del análisis paramétrico	167
10.5	Representación gráfica del desplazamiento del núcleo móvil para cada valor distinto del radio	168
11	Análisis térmico.....	169
11.1	Preparación del estudio magnético	169
11.1.1	Condición para la distribución de temperaturas	169
11.1.2	Configuración del interruptor del circuito eléctrico	170
11.1.3	Activación de la opción <i>Direct Coupling</i>	170
11.2	Preparación del estudio térmico	171
11.2.1	Ajustes previos de computación.....	171
11.2.2	Definición de las condiciones.....	172
11.2.3	Generación del mallado	174
11.3	Simulación del estudio	175
11.3.1	Configuración del grupo de análisis.....	175

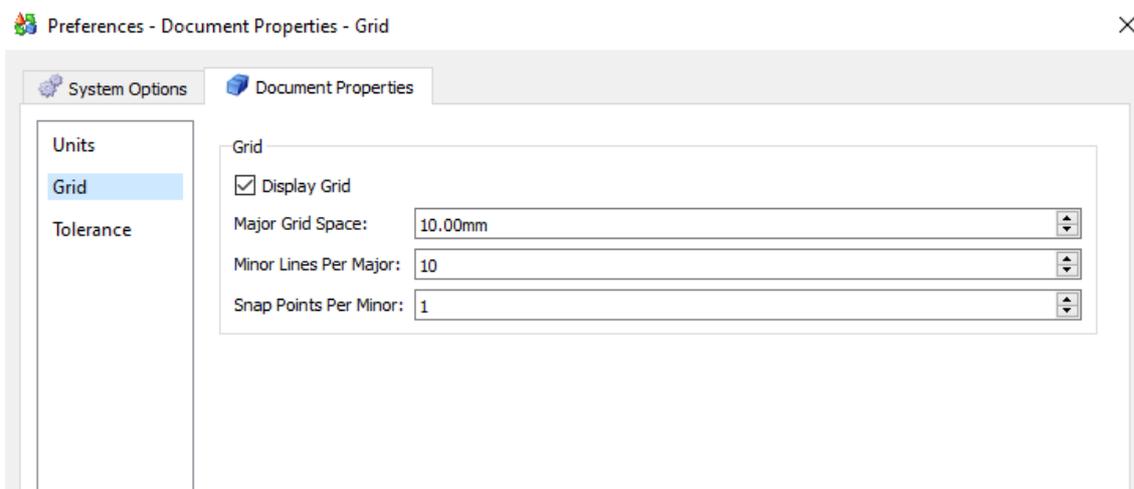
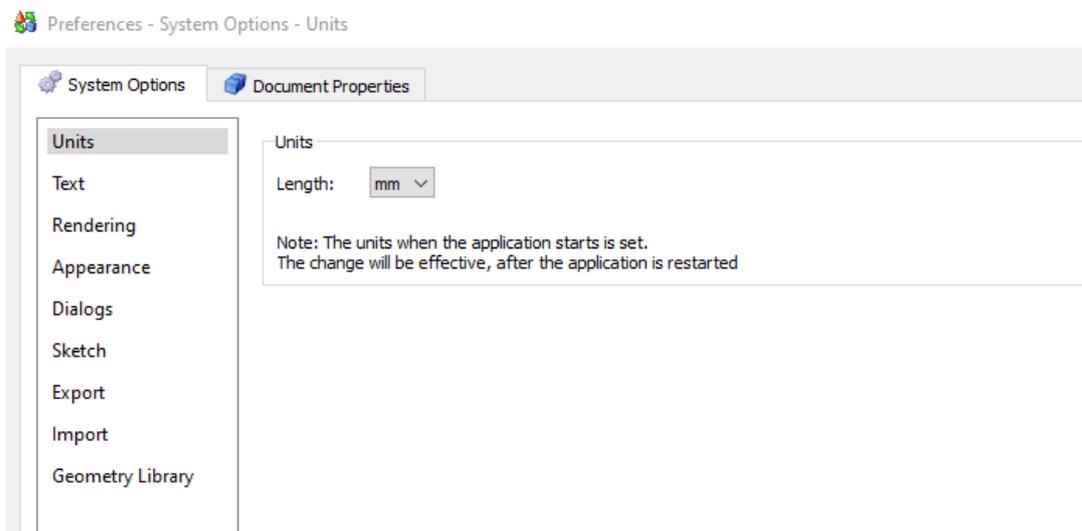
11.3.2	Simulación de ambos estudios simultáneamente	176
11.3.3	Final de la simulación	177
11.4	Análisis de los resultados	178
11.4.1	Representación gráfica de la temperatura media	178
11.4.2	Representación gráfica del calor generado	178
11.4.3	Gráfico tipo <i>Contour Plot</i> para la representación de la distribución de temperatura	179
11.4.4	Gráfico tipo <i>Contour Plot</i> para la relación entre la generación de calor y la distribución de las corrientes parásitas	182

1 Modelización geométrica del relé

1.1 Preferencias del editor geométrico de JMAG-Designer



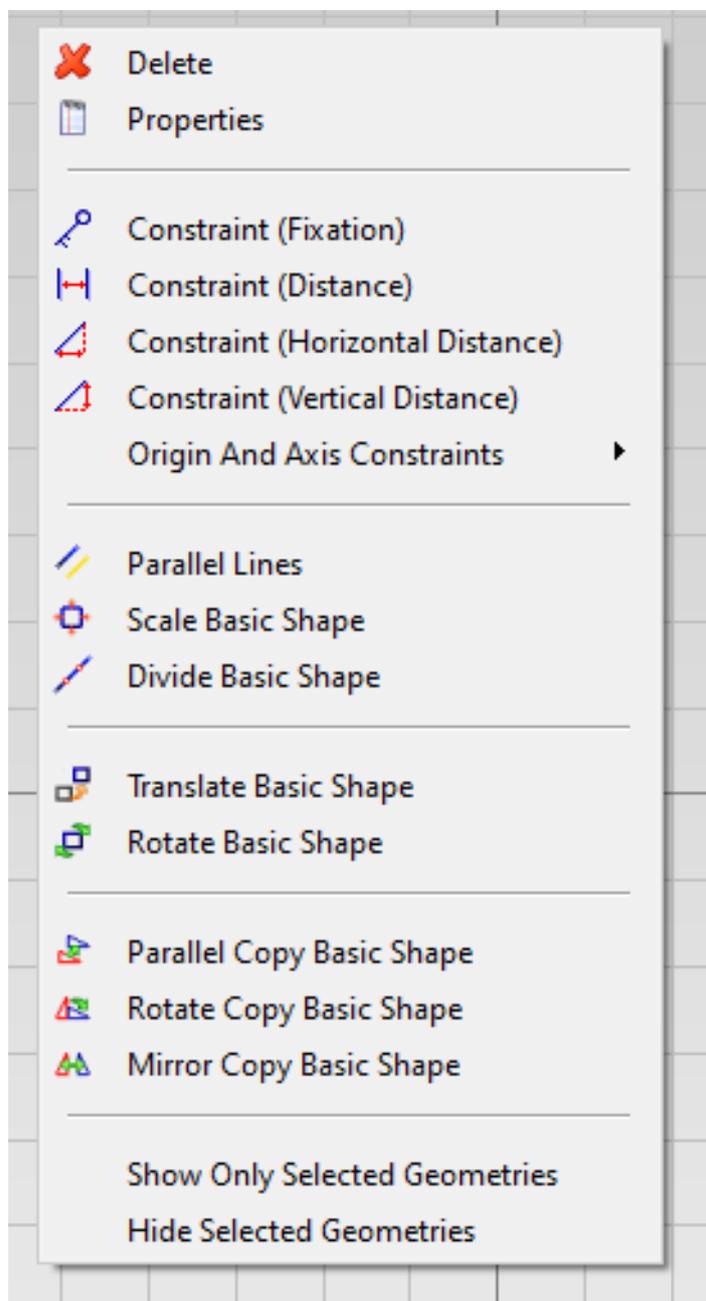
1.2 Unidades de longitud del sistema y configuración de la cuadrícula



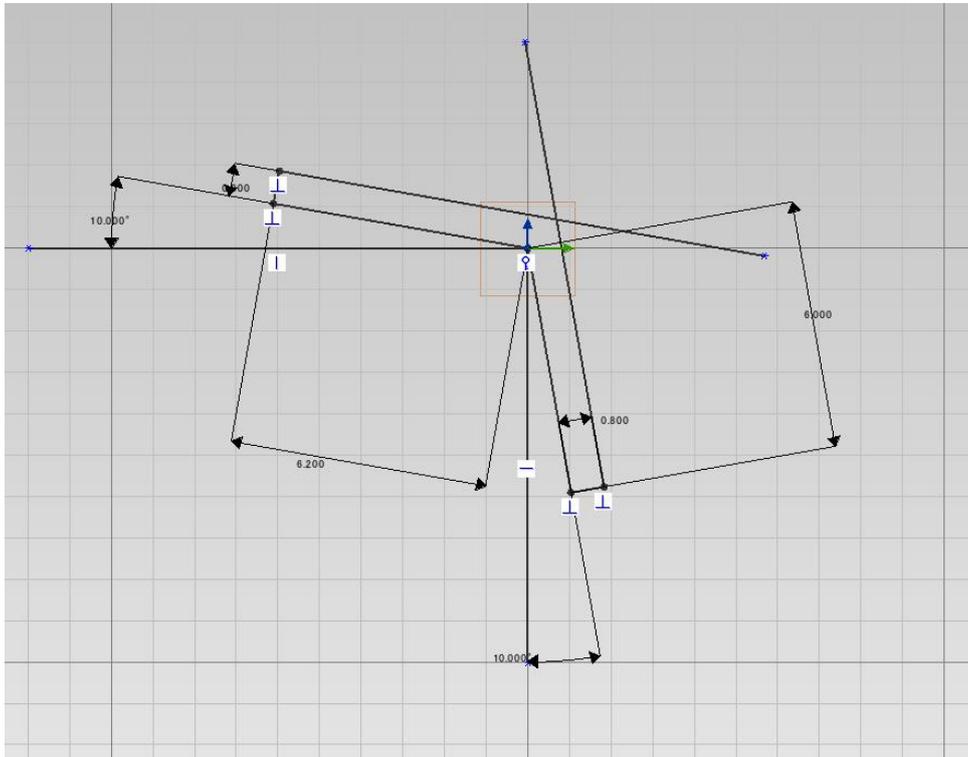
1.3 Opción de *Create Part* del editor geométrico



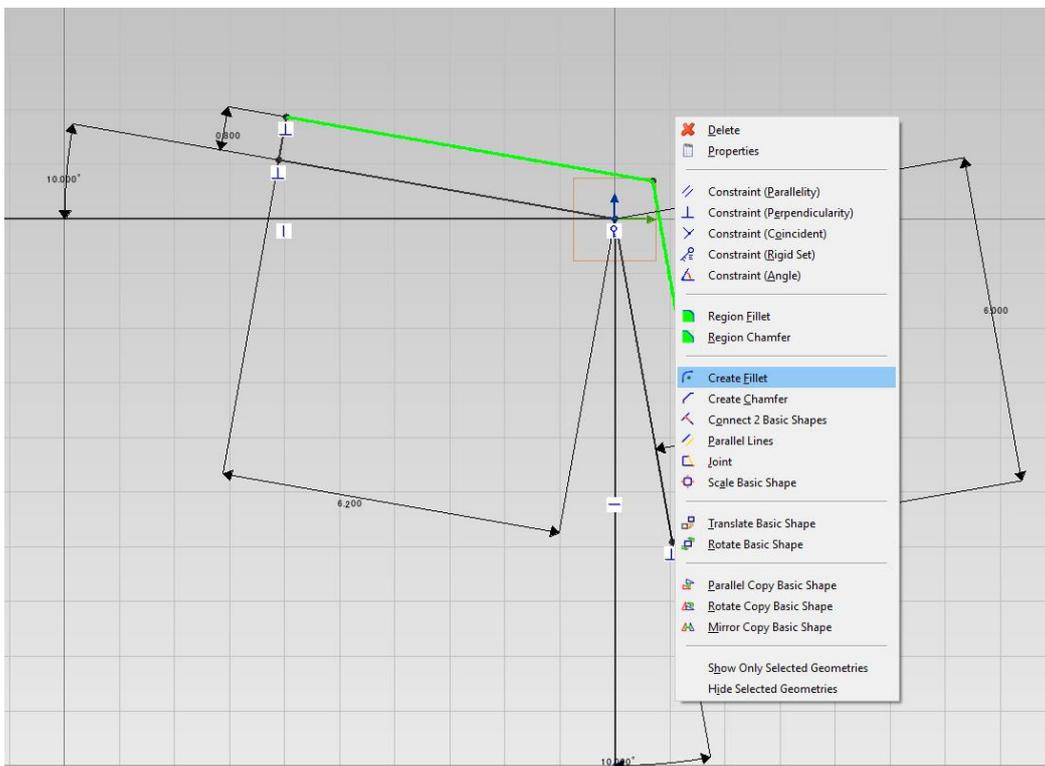
1.4 Restricciones disponibles para una línea

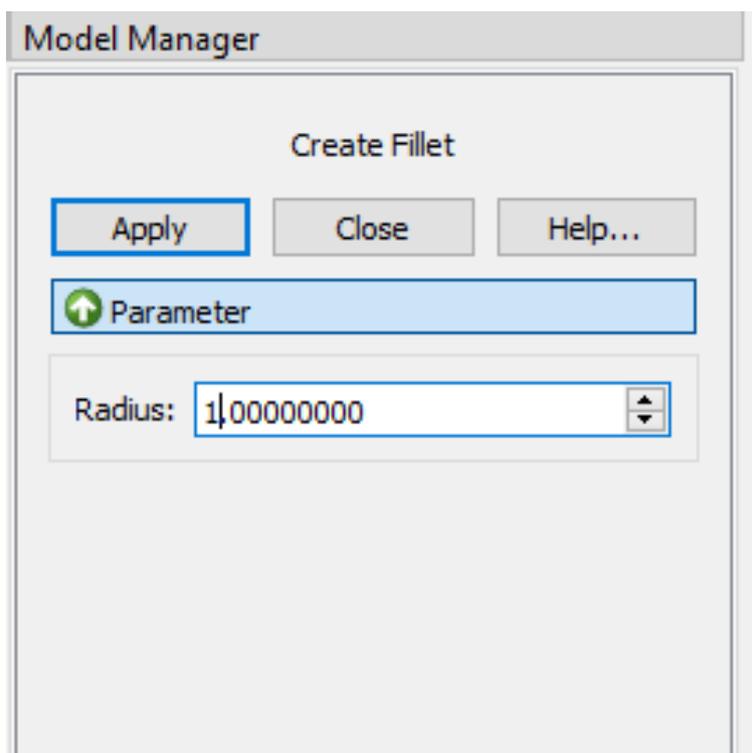


1.5 Perfil inicial del núcleo móvil

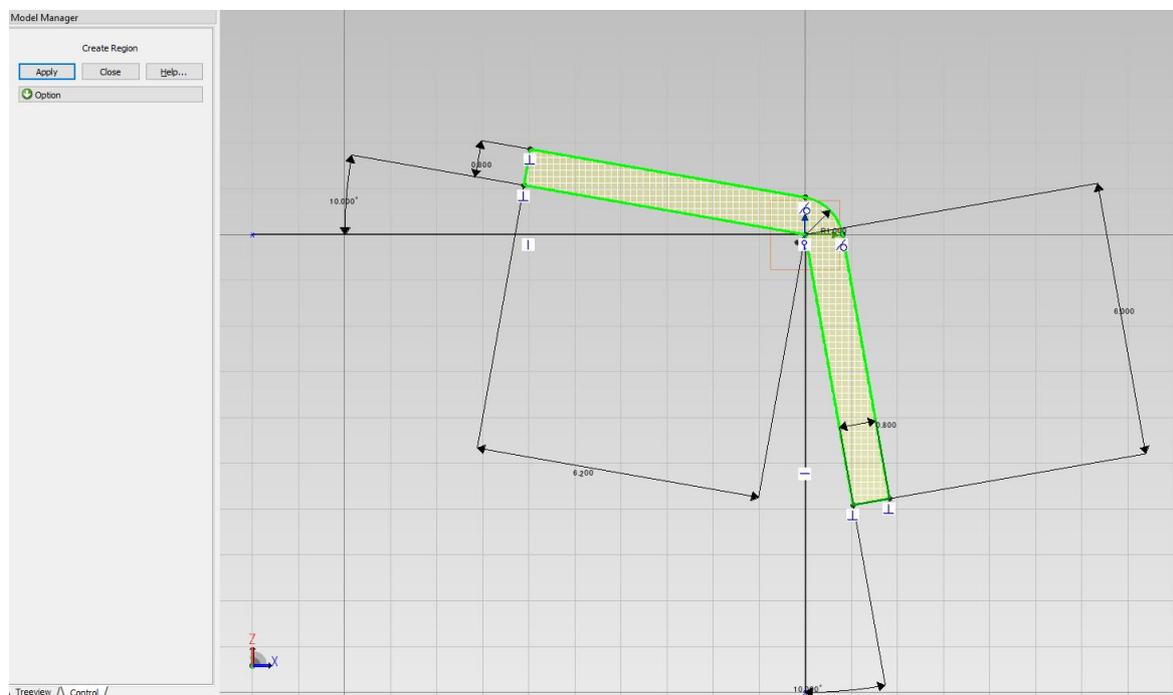


1.6 Redondeado de la esquina superior (*Create Fillet*)

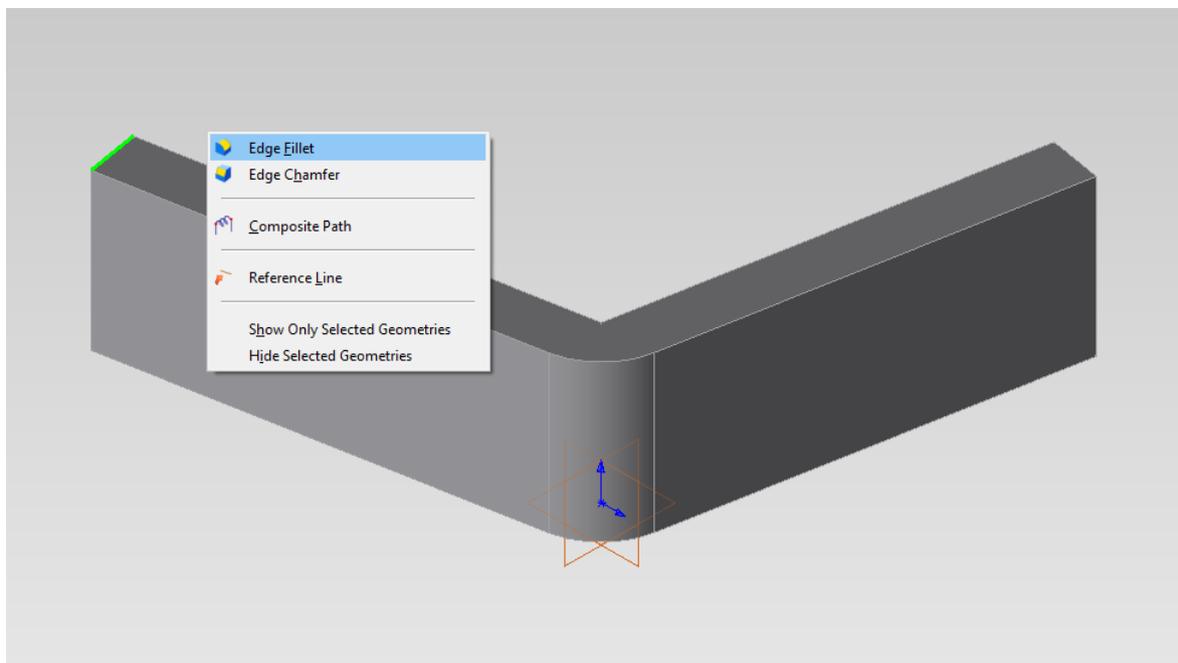




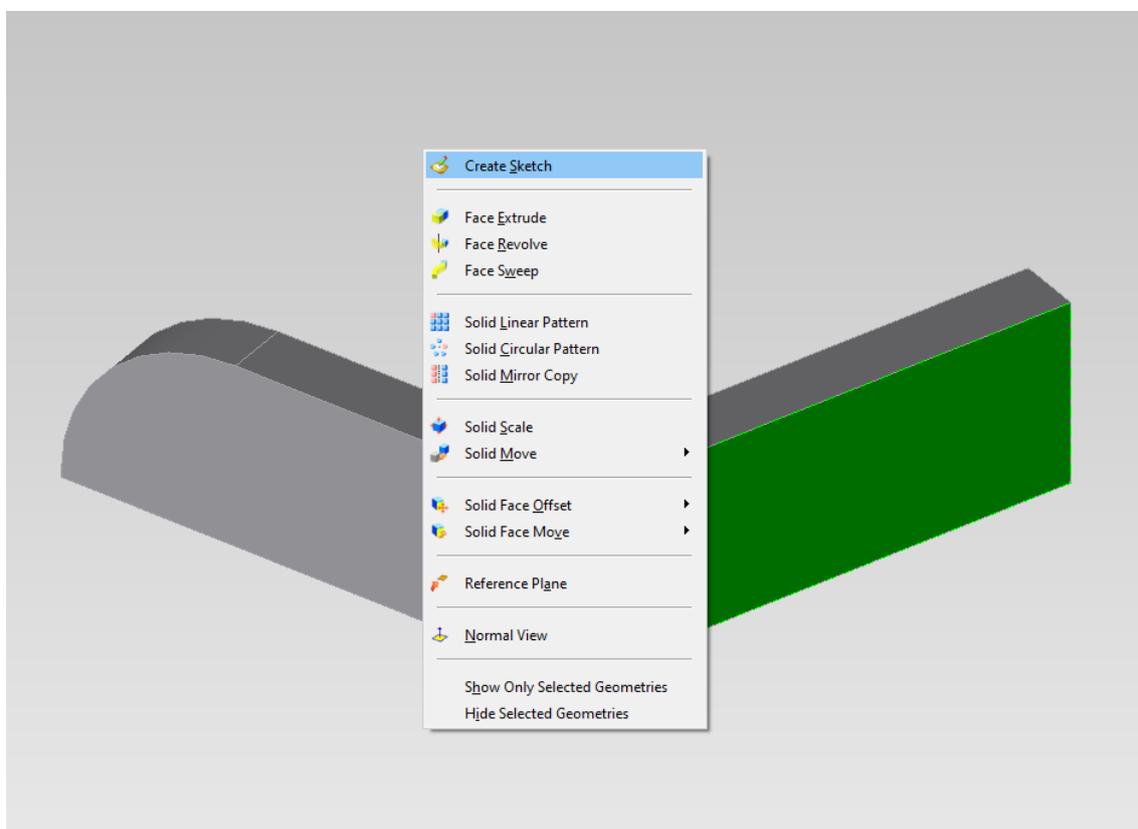
1.7 Región del perfil del núcleo móvil



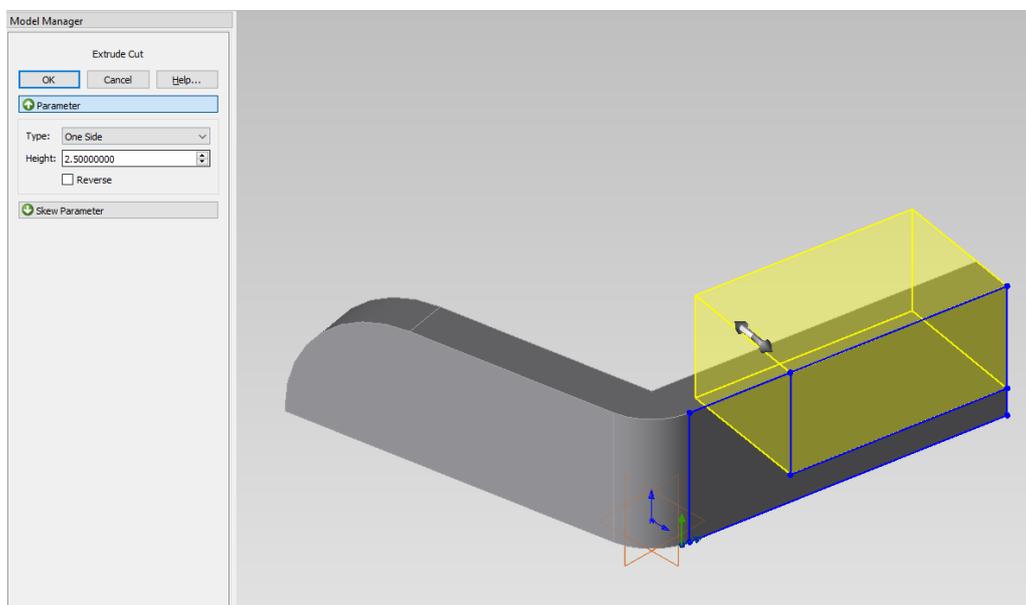
1.8 Redondeado de la esquina del núcleo móvil (*Edge Fillet*)



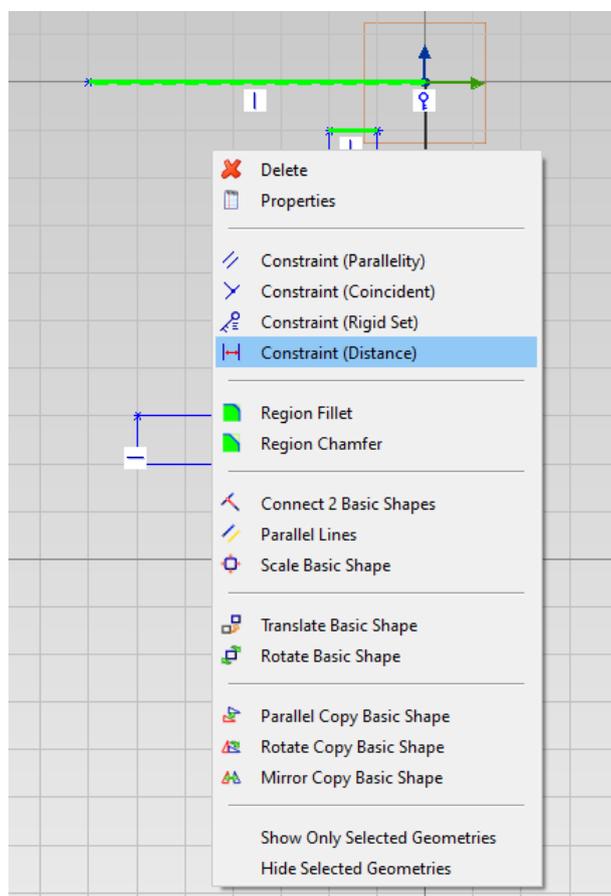
1.9 Creación de un boceto sobre una superficie



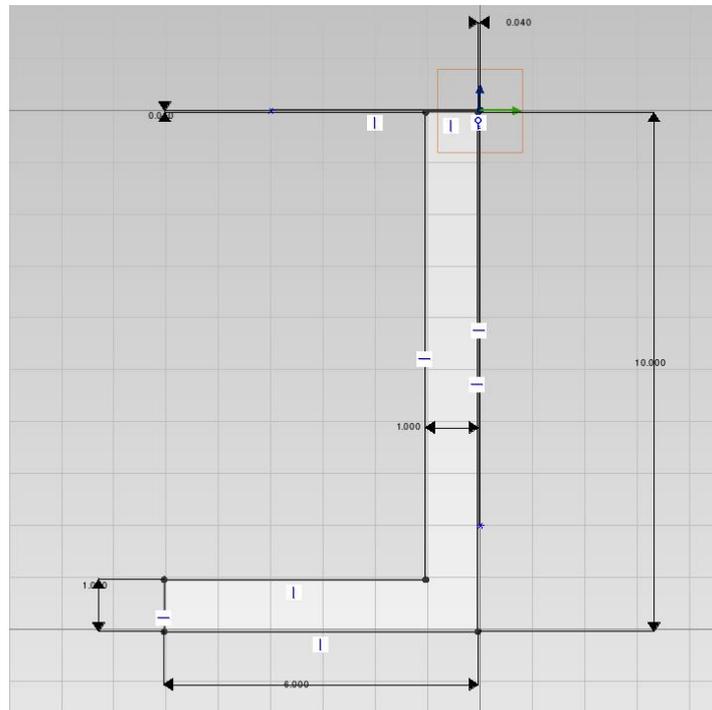
1.10 Operación de *Extrude Cut* para realizar un corte en el núcleo móvil



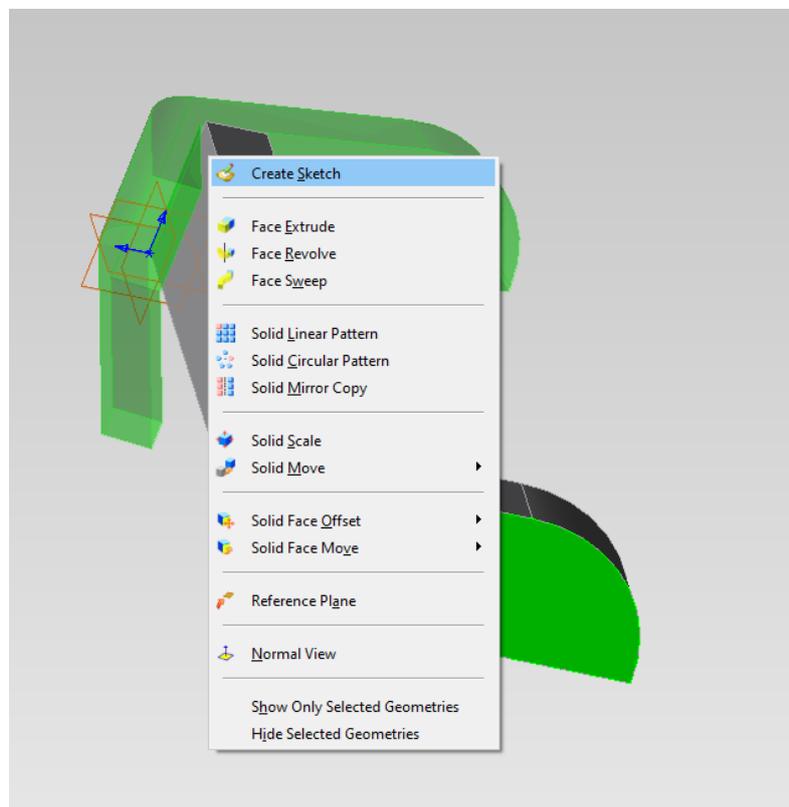
1.11 Restricción de distancia para la posición relativa de la armadura

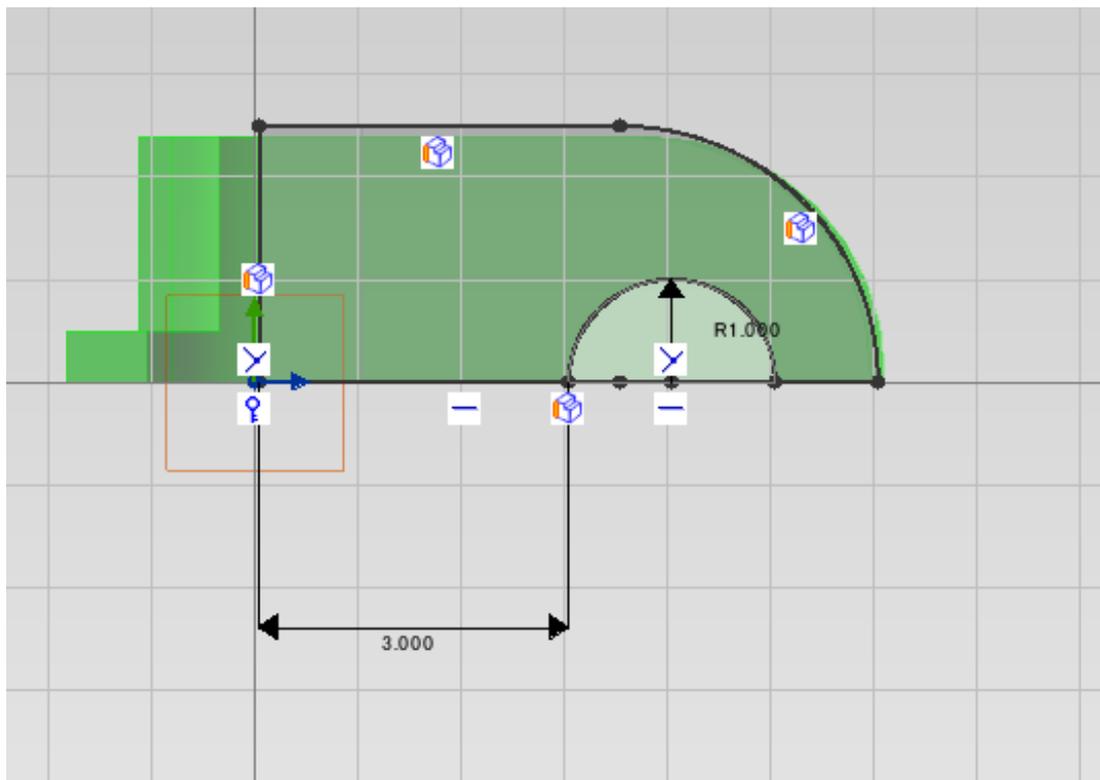


1.12 Región con el perfil de la armadura

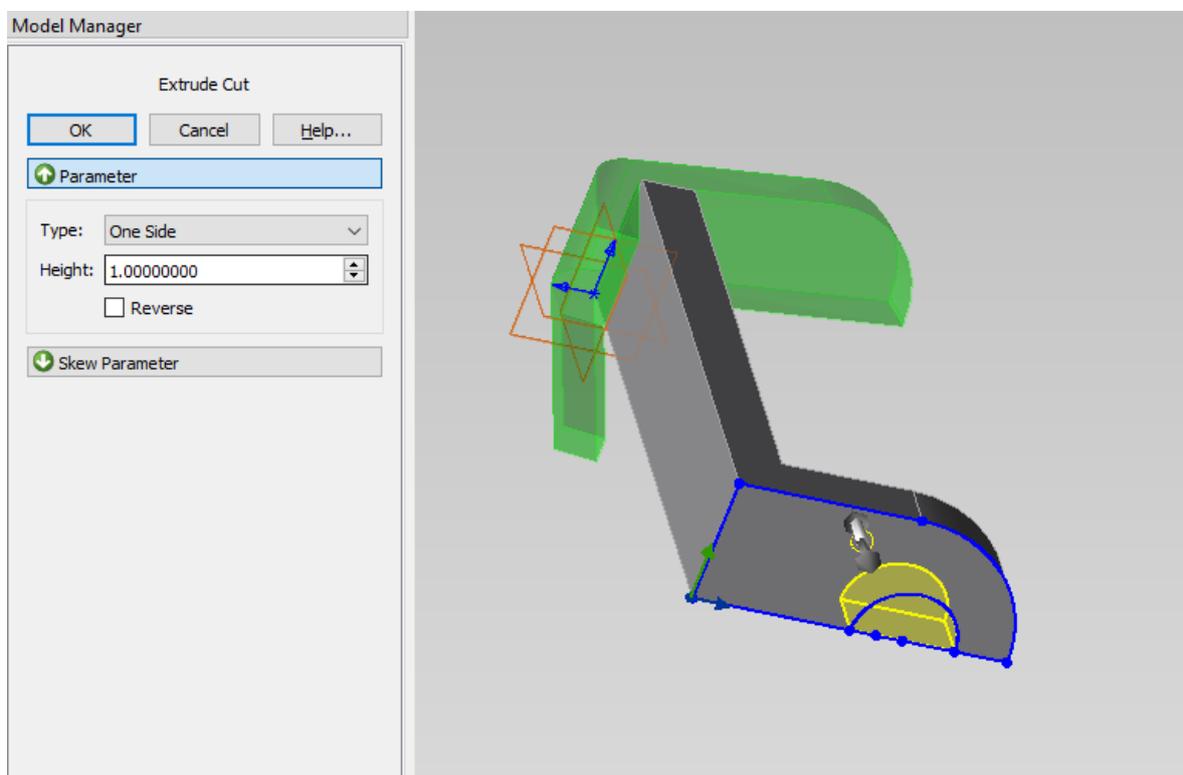


1.13 Boceto para el orificio de la base de la armadura

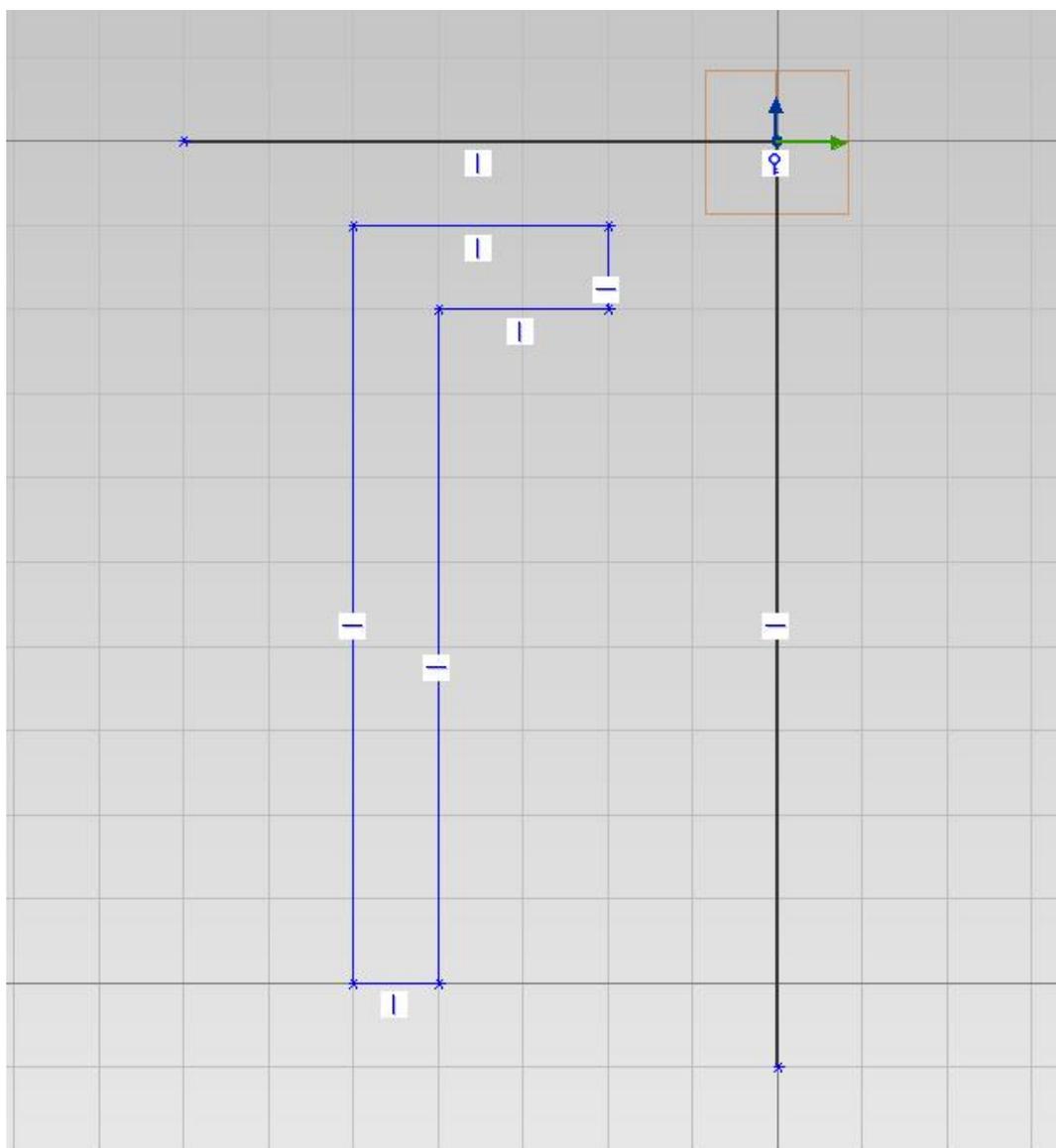




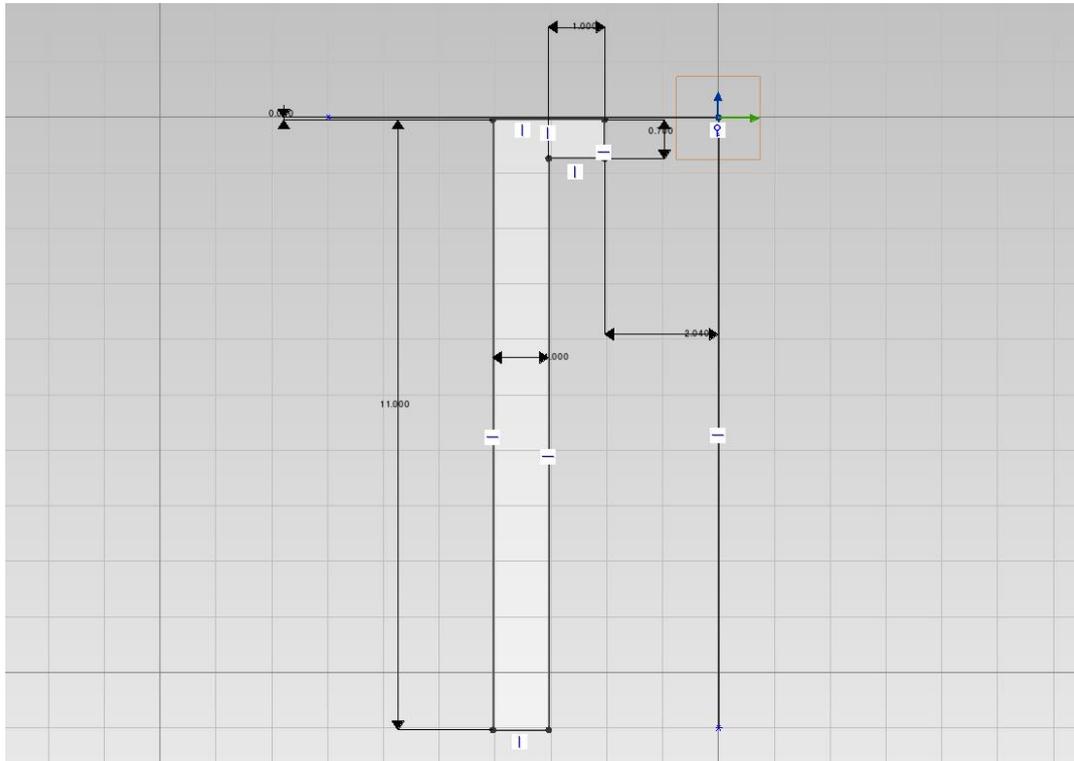
1.14 Operación de *Extrude Cut* para el orificio de la armadura



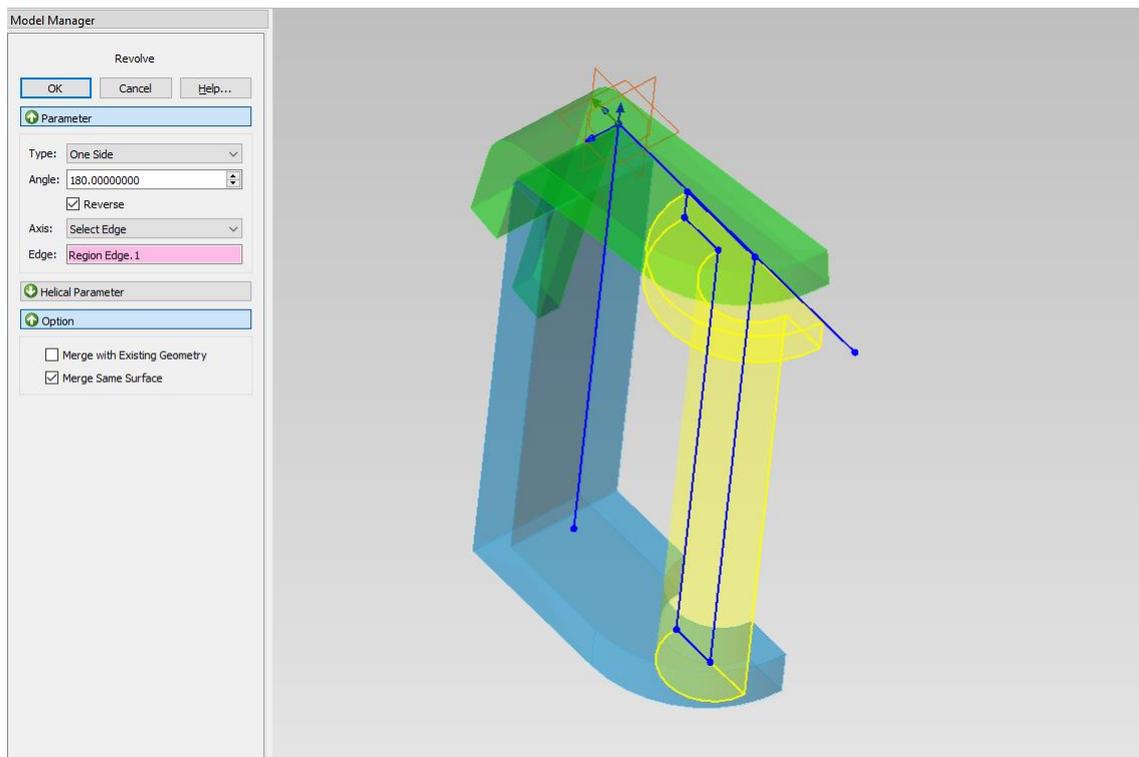
1.15 Boceto inicial para la modelización del núcleo del estátor



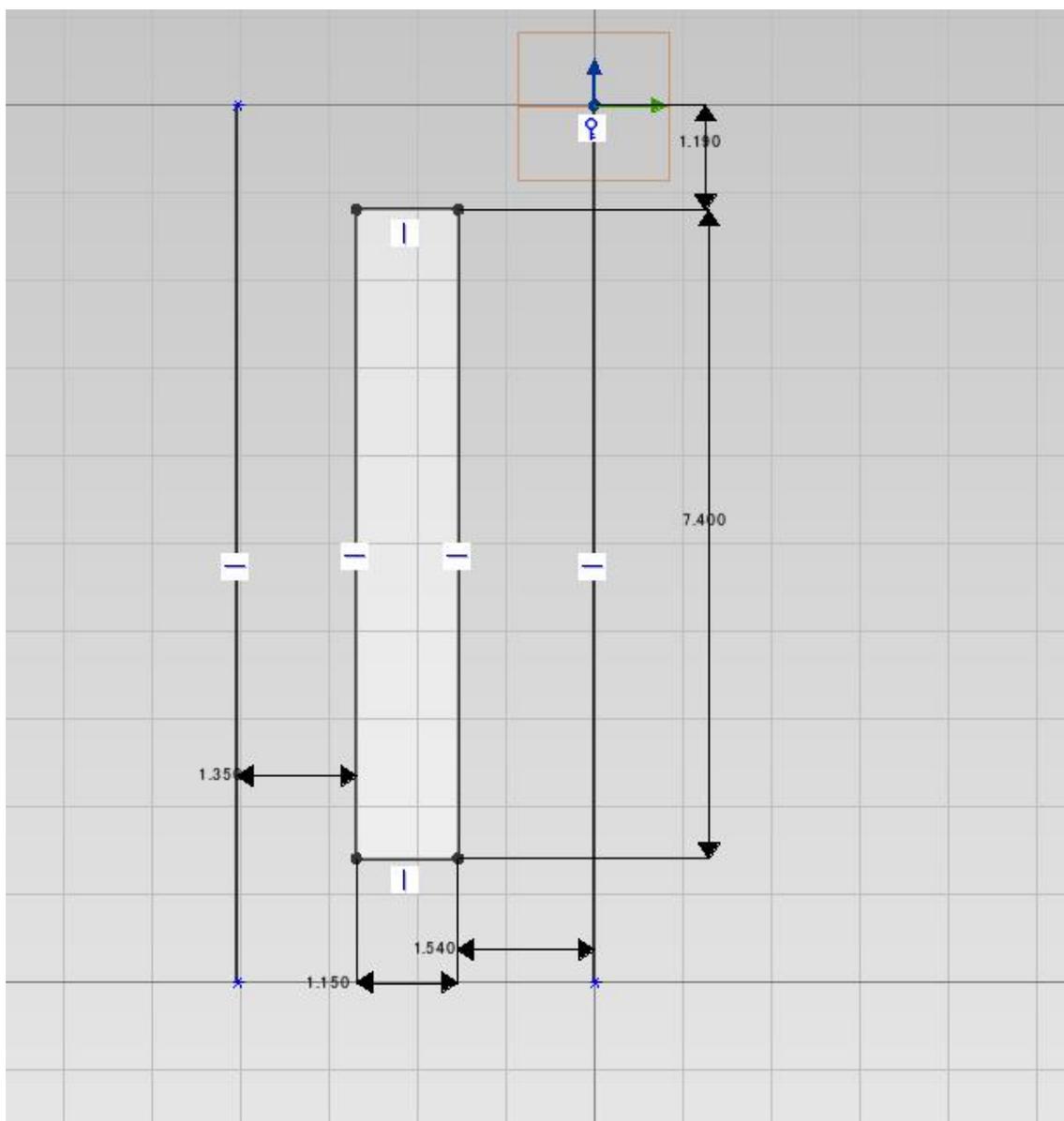
1.16 Perfil acotado del núcleo del estátor



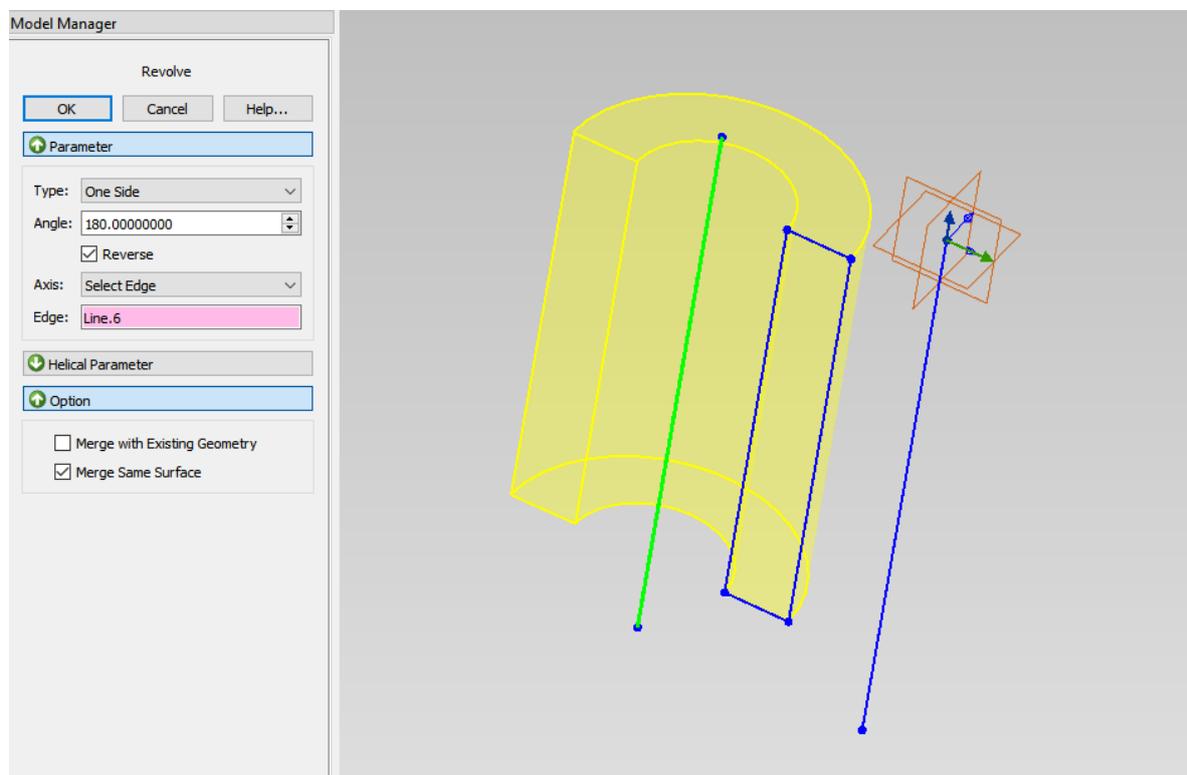
1.17 Operación de revolución para la construcción del núcleo del estátor



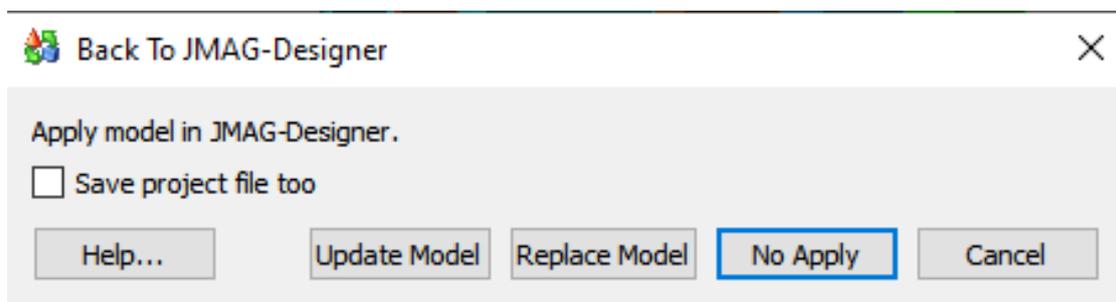
1.18 Boceto acotado para la modelización de la bobina



1.19 Operación de revolución para la construcción de la bobina



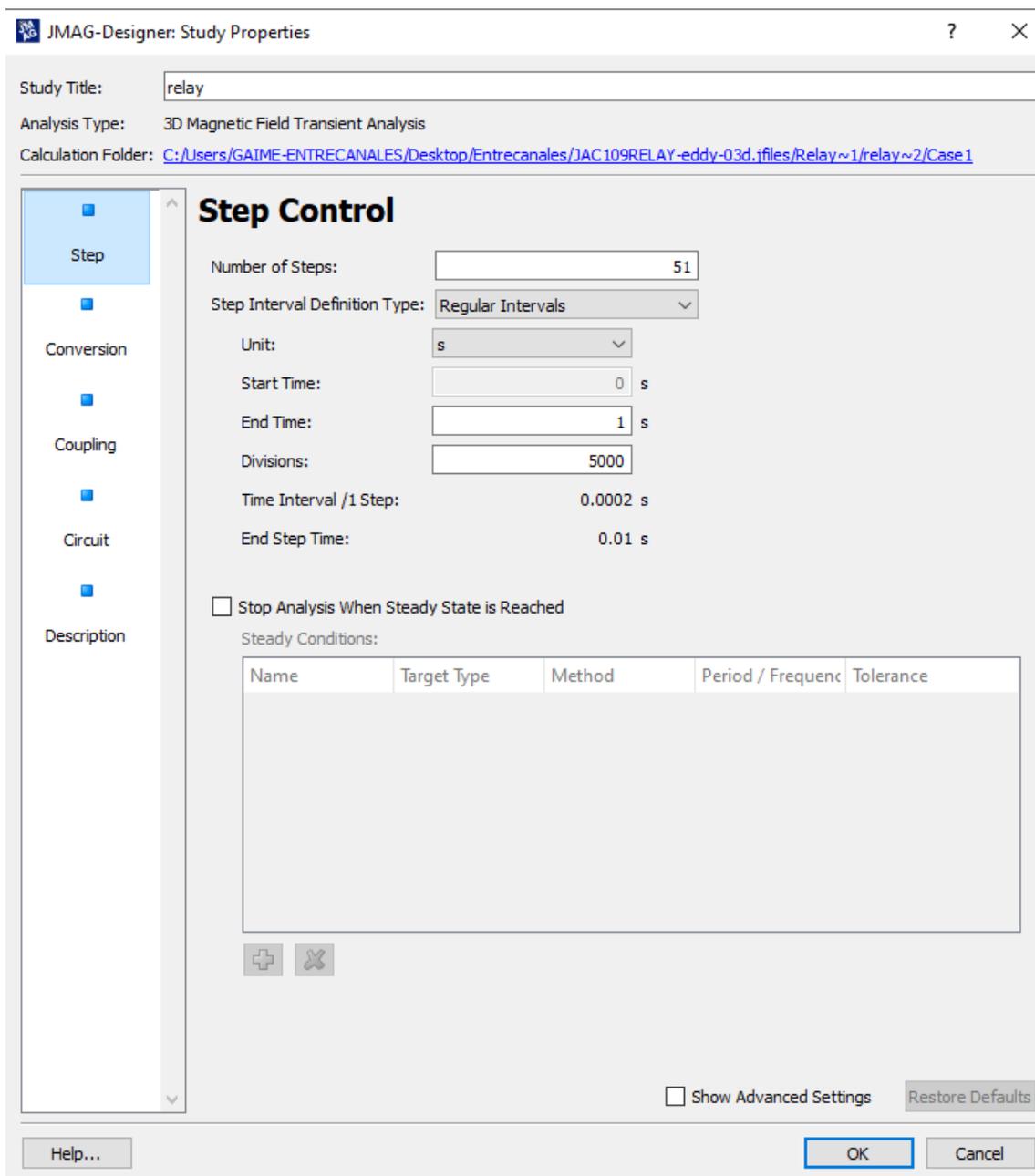
1.20 Opción de *Update Model* tras cerrar el editor geométrico



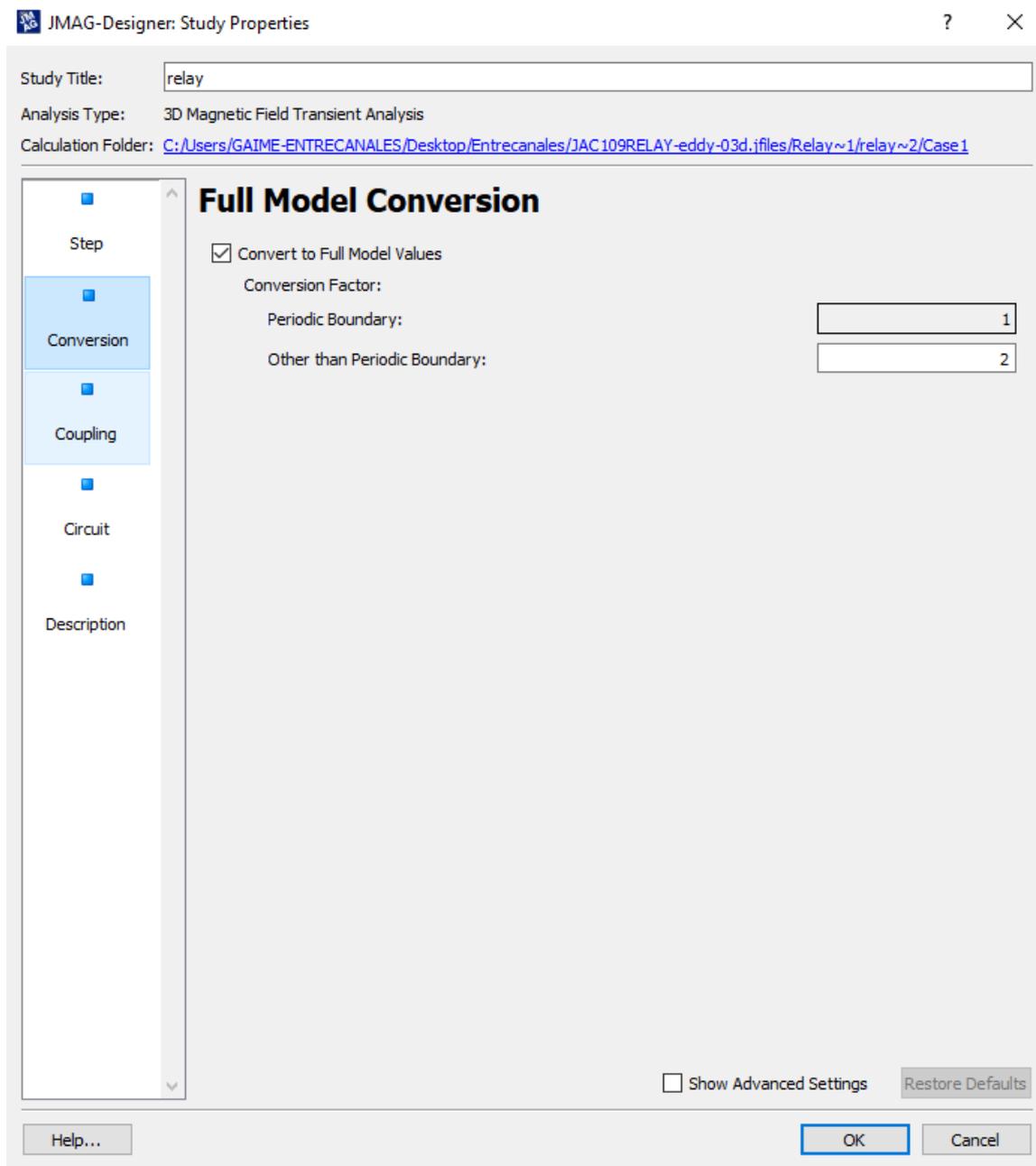
2 Ajustes previos de computación

En este apartado se muestran los planos necesarios para comprender el contenido del apartado 7.1.2 de la Memoria.

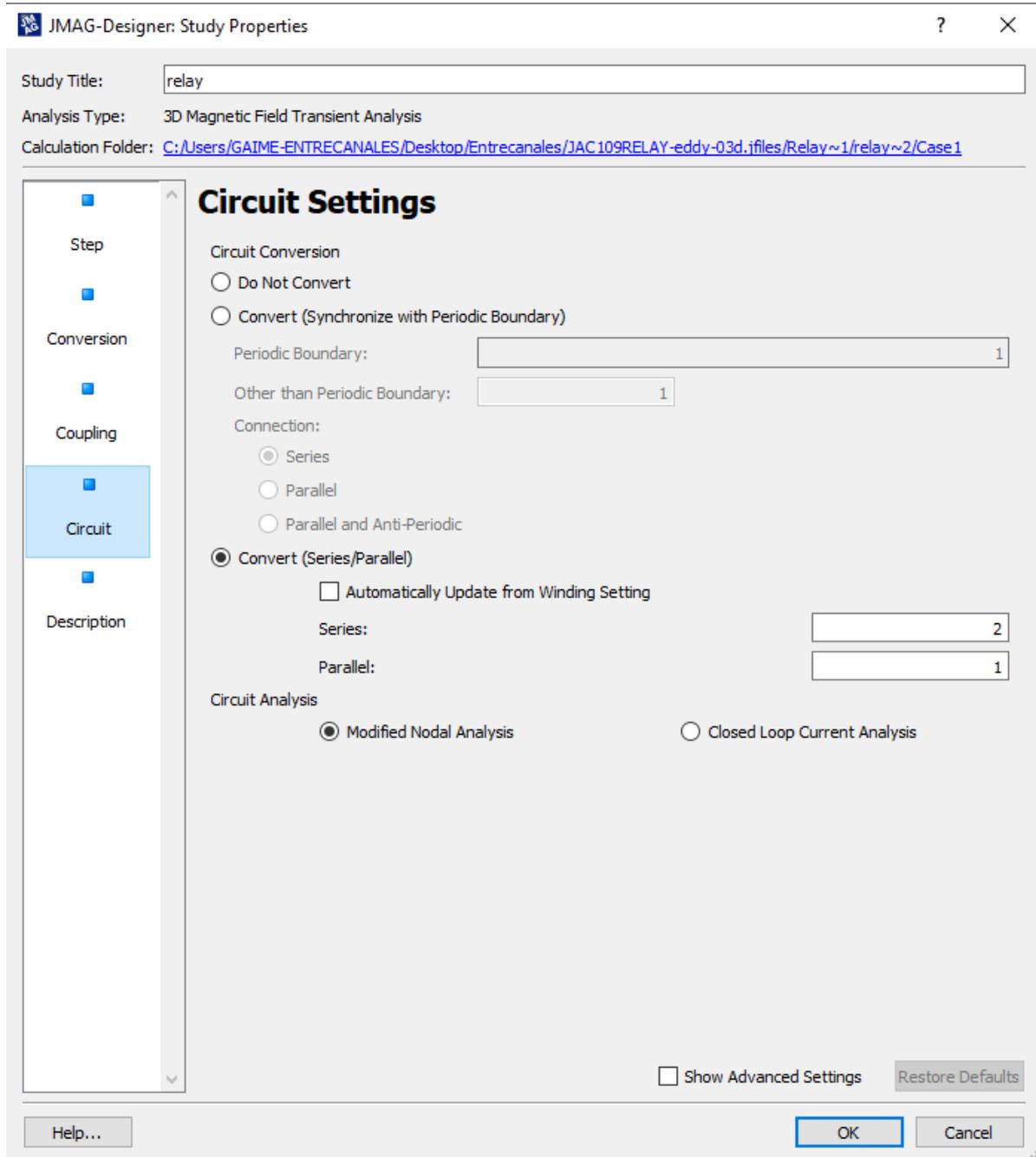
2.1 Step Control



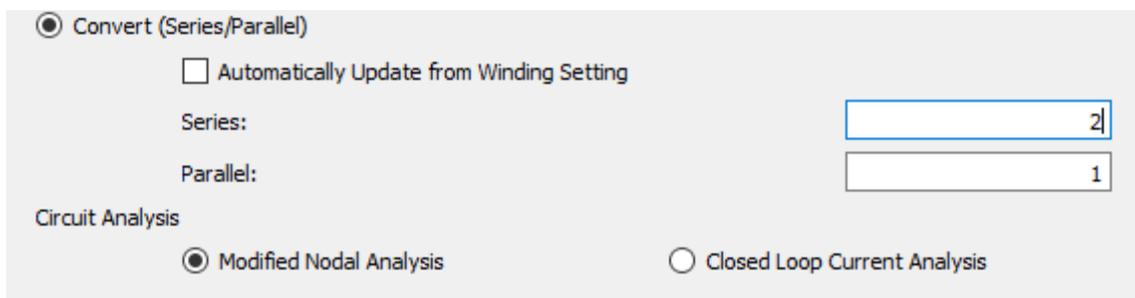
2.2 Full Model Conversion



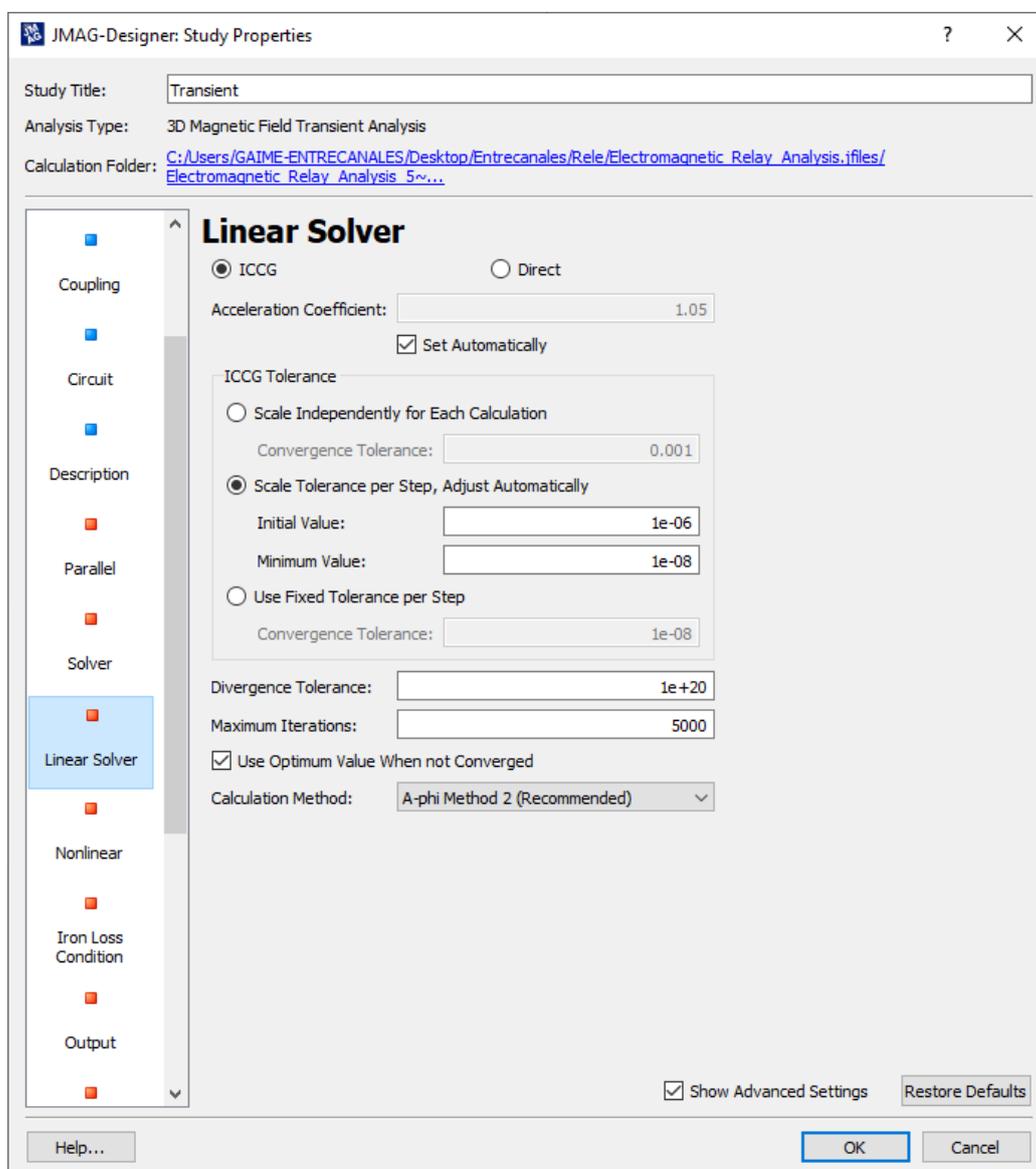
2.3 Circuit Settings



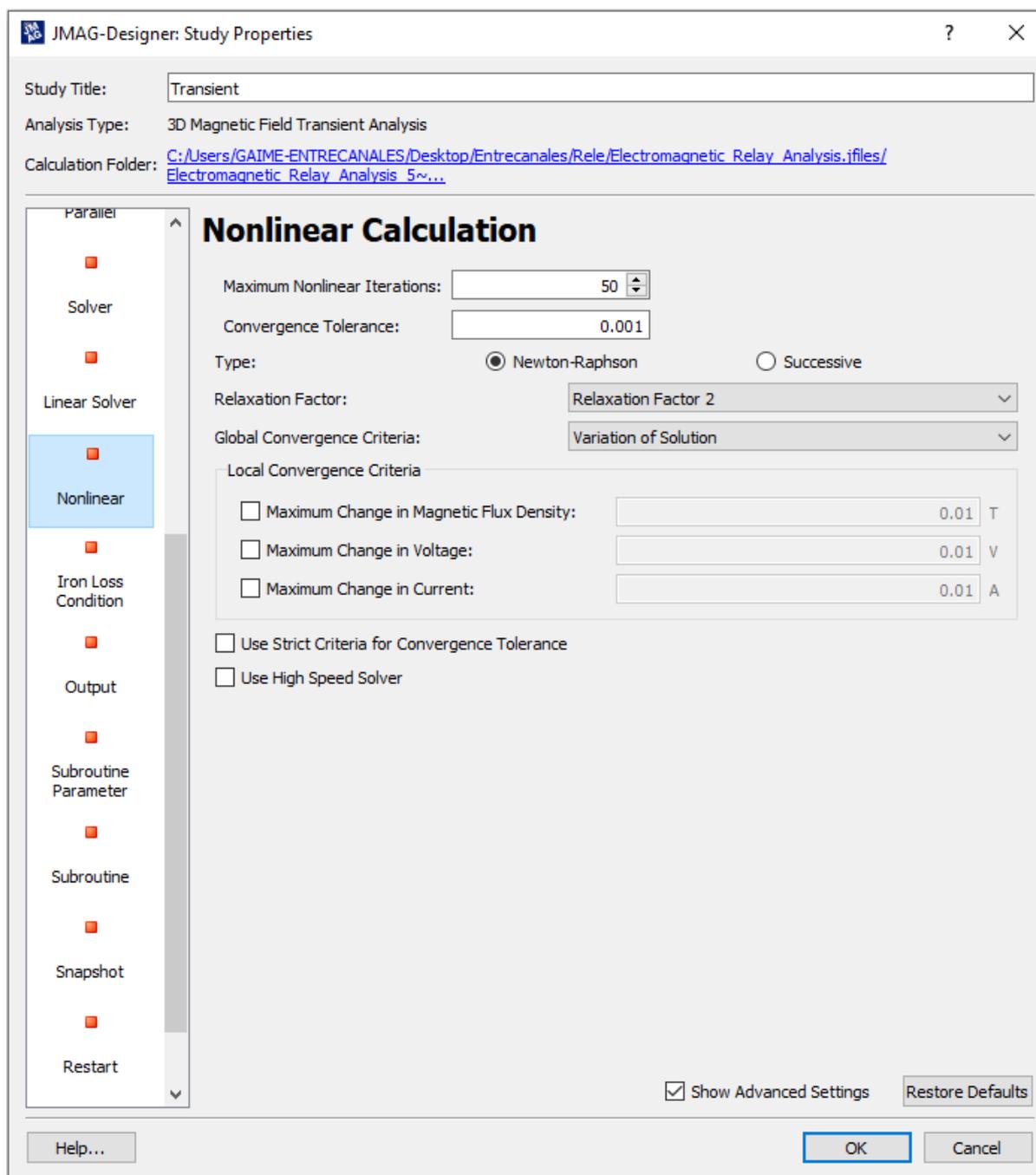
2.4 Configuración de la opción *Parallel* para acelerar la simulación



2.5 Linear Solver



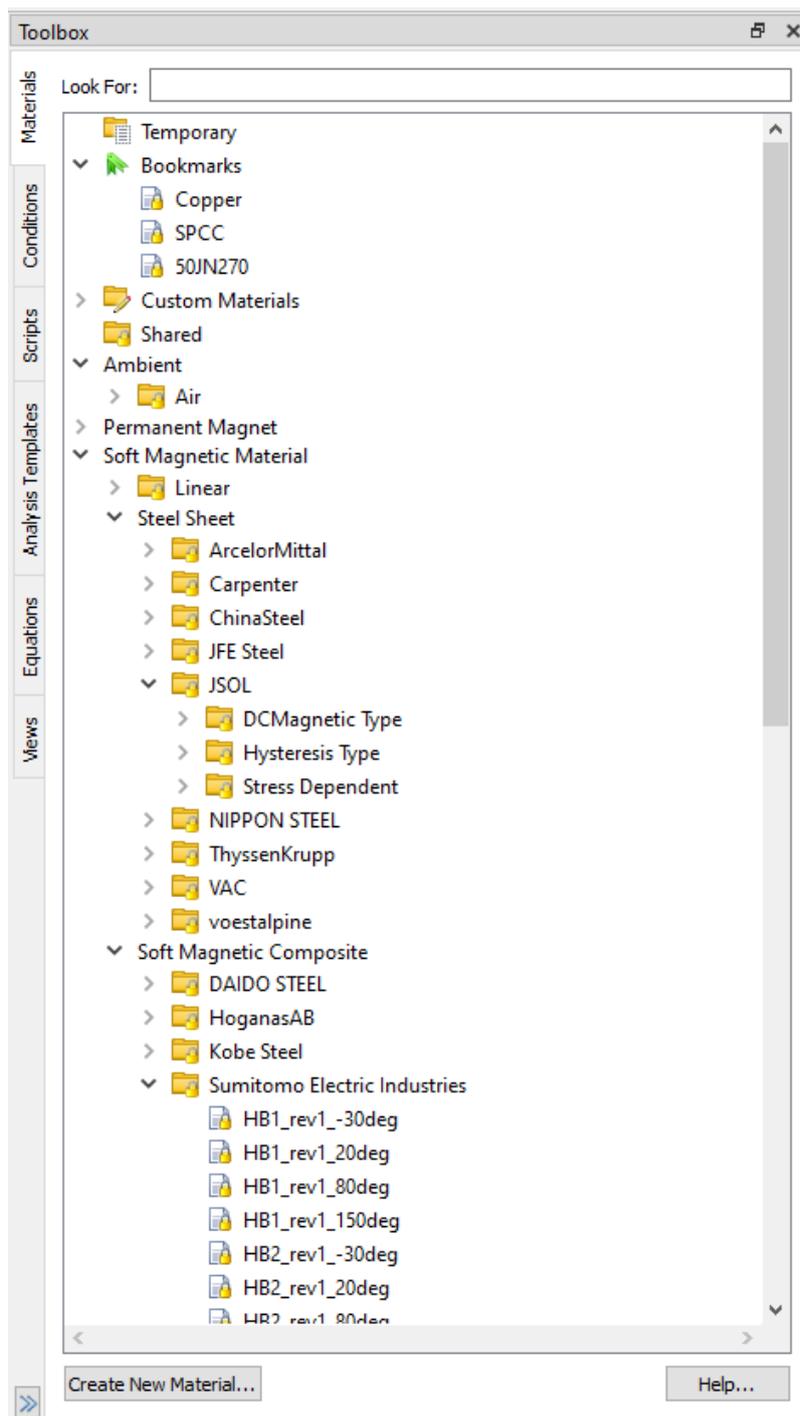
2.6 Nonlinear Calculation



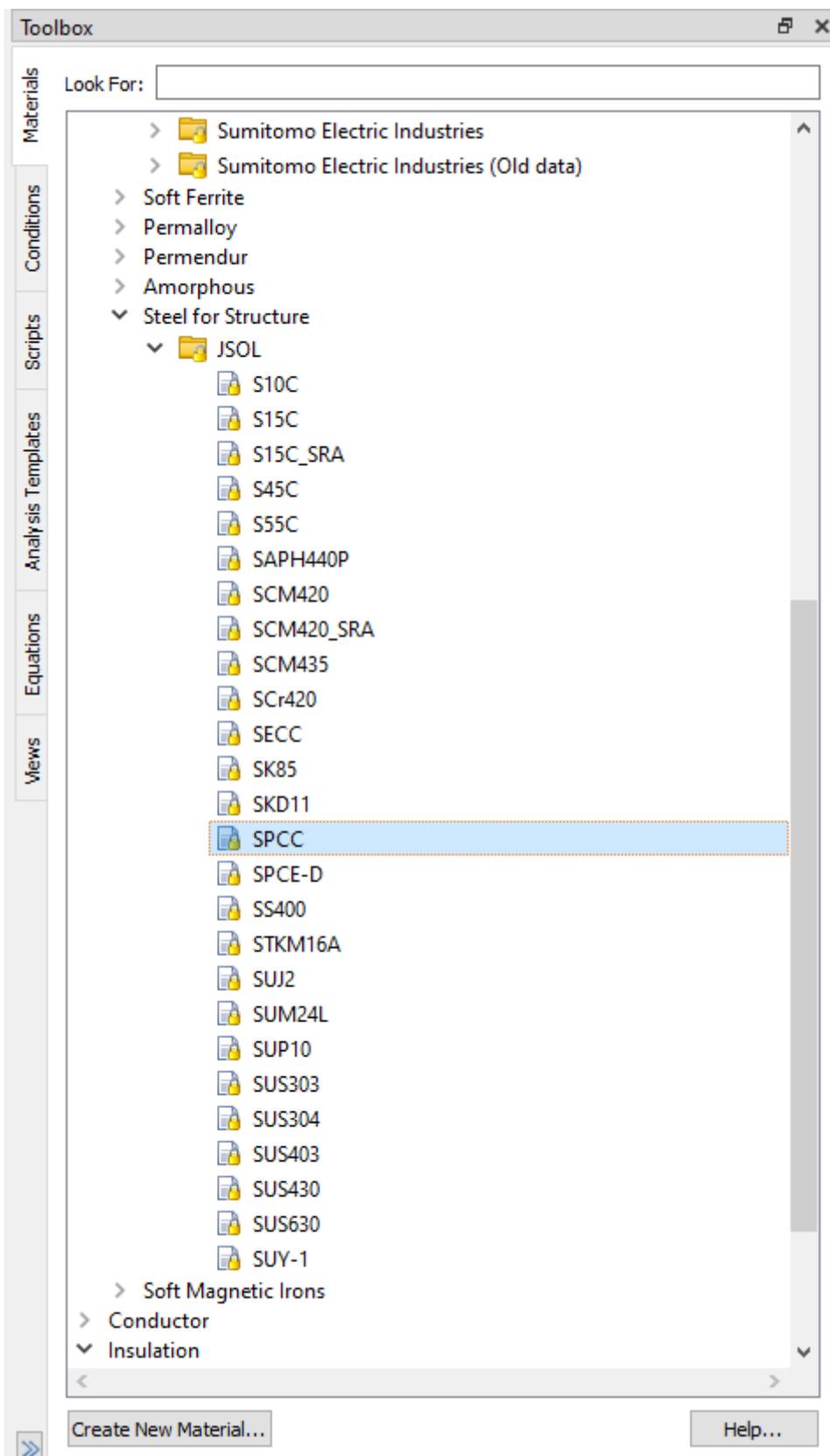
3 Asignación de materiales

A continuación, se recogen los planos necesarios para comprender el apartado 7.1.3 de la memoria, correspondiente a la asignación de materiales a los distintos componentes.

3.1 Biblioteca de materiales de JMAG



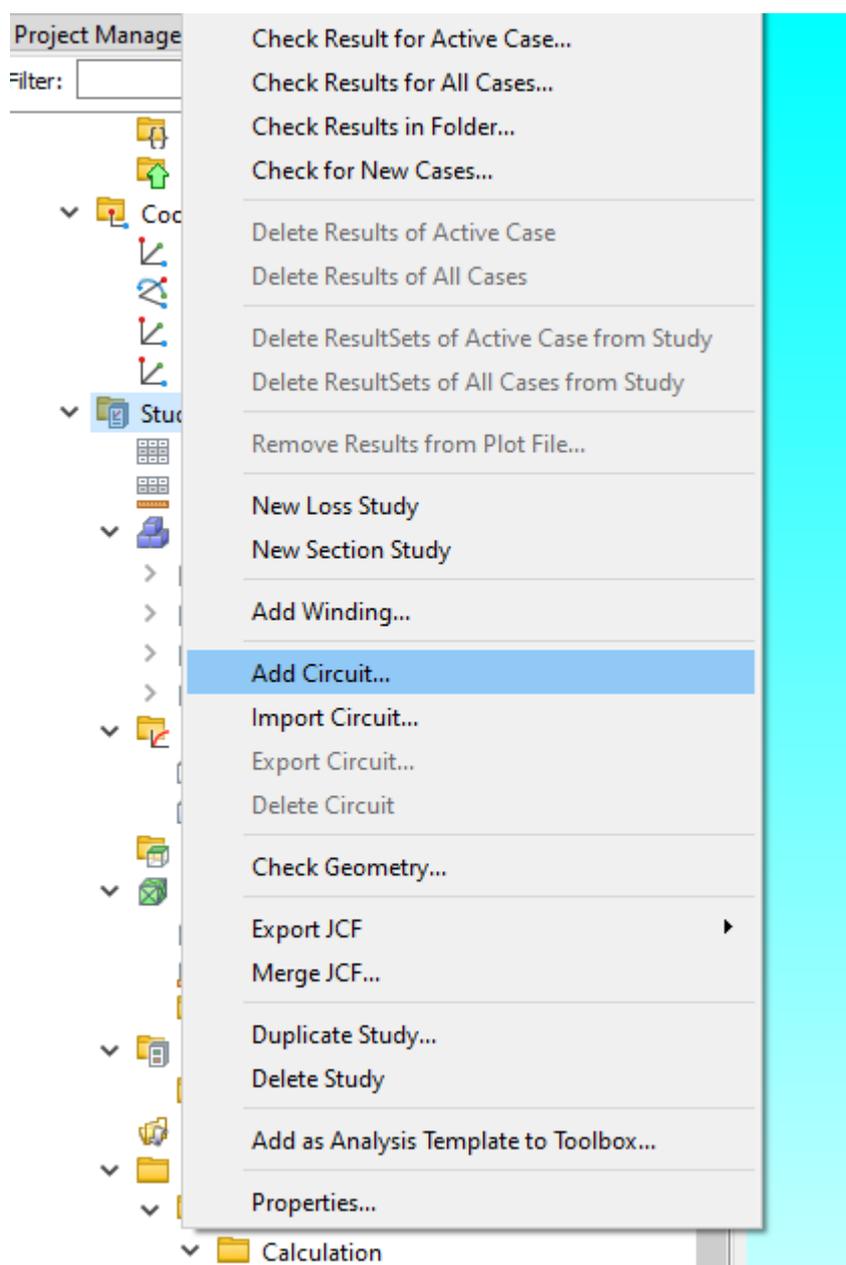
3.2 Acero SPCC de la base de datos de JSOL



4 Creación del circuito eléctrico

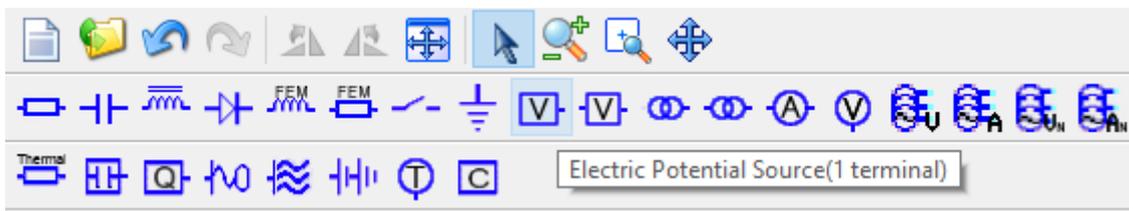
Se incluyen en este apartado los planos y figuras mencionadas en el apartado 7.1.4 de la memoria, que explica el proceso a seguir para la creación del circuito eléctrico necesario para el funcionamiento del relé.

4.1 Opción de añadir circuito o *Add Circuit*

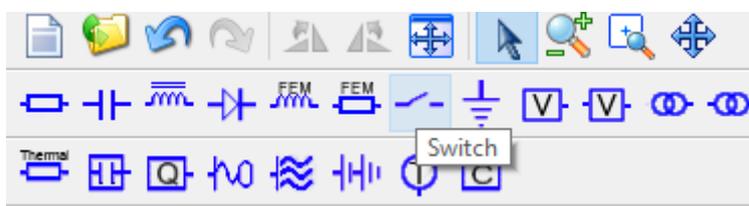


4.2 Componentes utilizados en el circuito eléctrico

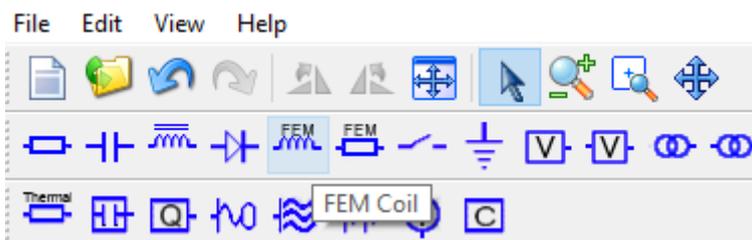
4.2.1 Fuente de alimentación



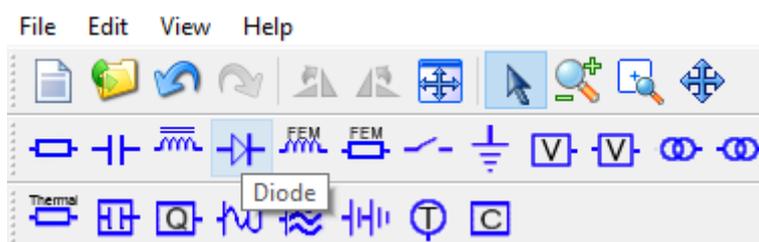
4.2.2 Interruptor



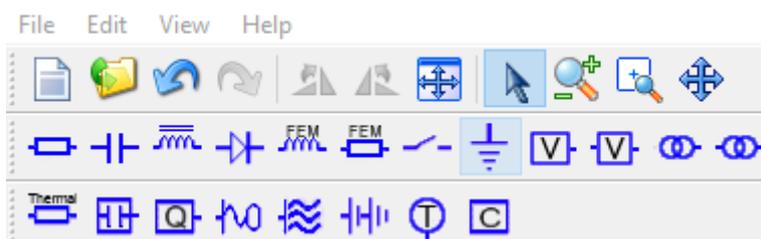
4.2.3 FEM Coil



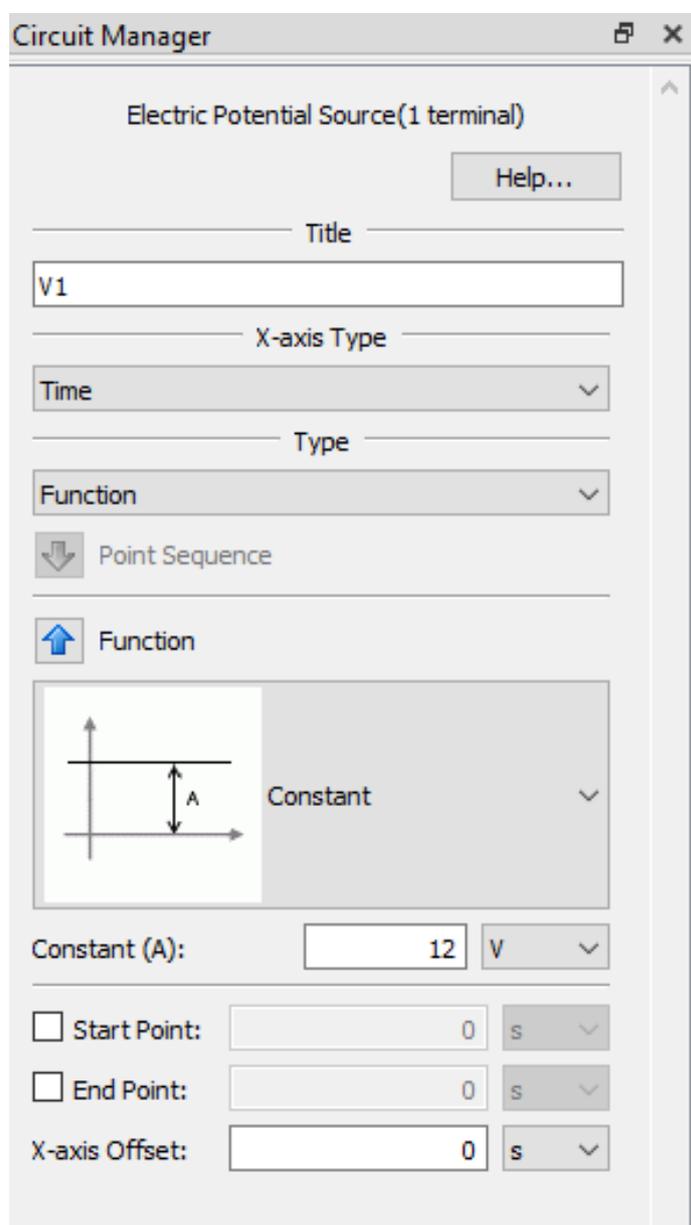
4.2.4 Diodo



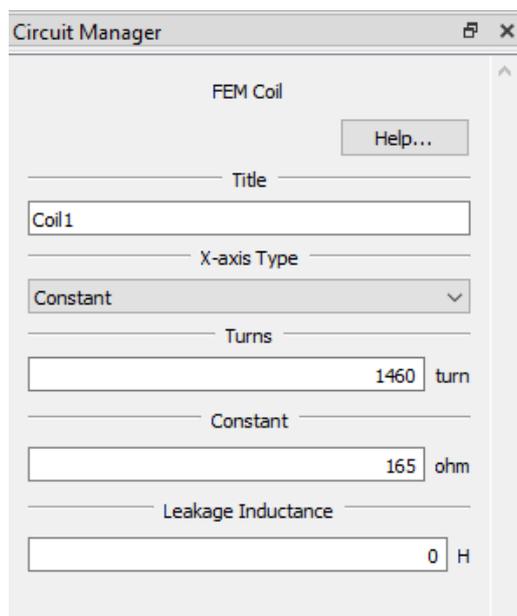
4.2.5 Toma de tierra



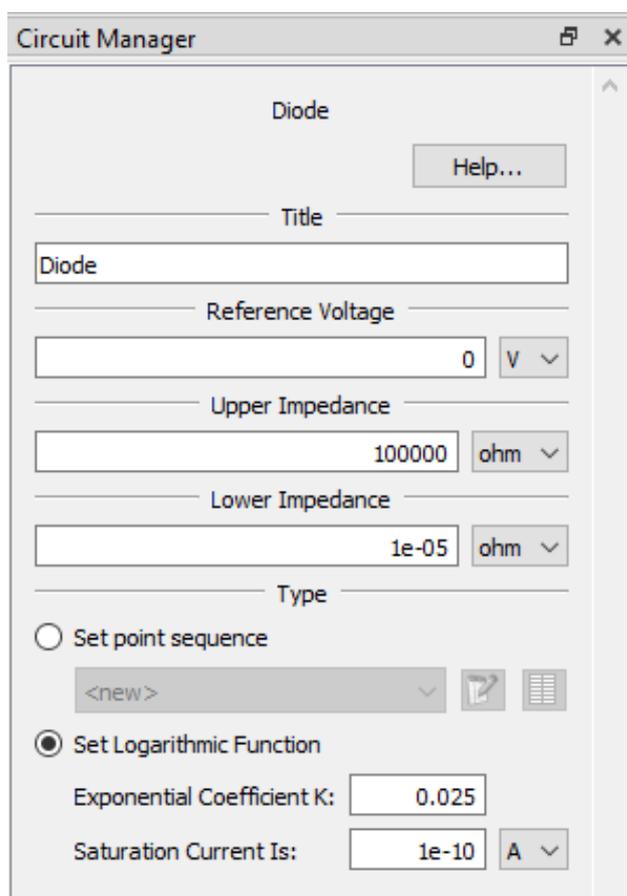
4.3 Configuración de la fuente de alimentación



4.4 Configuración del FEM Coil

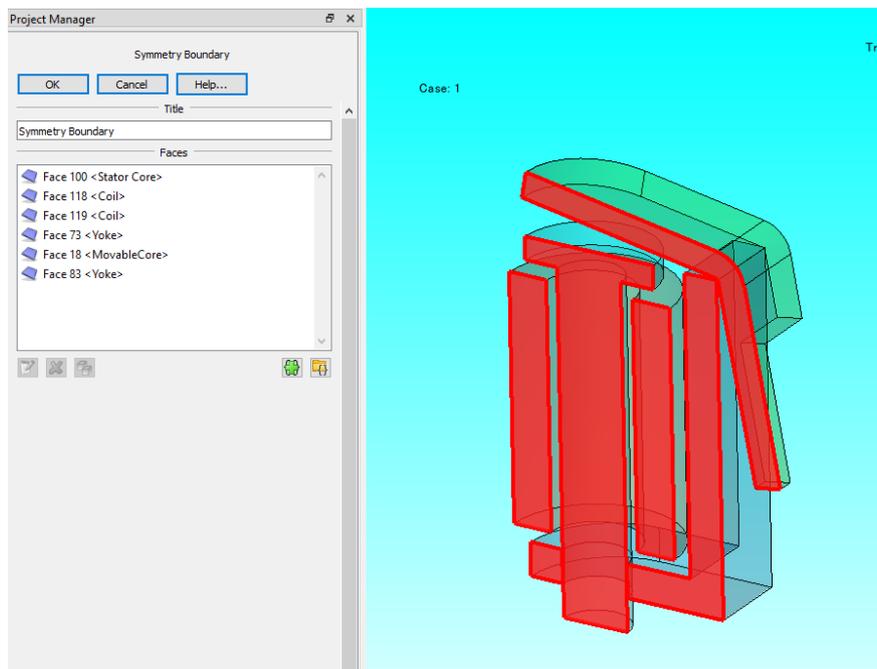


4.5 Configuración del diodo

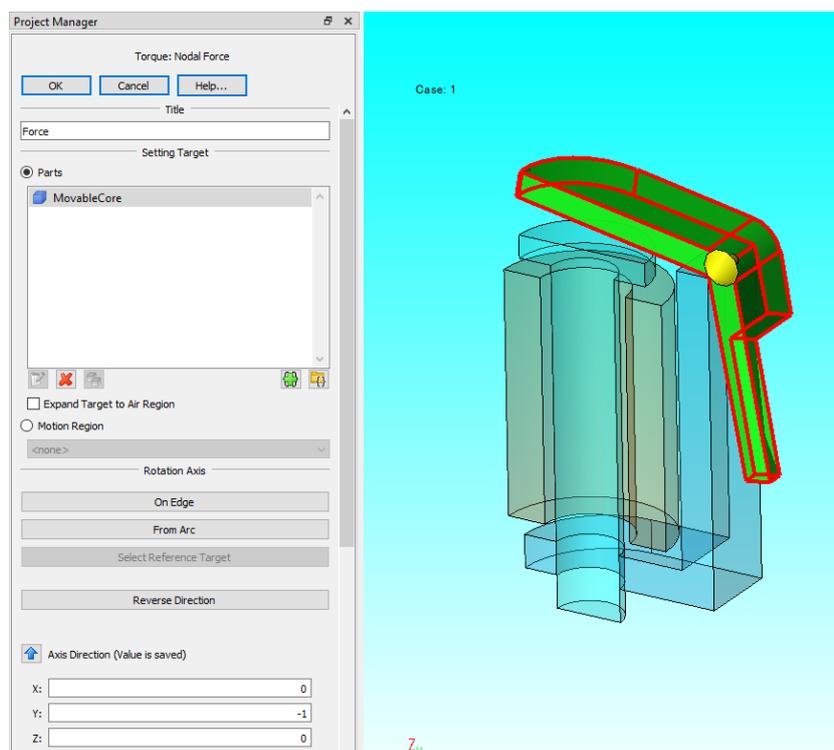


5 Definición de las condiciones

5.1 Condición de simetría o *Symmetry Boundary*



5.2 Condición de par o *Torque Nodal Force*



5.3 Definición de la ecuación de movimiento

JMAG-Designer: Define Equation of Motion
?
×

$$T = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + B \frac{d \theta}{dt} + K (\theta + \theta_0) + \tau$$

Torque, $T = kT_1 + T_2$

Torque Condition, T_1 : Force

Torque Multiplier, k : 1

Load Torque, T_2 :

Constant 0 Nm

Table vs Time

<new> Periodic

Inertia Moment, $J = \rho J_1 + J_2$

Inertia, J_1 : 1 kgm²

Calculate During Analysis Calculate Now

Inertia Coefficient, ρ : 1

Correction Value, J_2 : 0 kgm²

Attenuation Constant, B

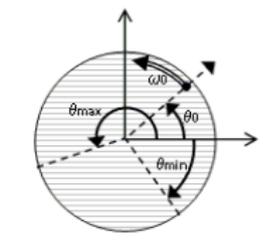
Constant 0 Nm/(deg/s)

Table <new>

Spring Constant, K

Constant 5e-05 Nm/deg

Table <new>



Initial State

Spring Extension, θ_0 : 0 deg

Angular Velocity, ω_0 : 0 r/min

Range of Movements

Upper Limit, θ_{max} : 10 deg

Lower Limit, θ_{min} : 0 deg

Friction Torque, $\tau = \mu r F_c$

$\mu = \mu_d$ or μ_s

Coefficient of Static Friction, μ_s : 0

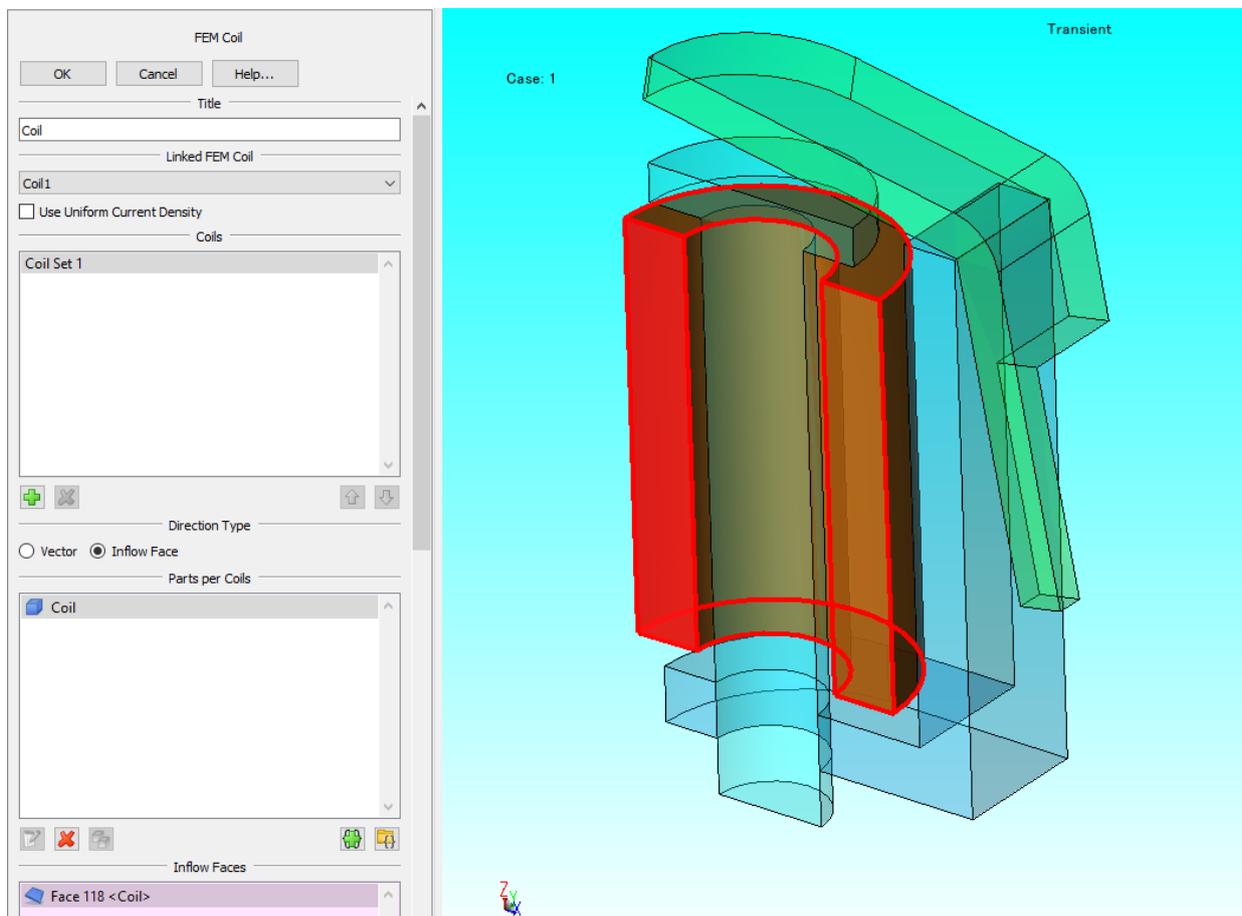
Coefficient of Dynamic Friction, μ_d : 0

Radius to Point of Face, r : 1000 mm

Normal Force, F_c : 0 N

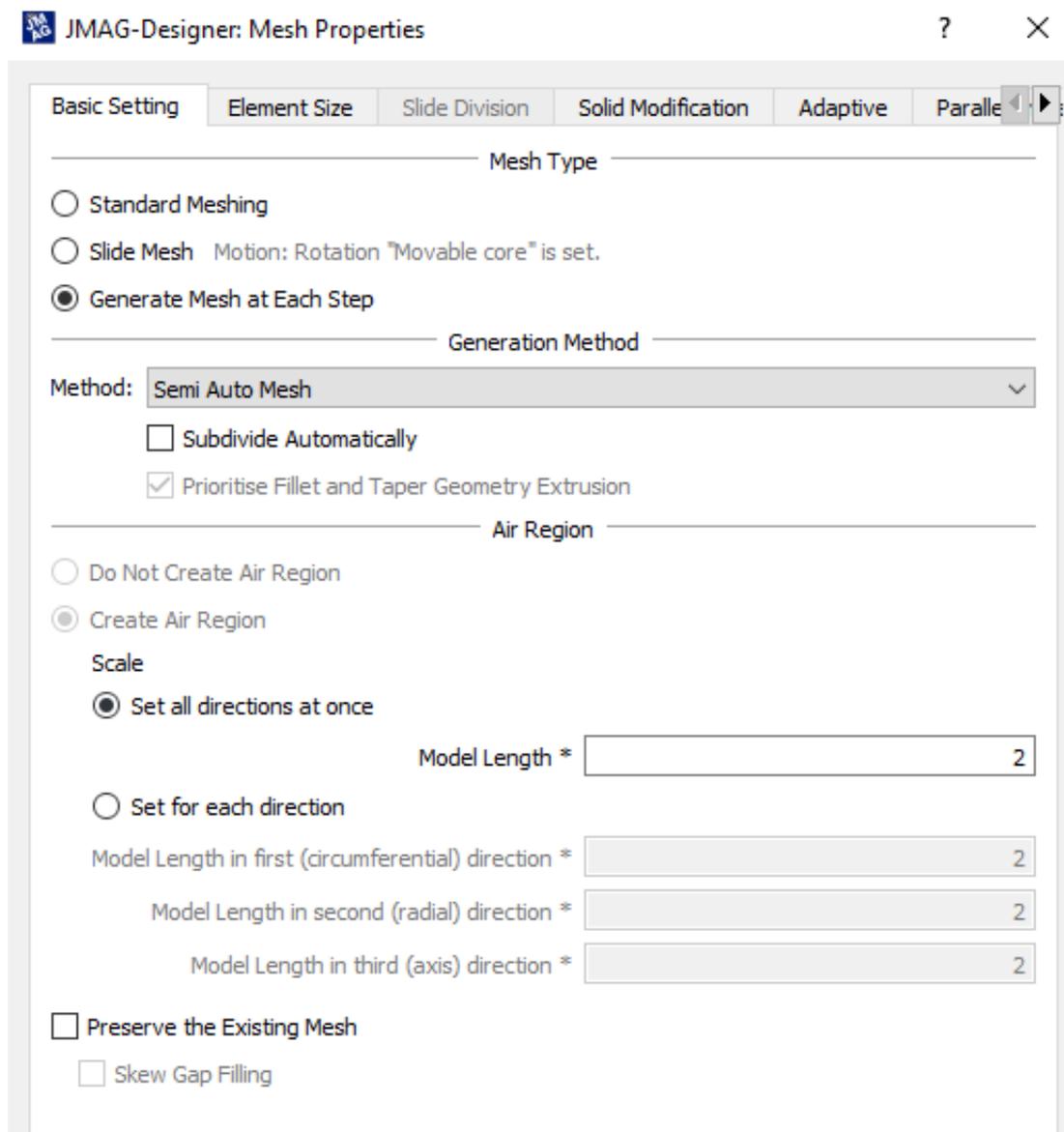
Help...
OK
Cancel

5.4 Condición de FEM Coil



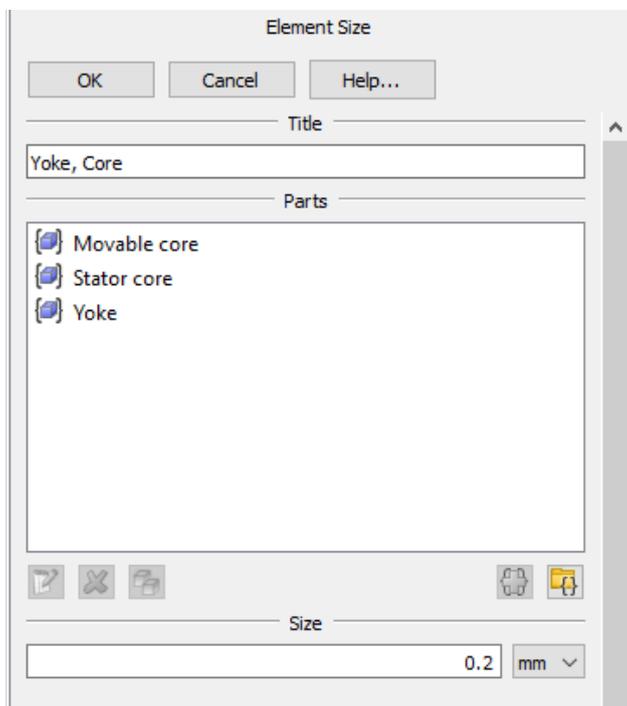
6 Generación del mallado

6.1 Ajustes básicos del mallado

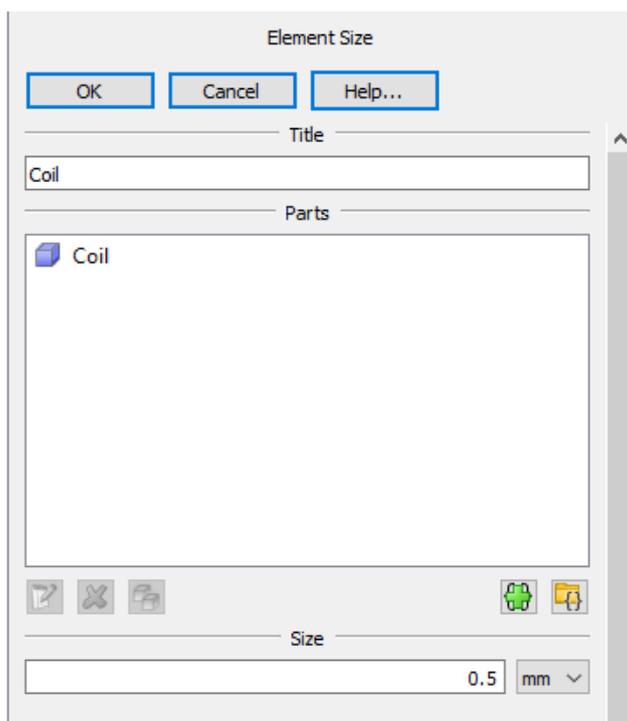


6.2 Control del tamaño del mallado

6.2.1 Componentes ferromagnéticos

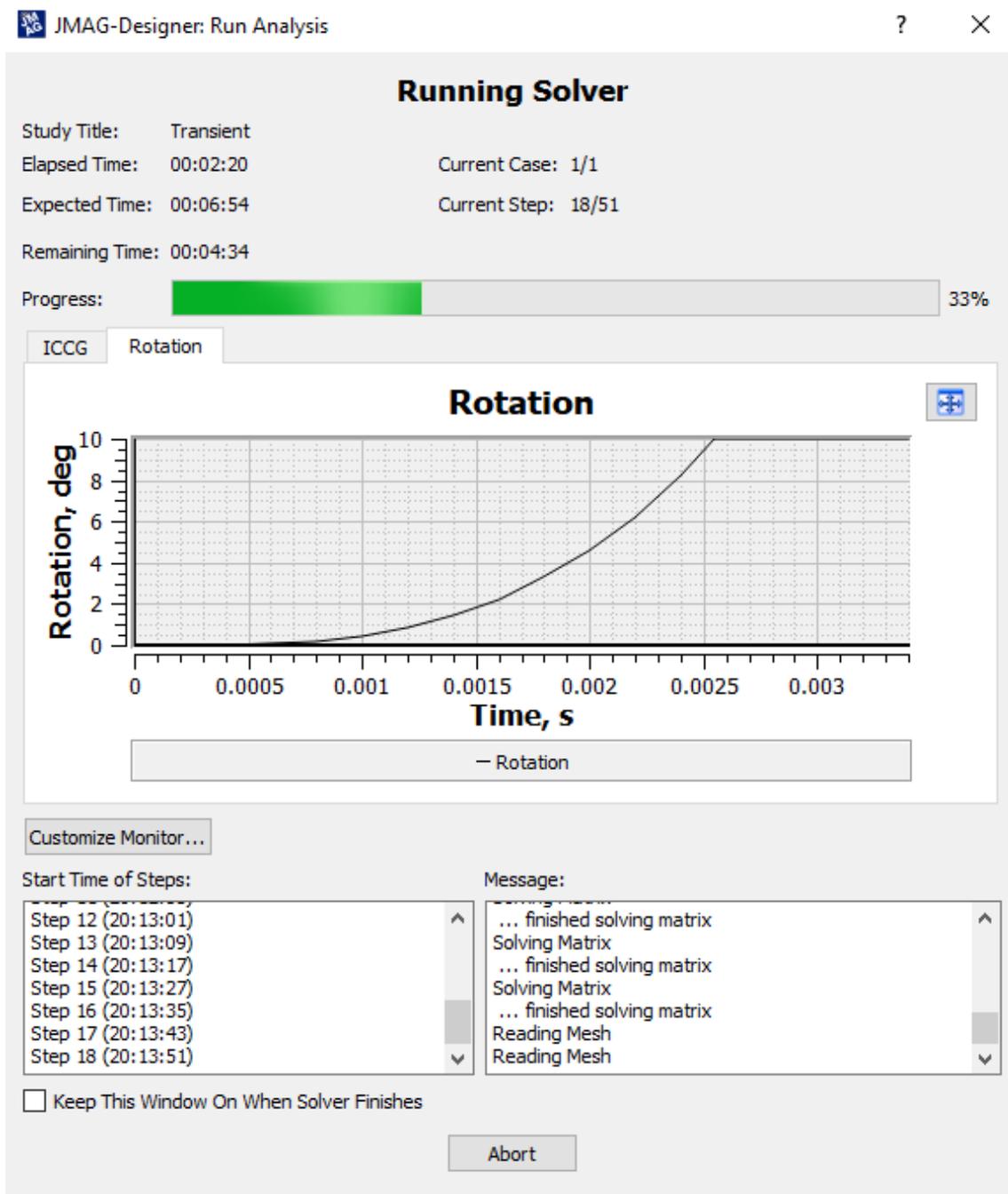


6.2.2 Bobina

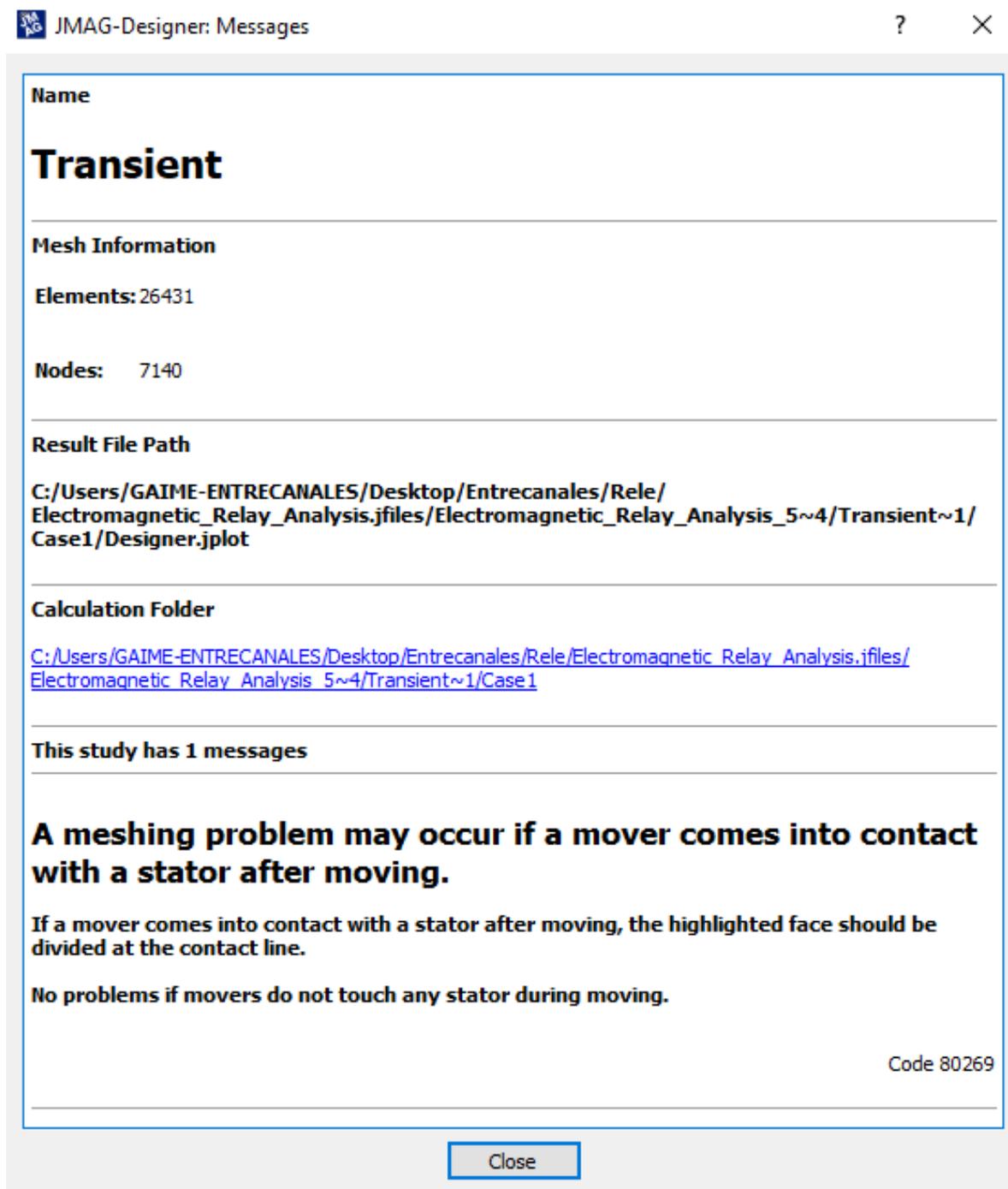


7 Primera simulación

7.1 Ventana informativa sobre el estado de la simulación



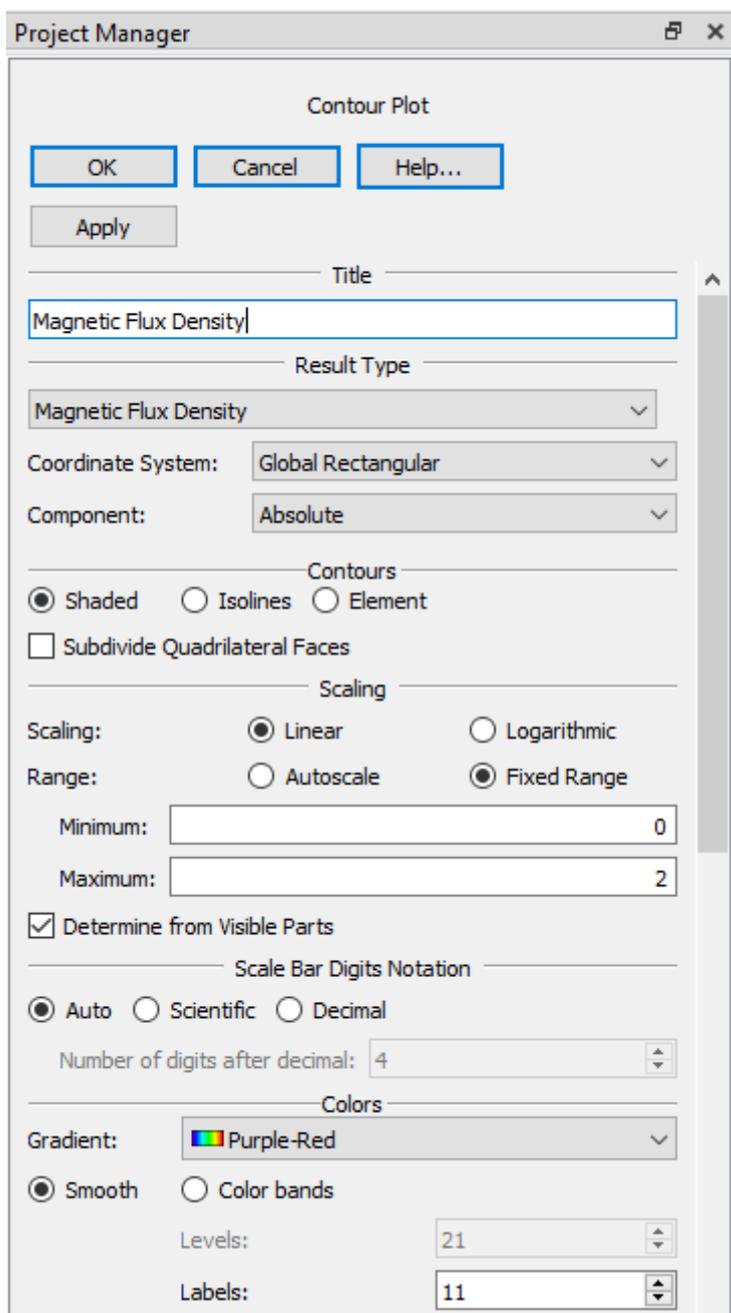
7.2 Ventana emergente tras finalizar la simulación



7.3 Resultados obtenidos

7.3.1 Gráfico tipo *Contour Plot* de la densidad de flujo magnético

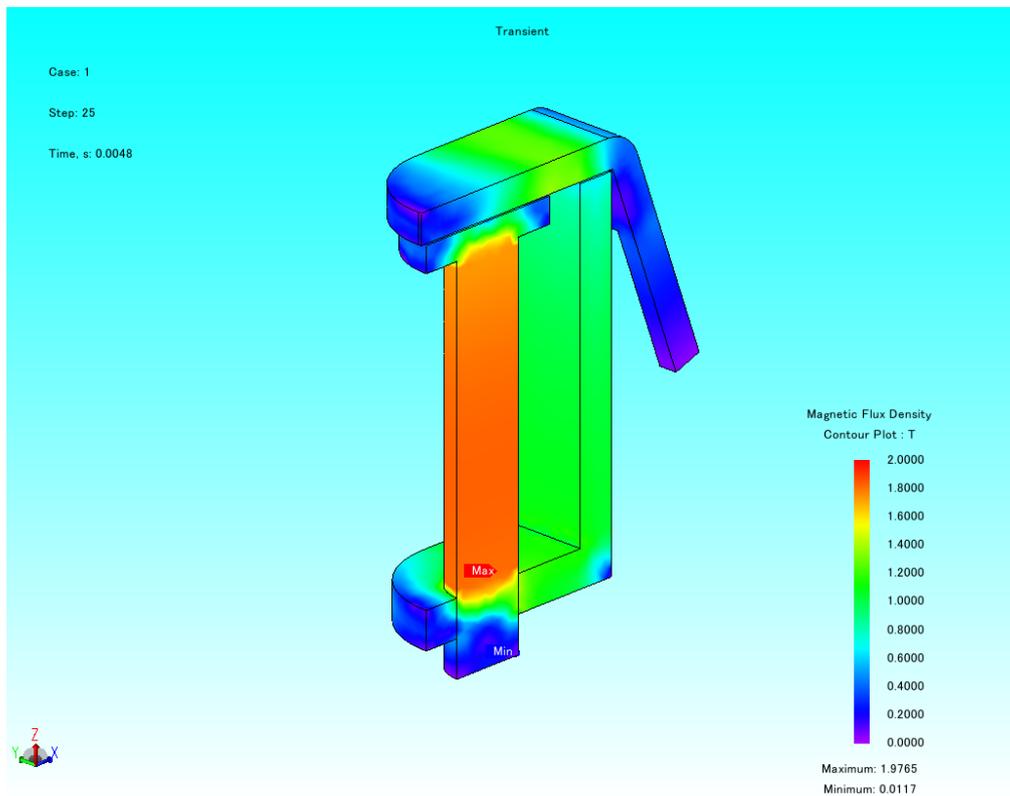
Parámetros seleccionados para la representación



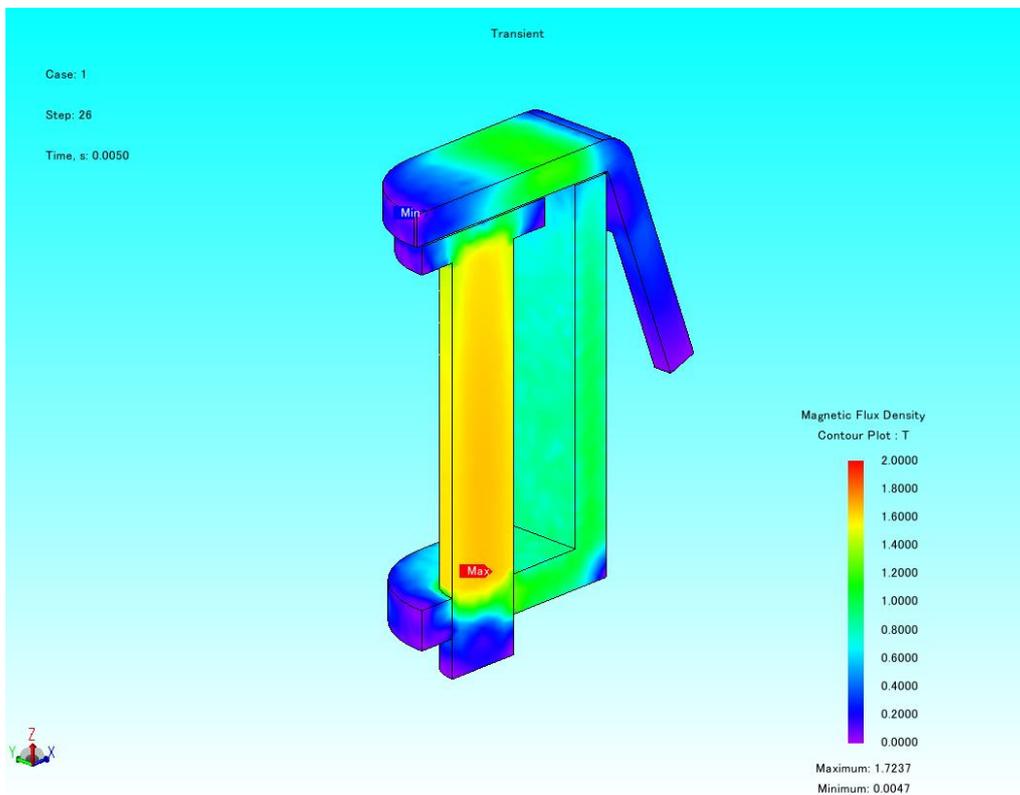
The image shows a 'Project Manager' dialog box for a 'Contour Plot'. The dialog is titled 'Project Manager' and has a close button (X) in the top right corner. The main content area is titled 'Contour Plot' and contains several sections of settings:

- Title:** A text field containing 'Magnetic Flux Density'.
- Result Type:** A dropdown menu set to 'Magnetic Flux Density'.
- Coordinate System:** A dropdown menu set to 'Global Rectangular'.
- Component:** A dropdown menu set to 'Absolute'.
- Contours:** Three radio buttons: 'Shaded' (selected), 'Isolines', and 'Element'. Below them is a checkbox for 'Subdivide Quadrilateral Faces' which is unchecked.
- Scaling:** Two radio buttons for 'Scaling': 'Linear' (selected) and 'Logarithmic'. Below them are two radio buttons for 'Range': 'Autoscale' and 'Fixed Range' (selected). Under 'Fixed Range', there are two text fields: 'Minimum:' with the value '0' and 'Maximum:' with the value '2'.
- Scale Bar Digits Notation:** A checkbox for 'Determine from Visible Parts' which is checked. Below it are three radio buttons: 'Auto' (selected), 'Scientific', and 'Decimal'. A text field for 'Number of digits after decimal:' contains the value '4'.
- Colors:** A dropdown menu for 'Gradient:' set to 'Purple-Red'. Below it are two radio buttons: 'Smooth' (selected) and 'Color bands'. At the bottom, there are two text fields: 'Levels:' with the value '21' and 'Labels:' with the value '11'.

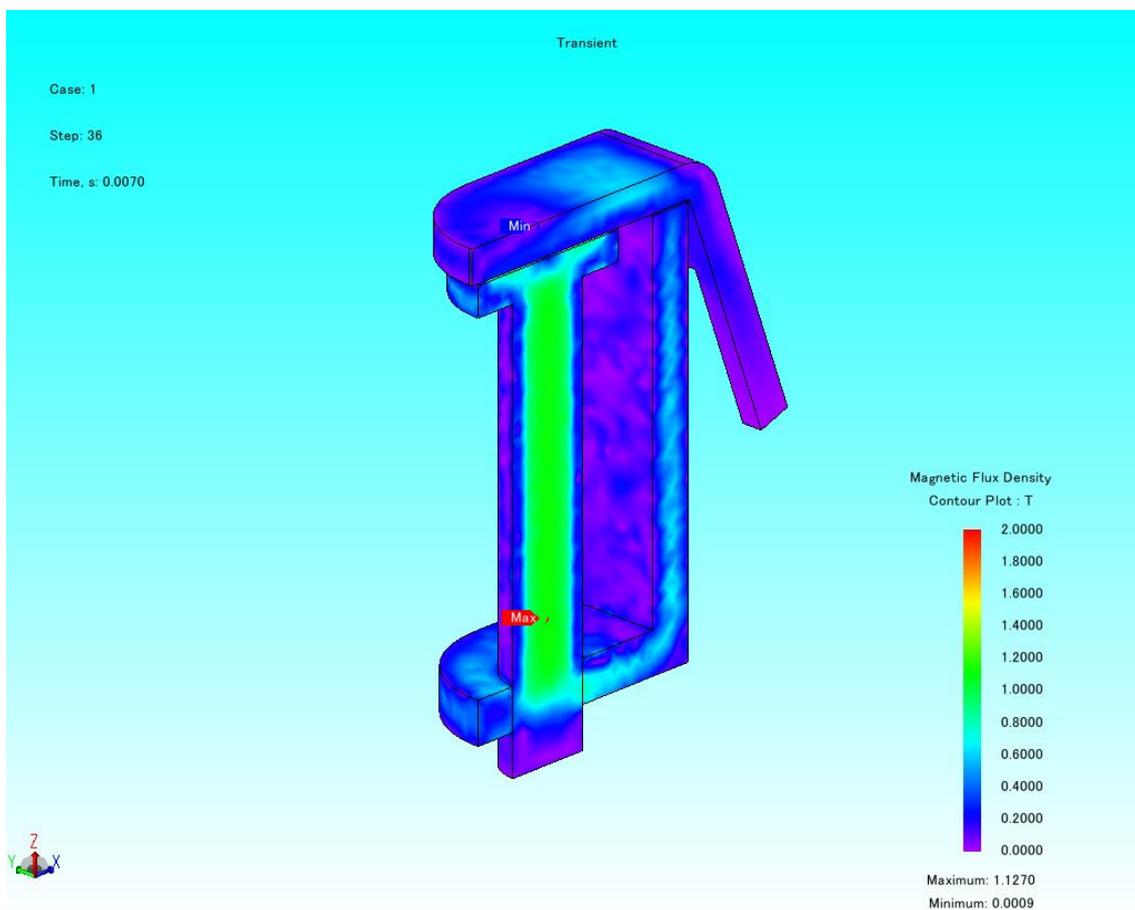
Densidad de flujo magnético en el instante previo a la apertura del circuito (paso 25)



Densidad de flujo magnético en el instante posterior a la apertura del circuito (paso 26)

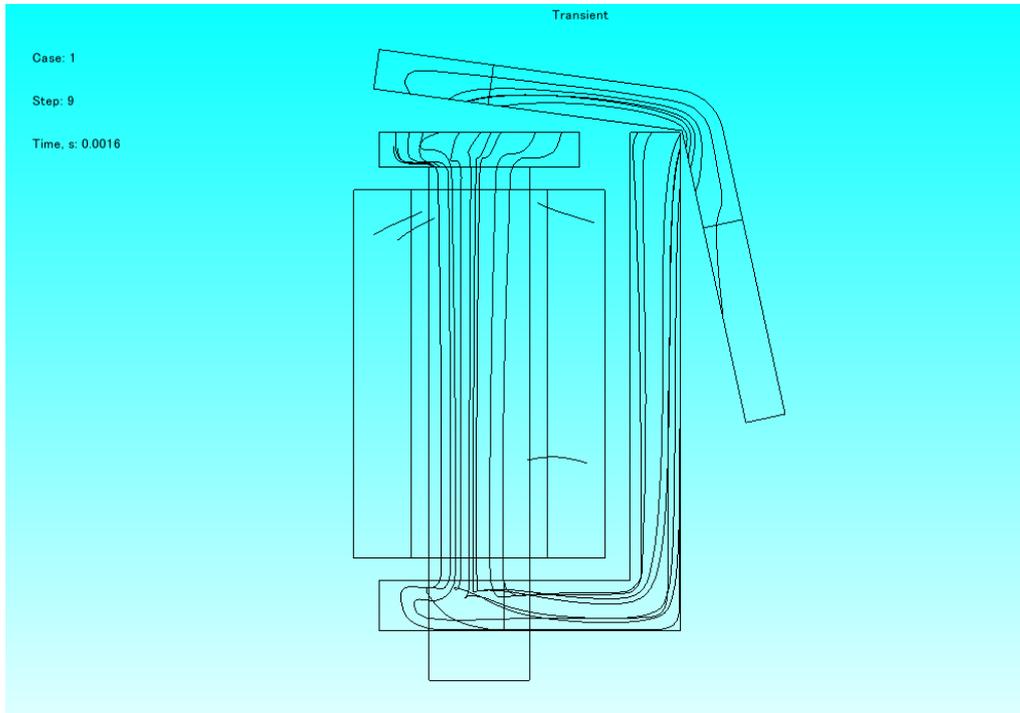


Densidad de flujo magnético en el instante previo al comienzo del regreso del núcleo móvil a su posición inicial (paso 36)

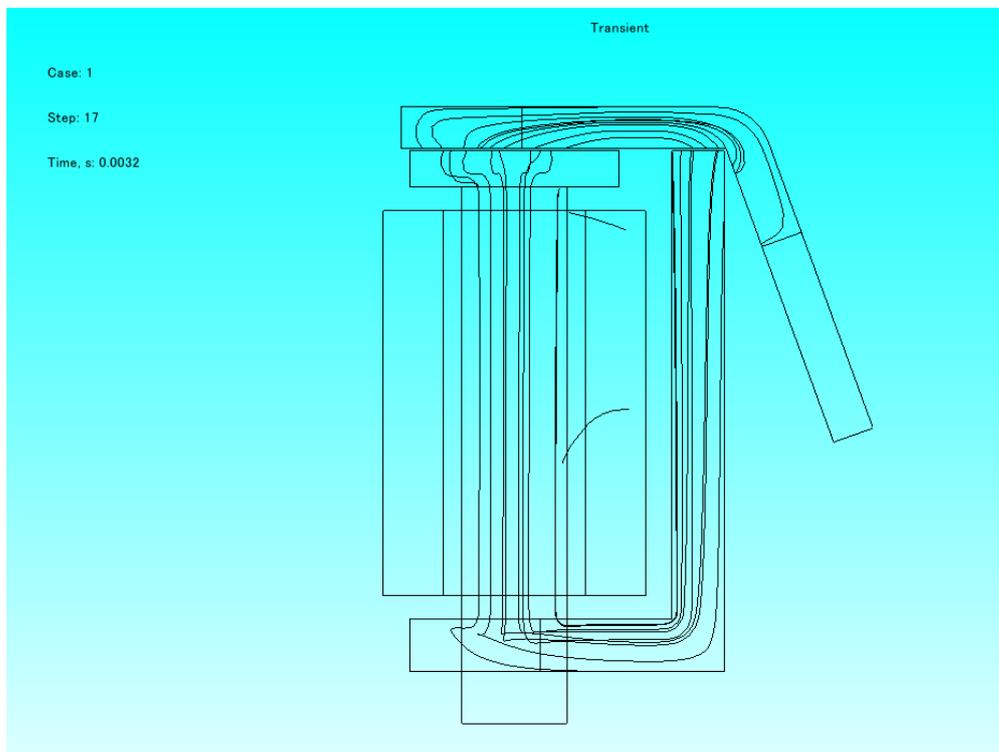


7.3.2 Grafica tipo *Flux Lines* para las líneas de flujo magnético

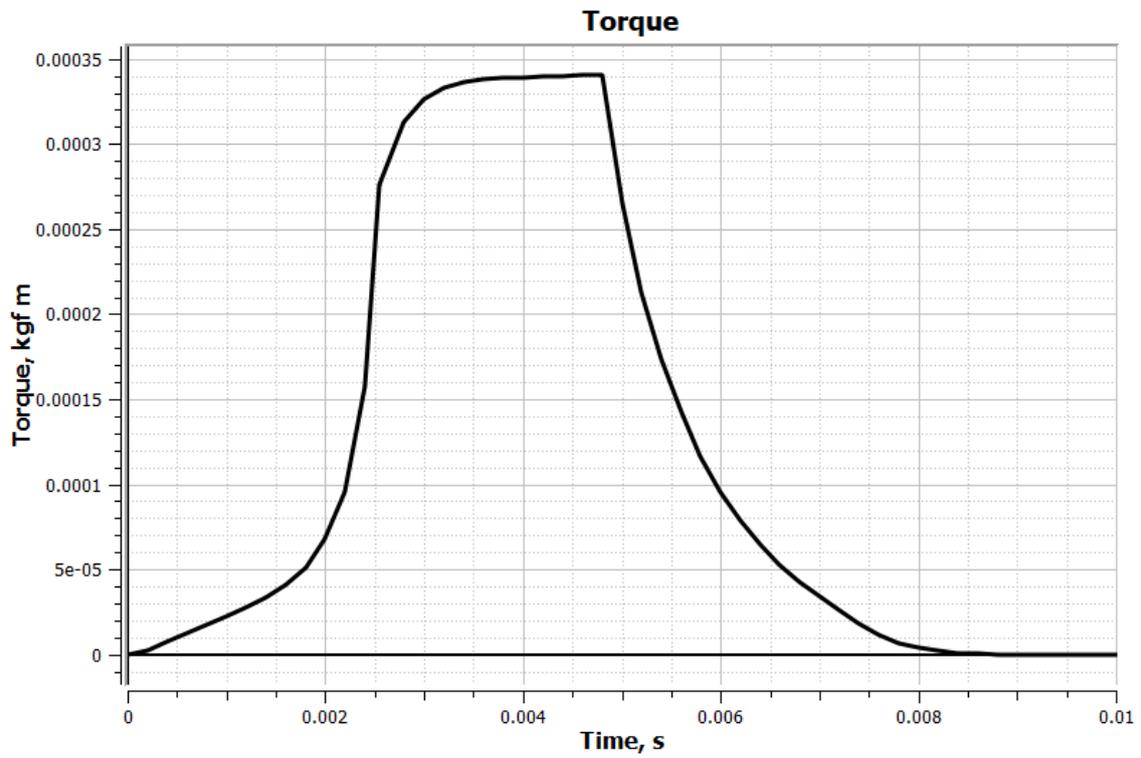
Durante la magnetización del núcleo



Tras completar el núcleo móvil su rango de movimiento

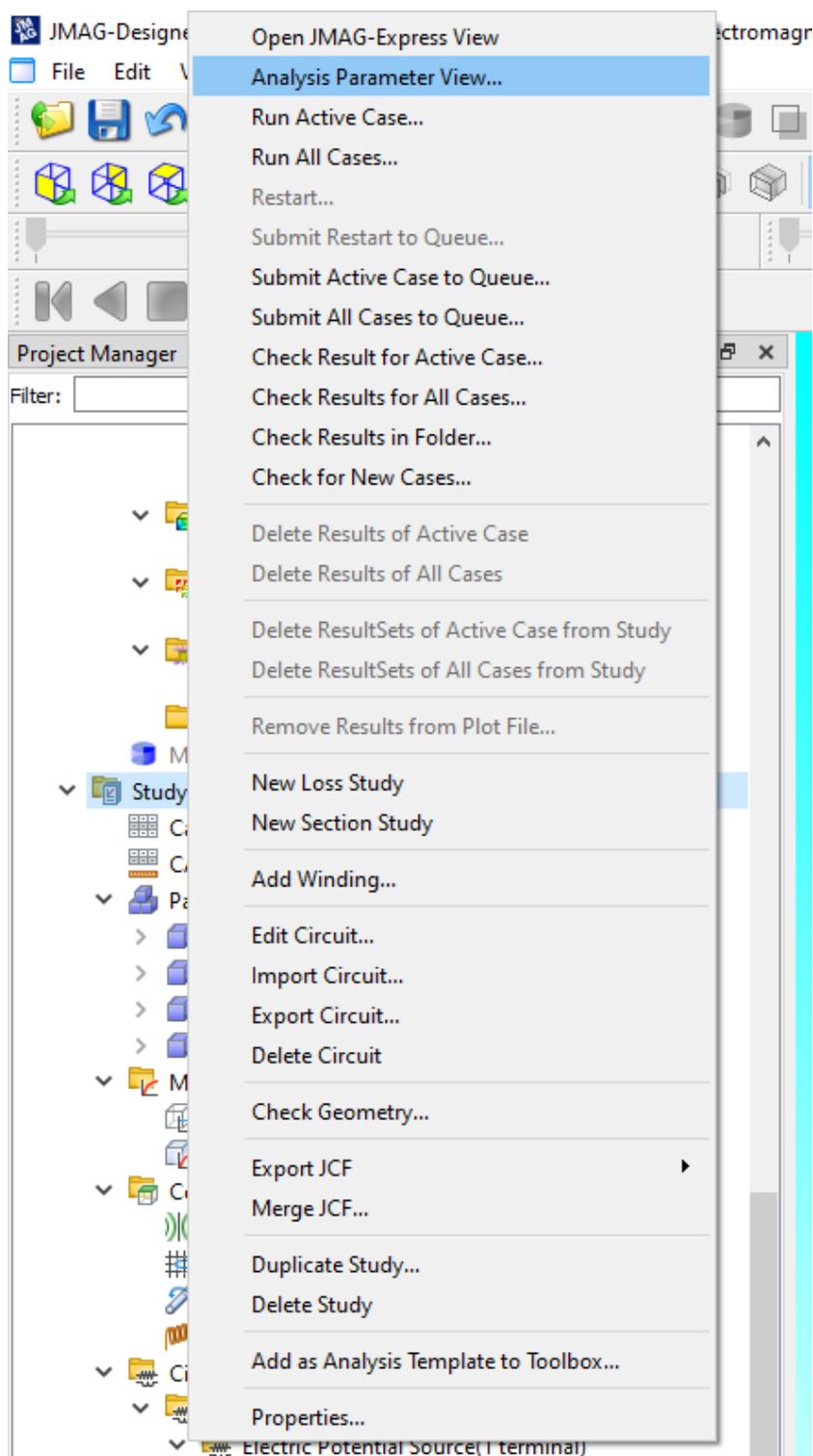


7.3.3 Gráfico tipo *Graph* para la variación del par con el tiempo

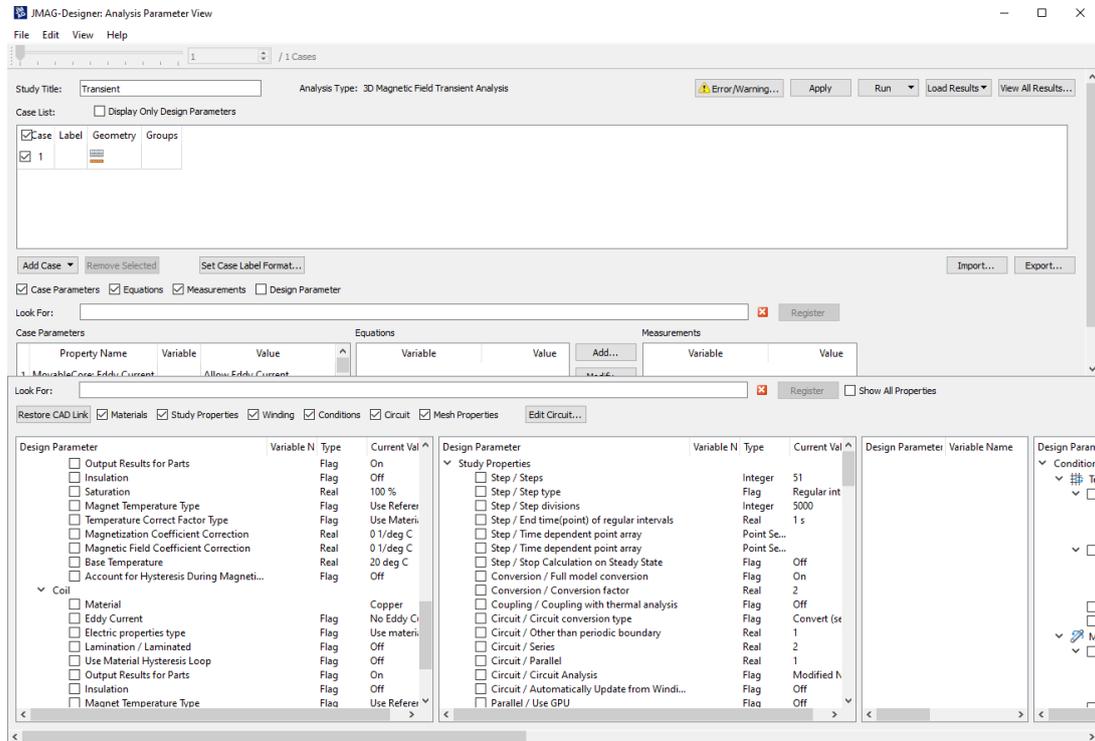


8 Estudio de la influencia de las corrientes parásitas

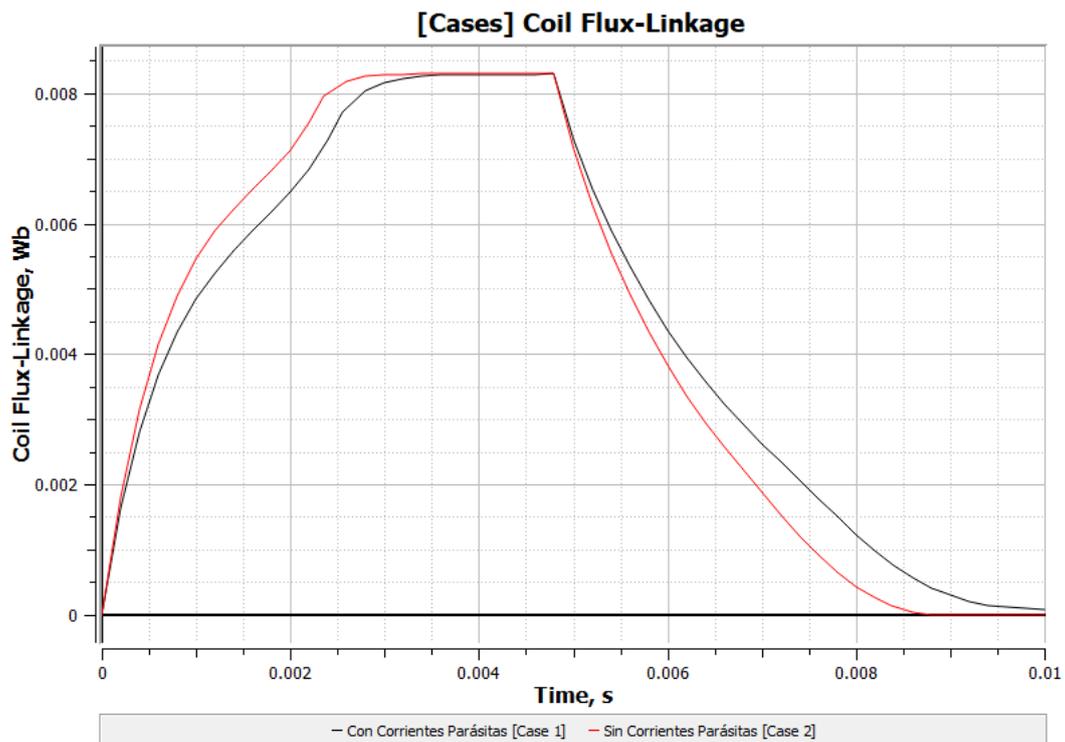
8.1 Apertura del menú de configuración del análisis paramétrico



8.2 Ventana para la configuración del análisis paramétrico



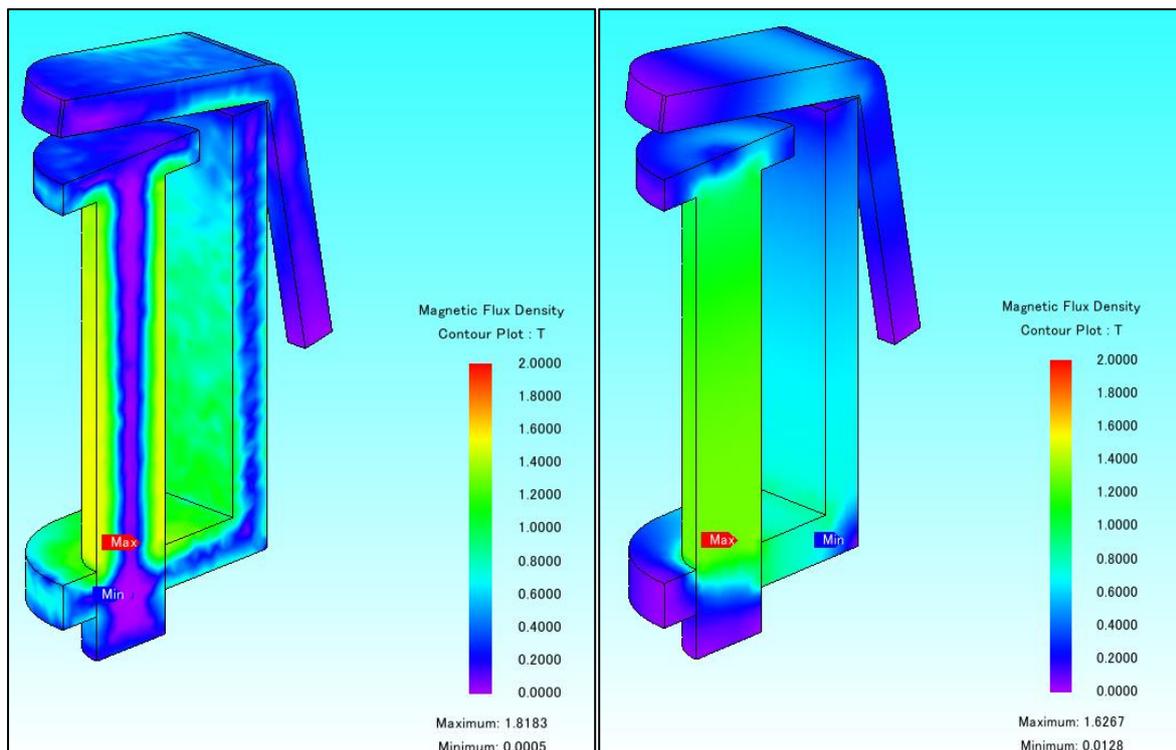
8.3 Gráfico del flujo magnético a través de la bobina



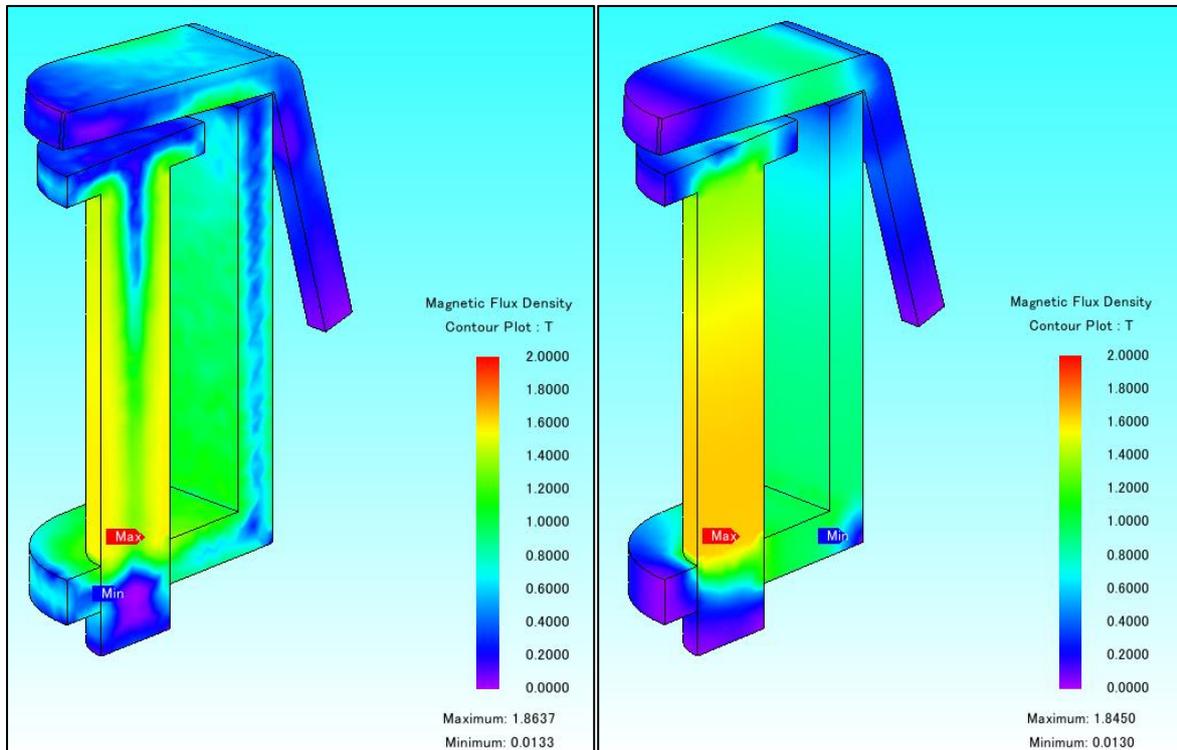
8.4 Gráfico tipo *Contour Plot* para la comparación de la densidad de flujo magnético en distintos instantes

Se sitúan en el lado izquierdo los gráficos pertenecientes al primer caso (con corrientes parásitas) y en el lado derecho los gráficos del segundo caso (sin corrientes parásitas).

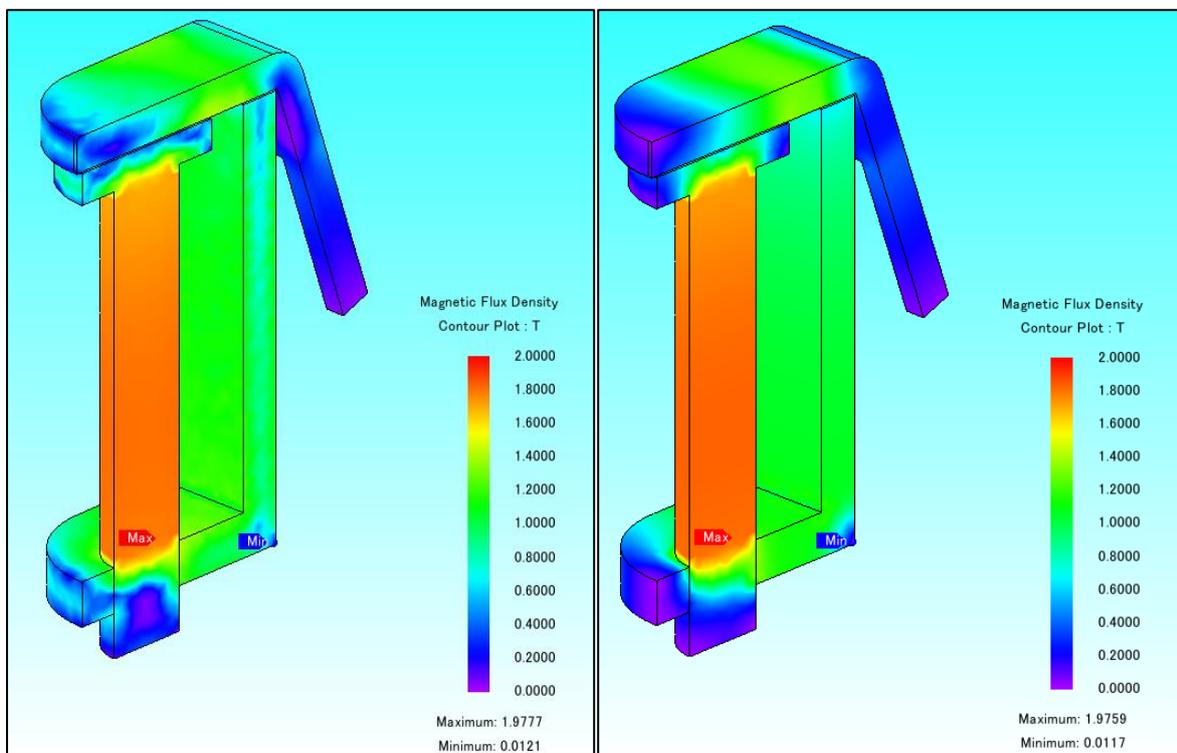
En el instante $t = 1$ ms



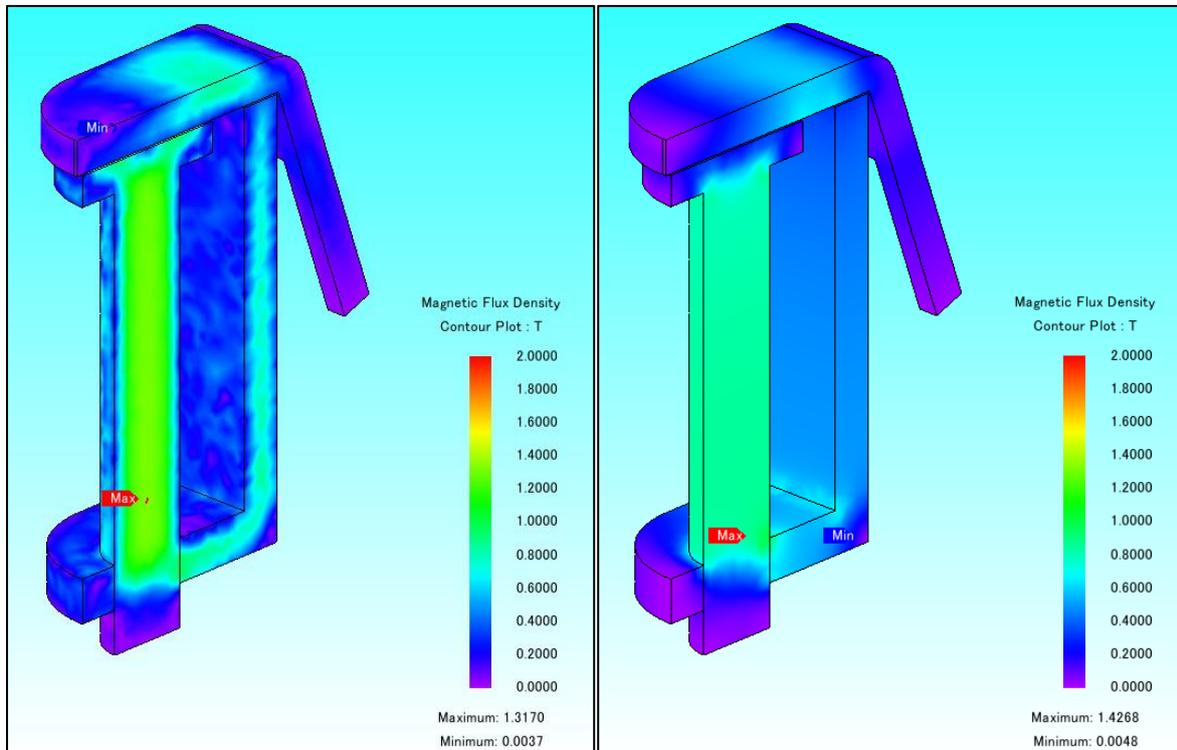
En el instante t = 2 ms



En el instante t = 3 ms

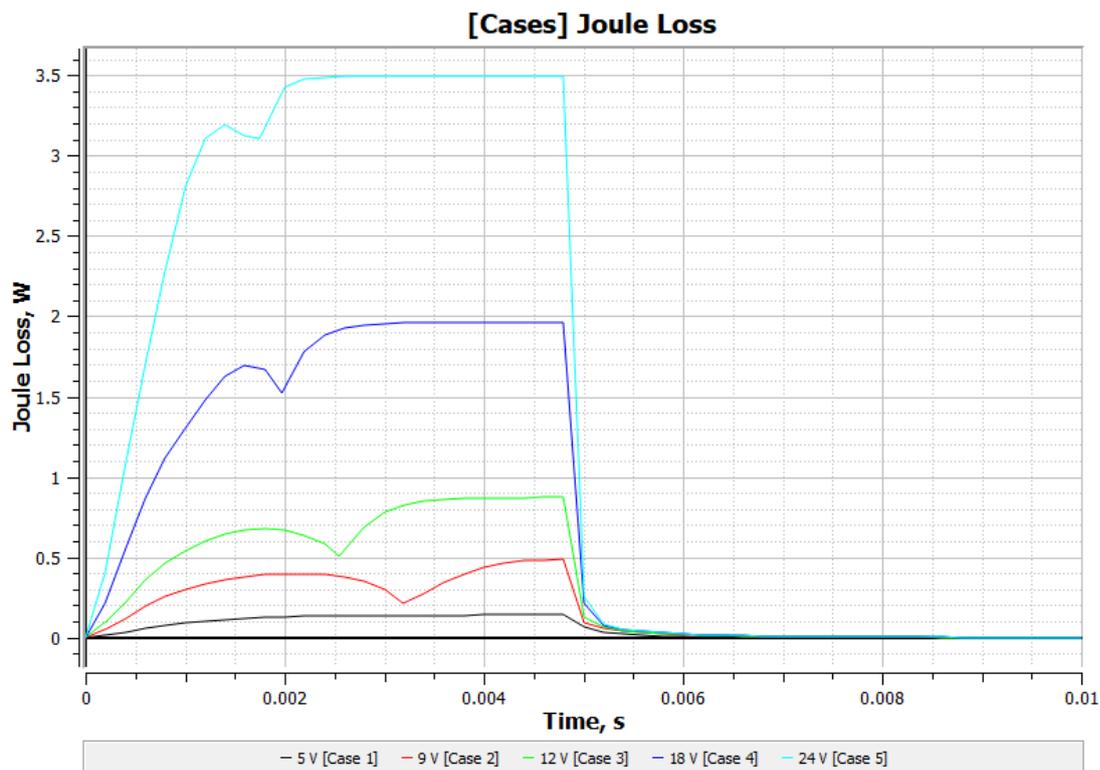


En el instante t = 6 ms

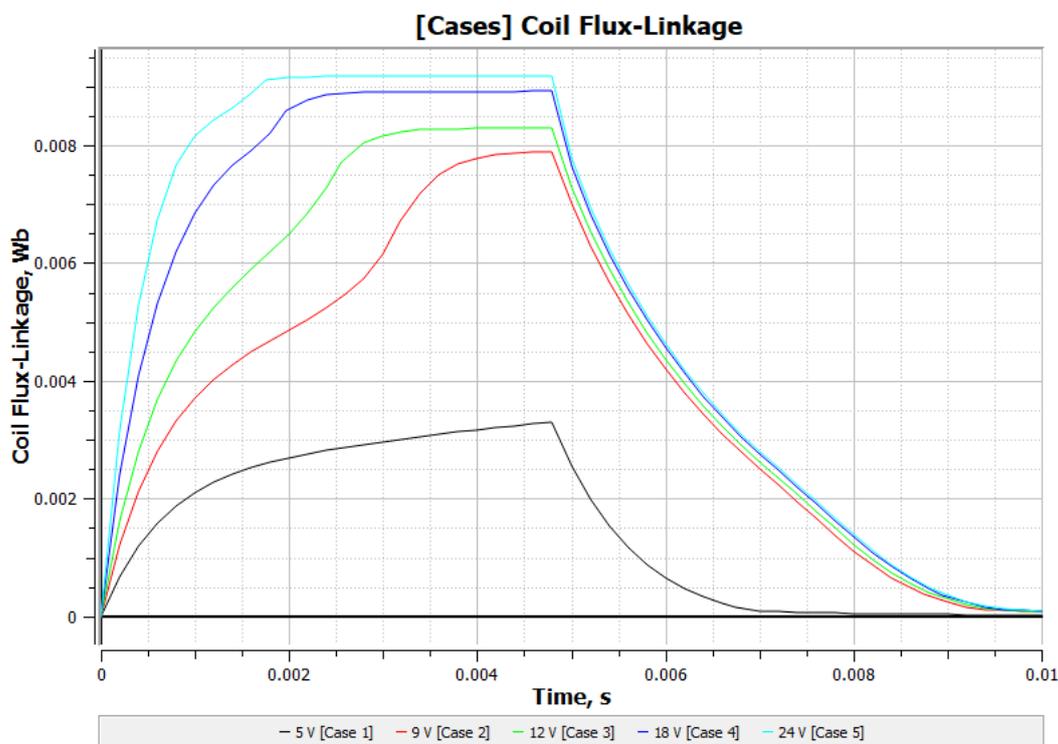


9 Estudio de la influencia de la tensión de alimentación

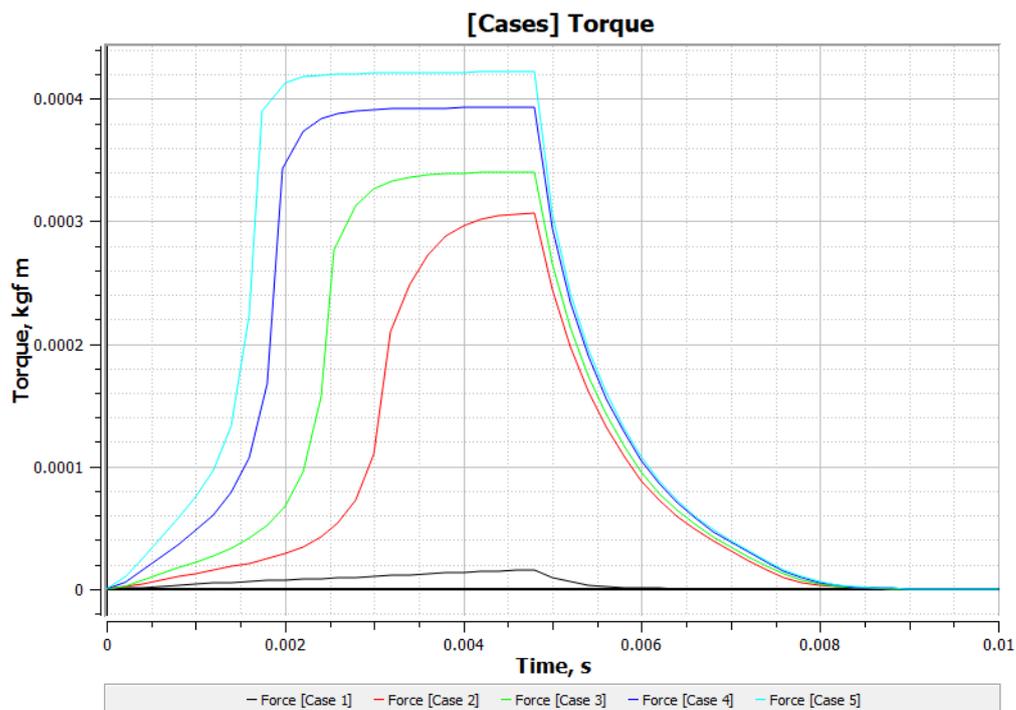
9.1 Gráfico comparativo de las pérdidas por efecto Joule en la bobina



9.2 Gráfico comparativo del flujo magnético a través de la bobina

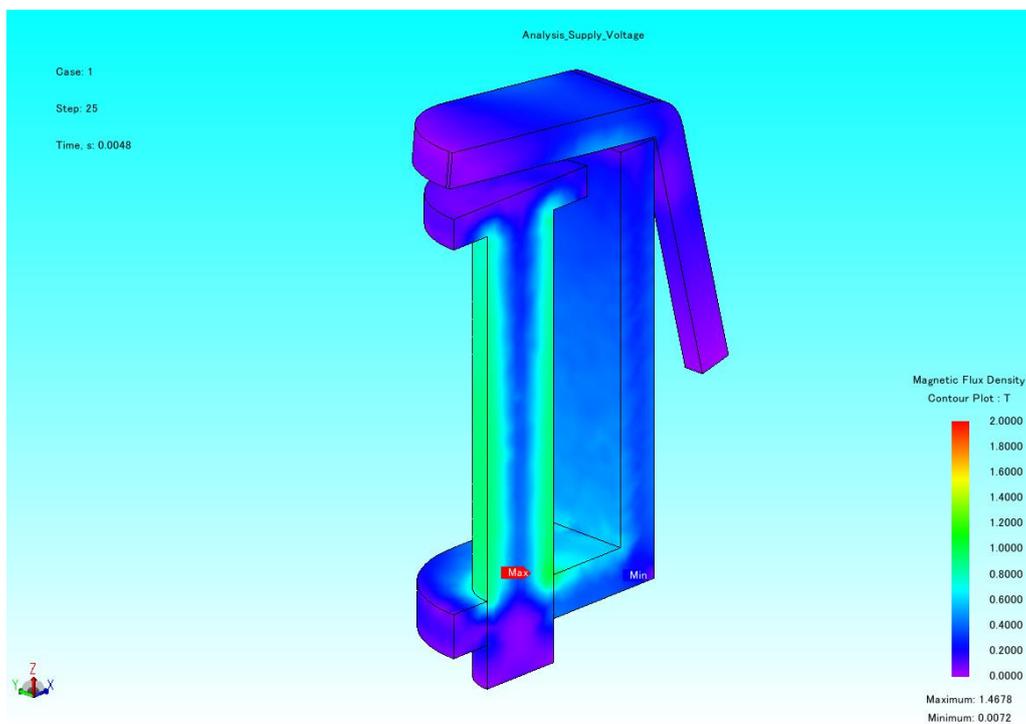


9.3 Gráfico comparativo del par de rotación en el núcleo móvil

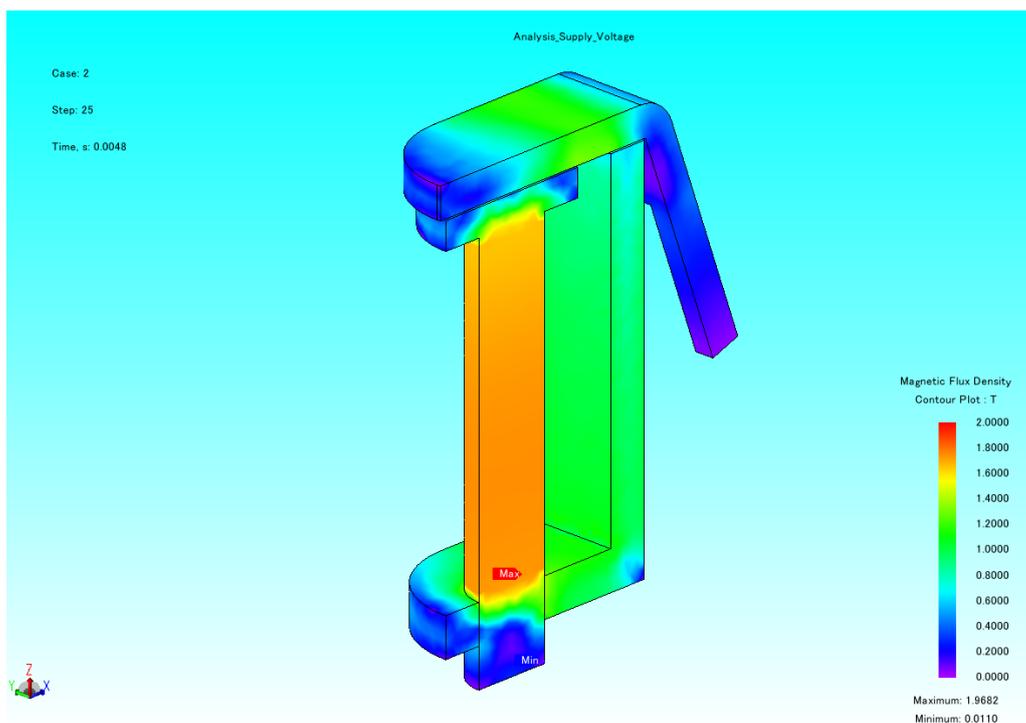


9.4 Gráfico tipo *Contour Plot* para la comparación de la densidad de flujo magnético según la tensión de alimentación

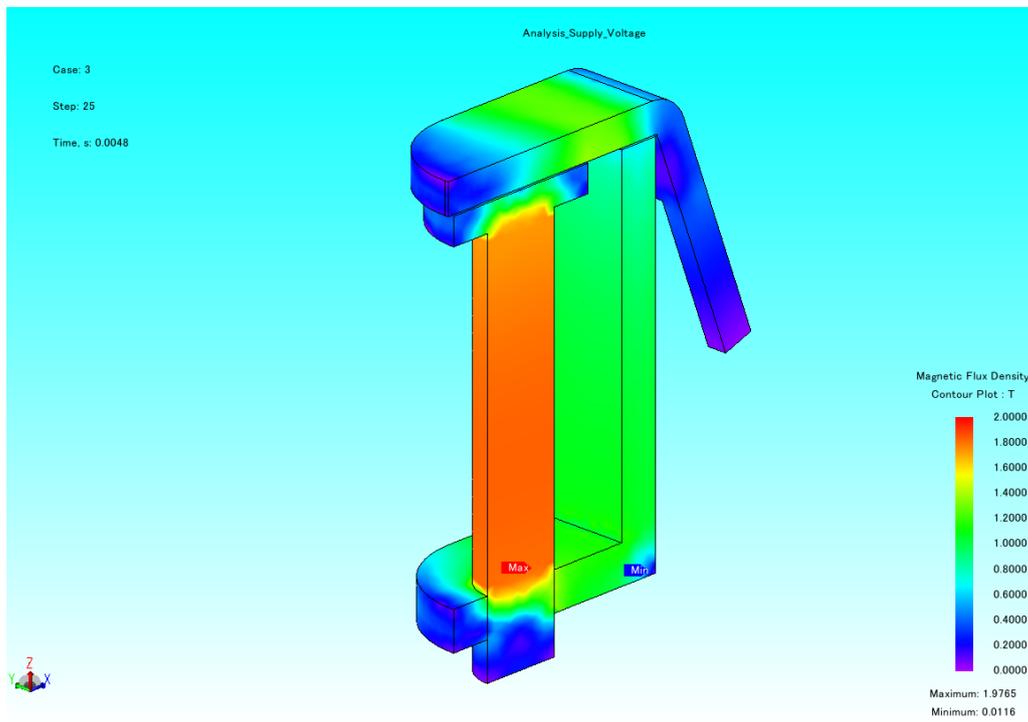
Tensión de alimentación de 5 V



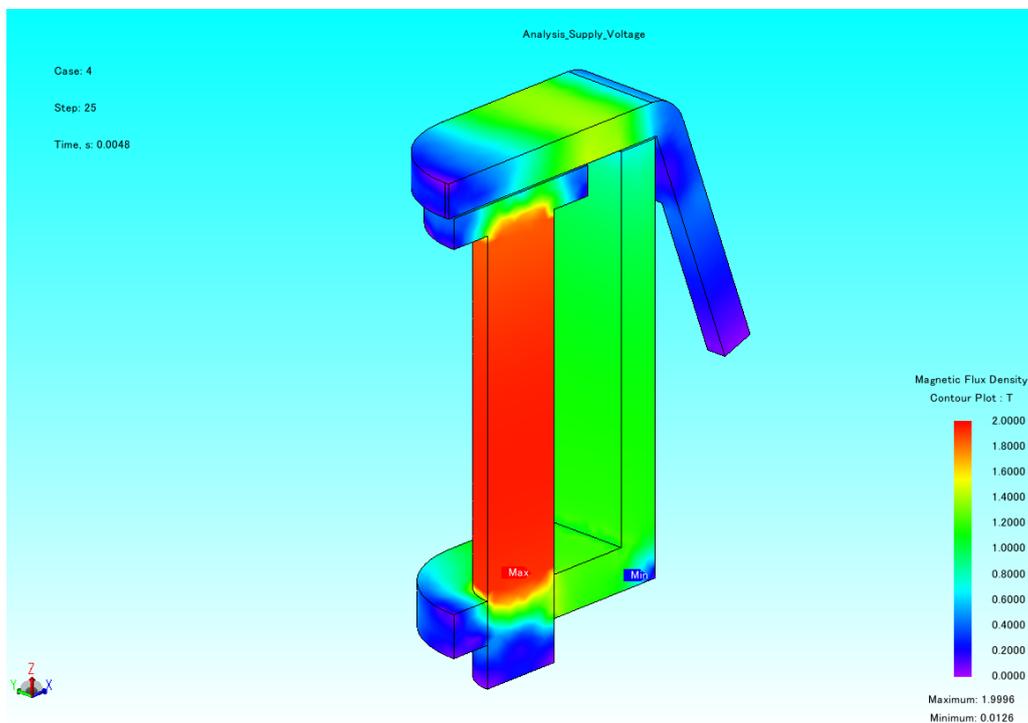
Tensión de alimentación de 9 V



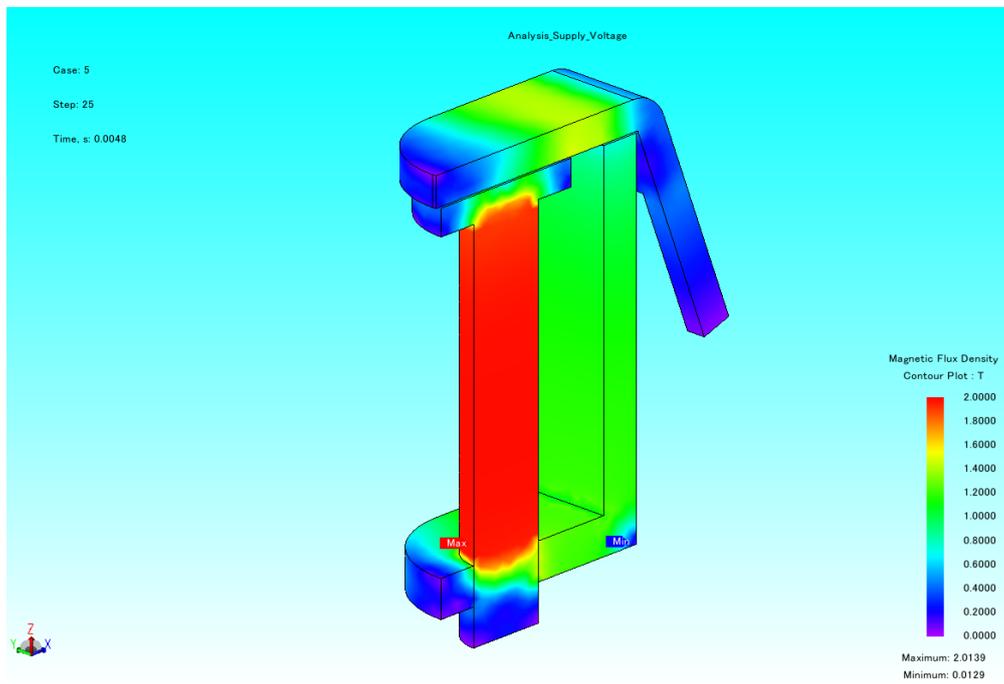
Tensión de alimentación de 12 V



Tensión de alimentación de 18 V

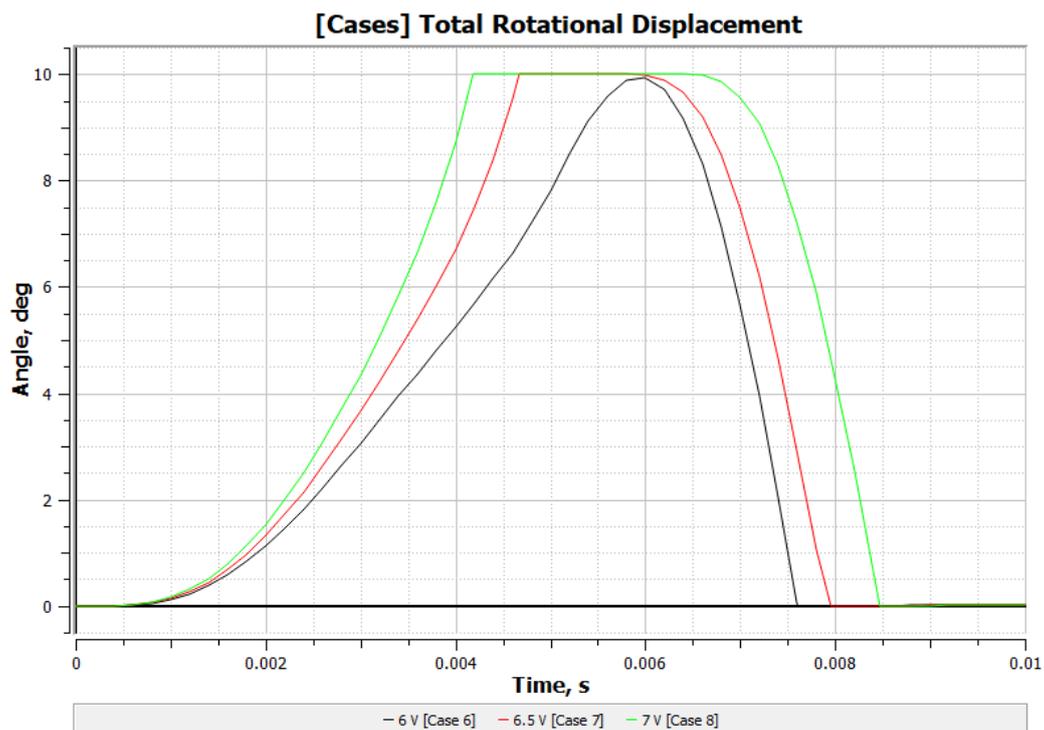


Tensión de alimentación de 24 V

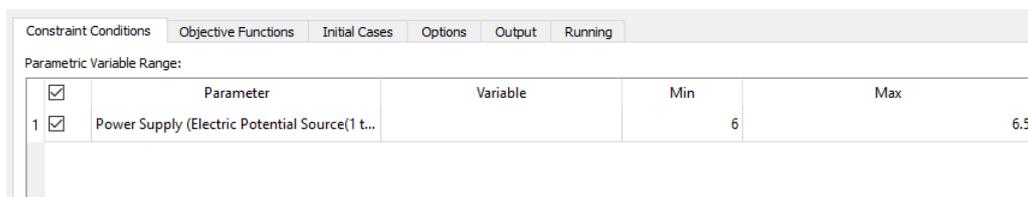


9.5 Cálculo de la tensión mínima de activación del relé (*pick-up voltage*)

9.5.1 Análisis paramétrico para definir el rango de valores de la optimización

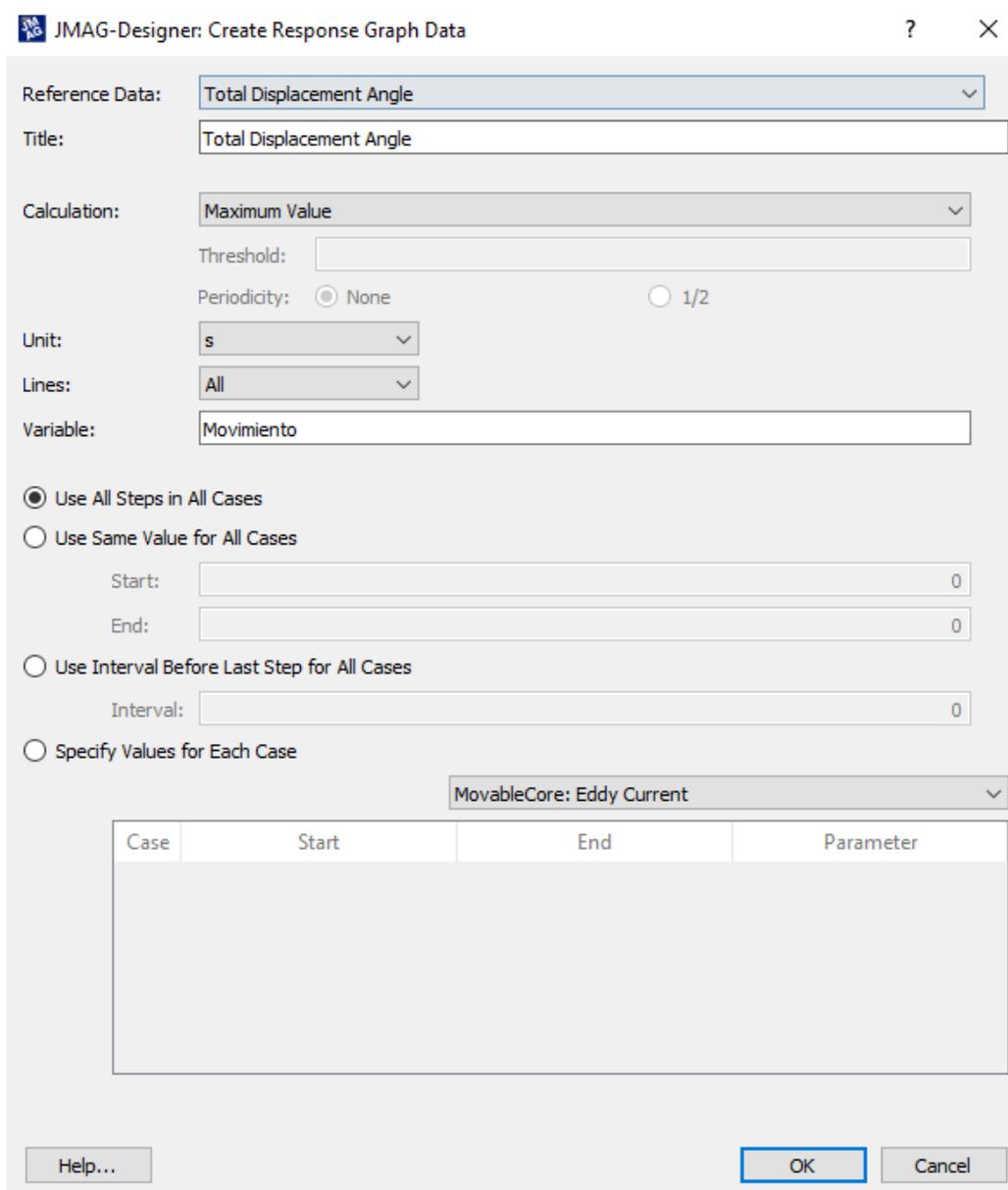


9.5.2 Definición del rango de valores para la parametrización de la tensión



9.5.3 Selección de las variables para las funciones objetivo de la simulación

Ángulo de rotación del núcleo móvil



Corriente eléctrica que circula por la bobina

JMAG-Designer: Create Response Graph Data ? X

Reference Data: Circuit Current v

Title: Circuit Current

Calculation: Simple Average v

Threshold:

Periodicity: None 1/2

Unit: s v

Lines: All v

Variable: Corriente

Use All Steps in All Cases

Use Same Value for All Cases

Start: 0

End: 0

Use Interval Before Last Step for All Cases

Interval: 0

Specify Values for Each Case

Power Supply (Electric Potential Source(1 terminal)): Constant v

Case	Start	End	Parameter

Help...
OK
Cancel

9.5.4 Definición de las funciones objetivo de la optimización

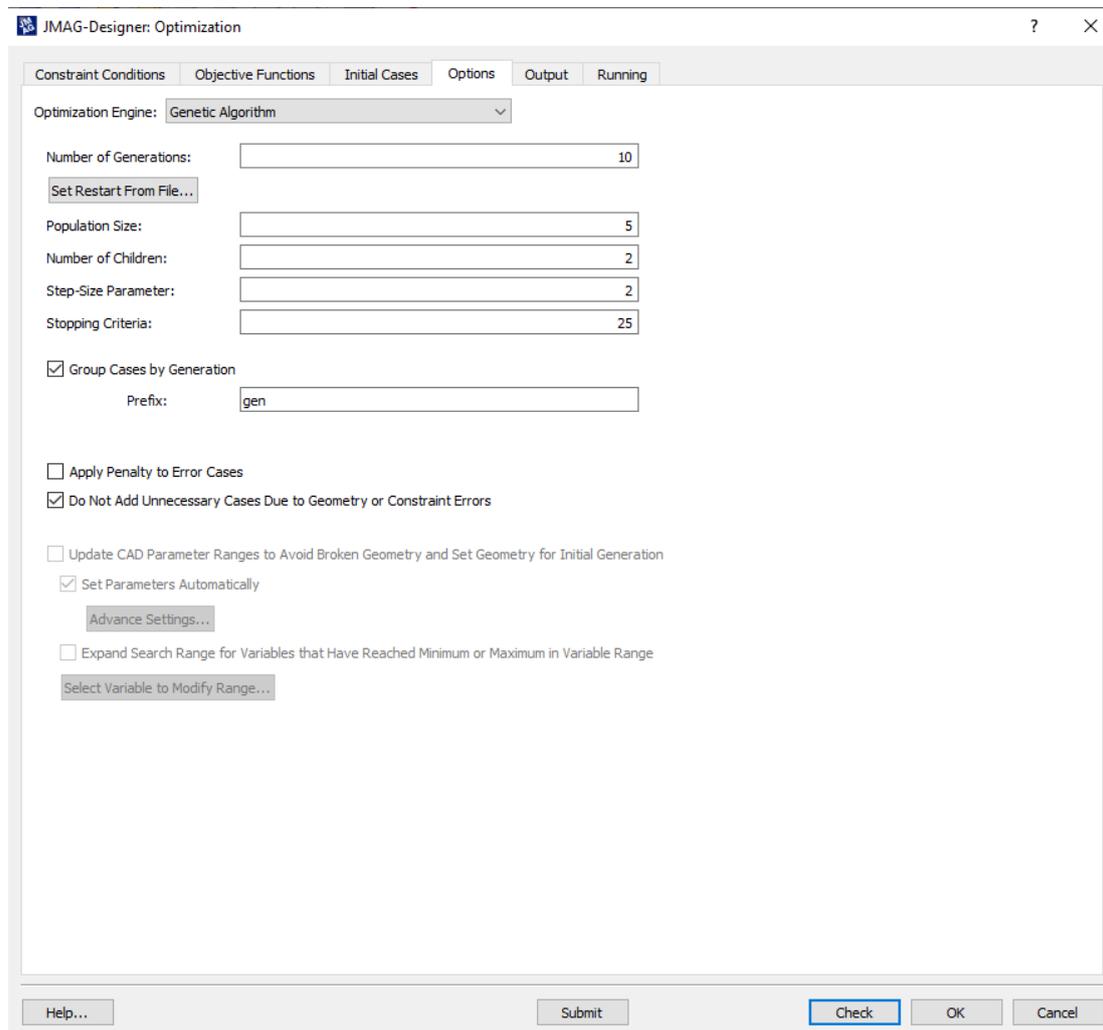
The screenshot shows the 'Objective Functions' tab in a software interface. At the top, there are tabs for 'Constraint Conditions', 'Objective Functions', 'Initial Cases', 'Options', 'Output', and 'Running'. Below these, the 'Response Data Variables' section contains a tree view with 'Total Displacement Angle<Mo...' and 'Circuit Current<Corriente>' (expanded to show 'Coil1', 'Diode', and 'Switch').

The 'Objective Functions' section contains a table with the following data:

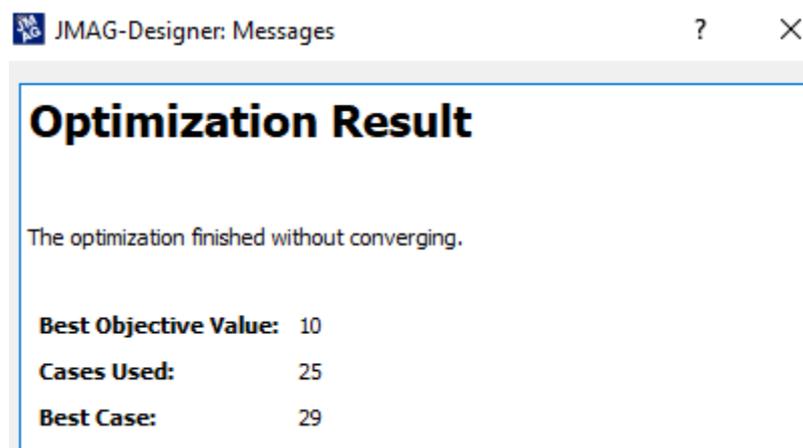
	Parameter	Expression	Type	Value	Weight
1	CondCorr	Corriente1	Minimize	---	1
2	CondMov	Movimiento	=	10	1

Buttons for 'Add...', 'Modify...', and 'Remove' are present below both the response data variables and the objective functions table. At the bottom of the window, there are 'Help...', 'Submit', 'Check', 'OK', and 'Cancel' buttons.

9.5.5 Configuración de las opciones de la optimización



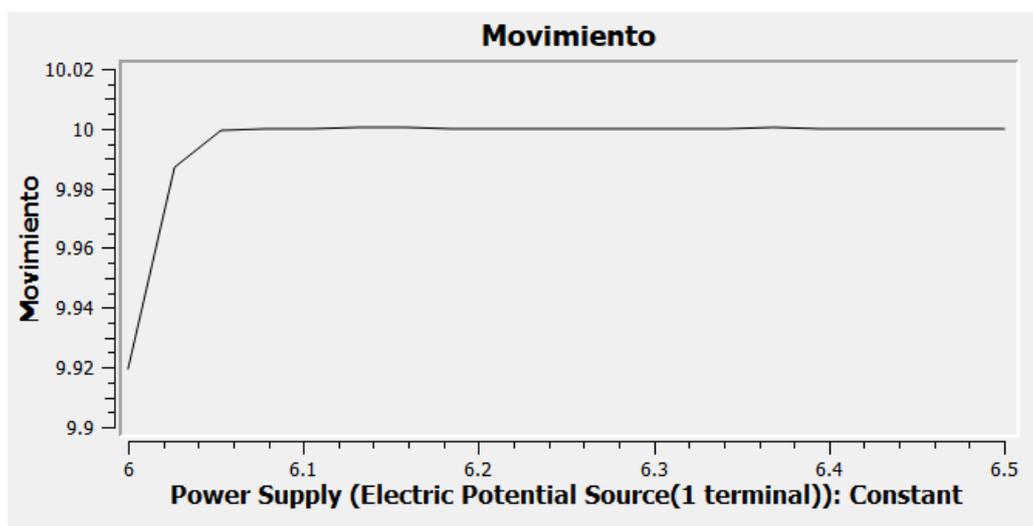
9.5.6 Ventana mostrada tras finalizar la optimización



9.5.7 Resultados de la optimización

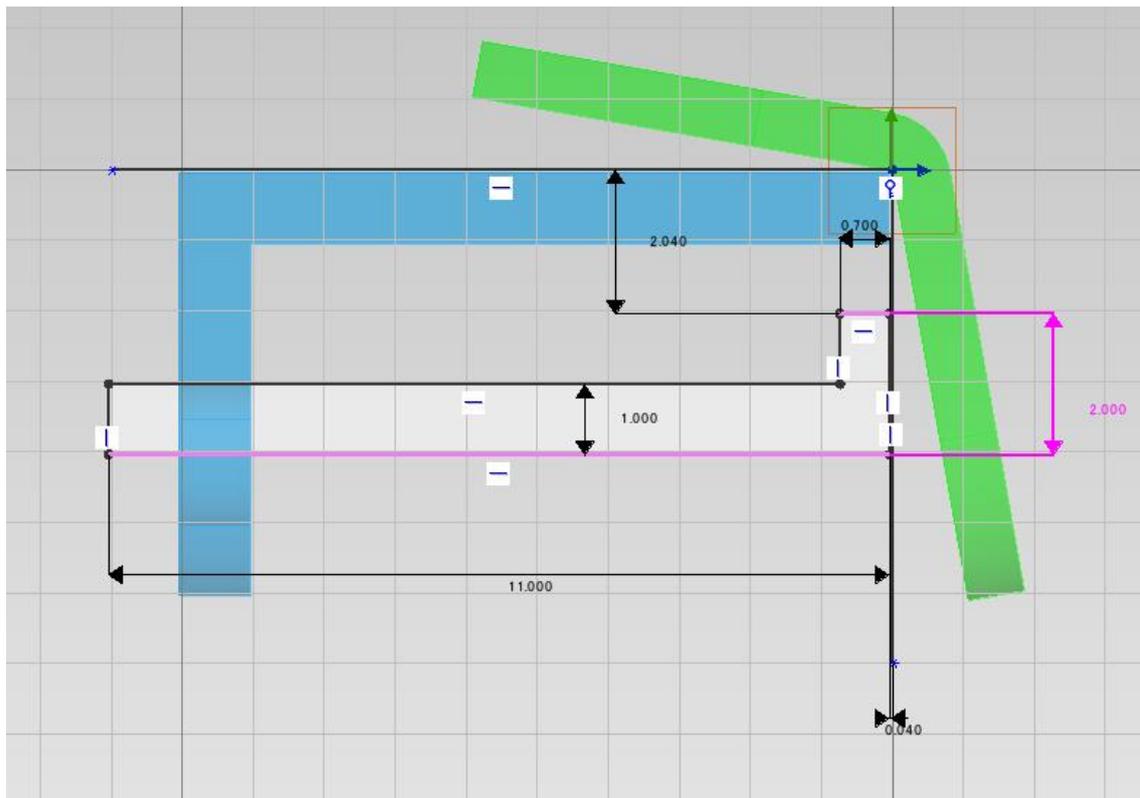
	Desplazamiento (°)	Tensión de alimentación (V)
Case 1	9.919799016	6
Case 2	10	6.5
Case 3	10	6.456497444
Case 4	10	6.217643763
Case 5	10	6.291556921
Case 6	10	6.47944962
Case 7	10	6.484901679
Case 8	10	6.25606224
Case 9	10	6.204427374
Case 10	10	6.239777899
Case 11	10	6.254519104
Case 12	10	6.23018632
Case 13	10	6.228829792
Case 14	10	6.072827394
Case 15	10	6.248719304
Case 16	10	6.101151705
Case 17	10	6.419248913
Case 18	10	6.242203128
Case 19	10	6.074754352
Case 20	10	6.073121943
Case 21	10	6.073034291
Case 22	10	6.072920606
Case 23	10	6.074911233
Case 24	10	6.070466614

9.5.8 Valores del desplazamiento angular para cada valor de tensión

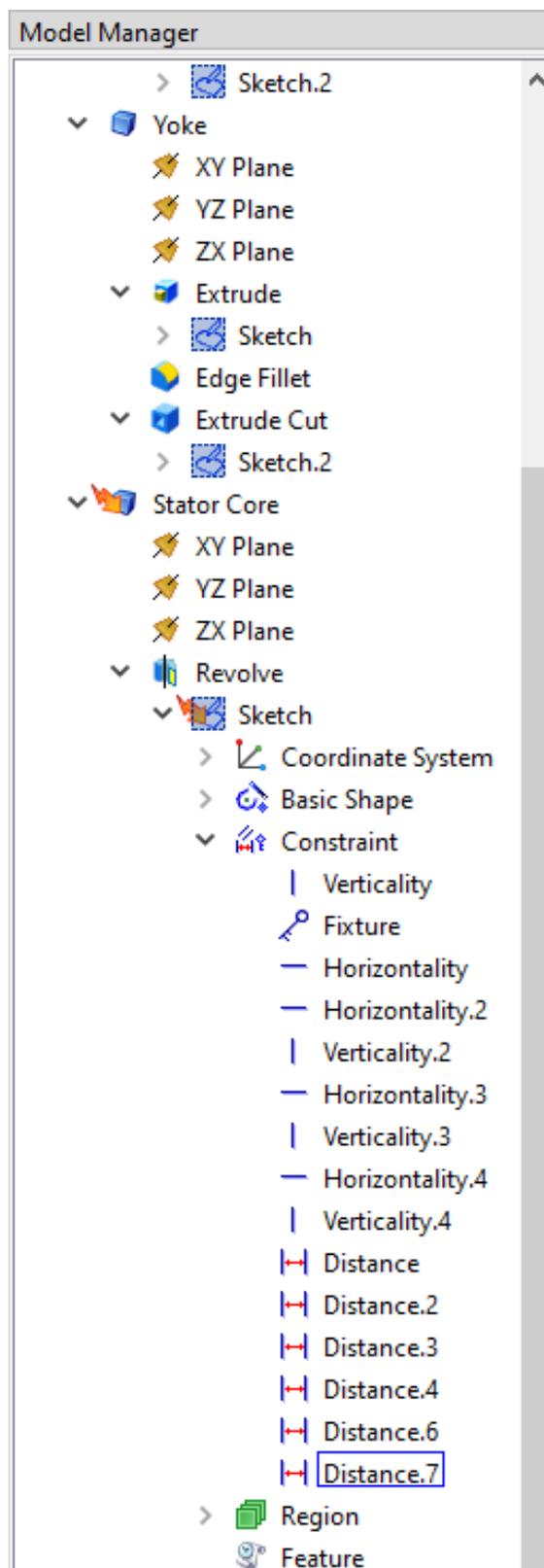


10 Estudio de la influencia de las dimensiones geométricas del núcleo del estátor

10.1 Boceto con las nuevas restricciones necesarias para el estudio

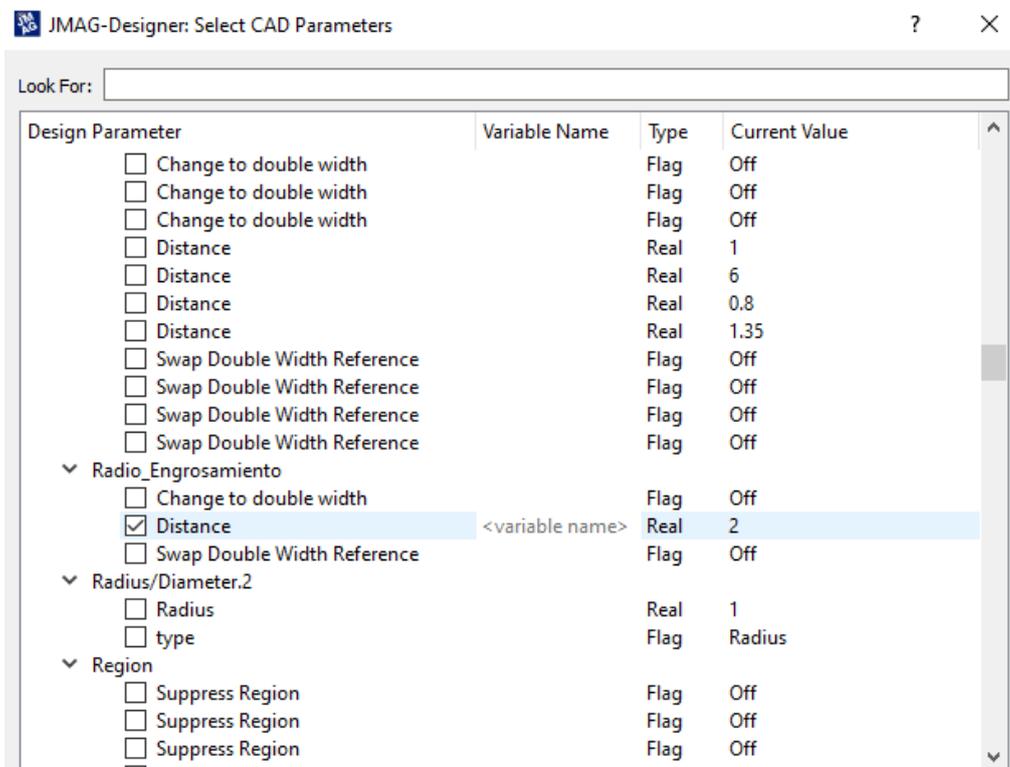


10.2 Restricción asociada al radio del engrosamiento del estátor

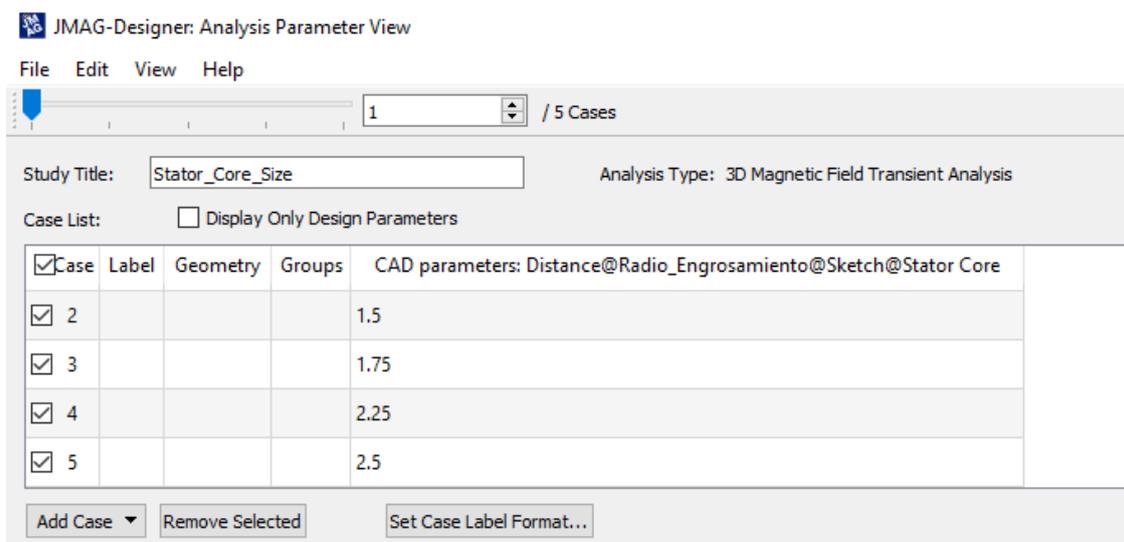


10.3 Selección del radio del engrosamiento en el apartado *Select CAD*

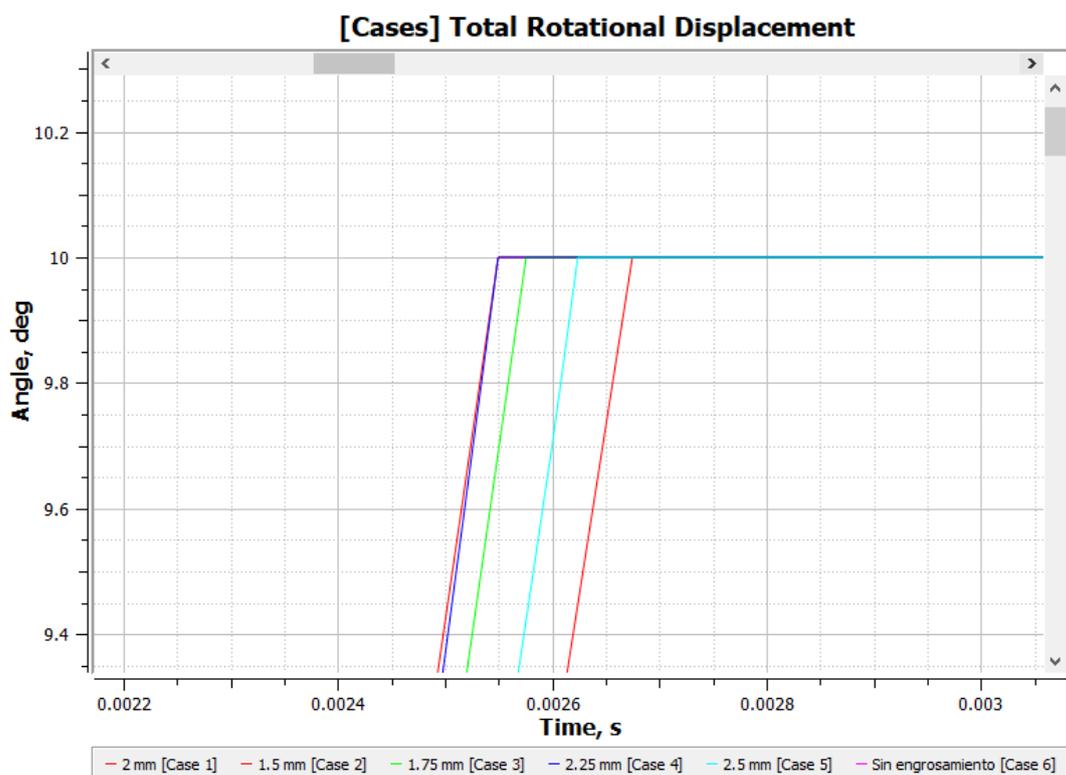
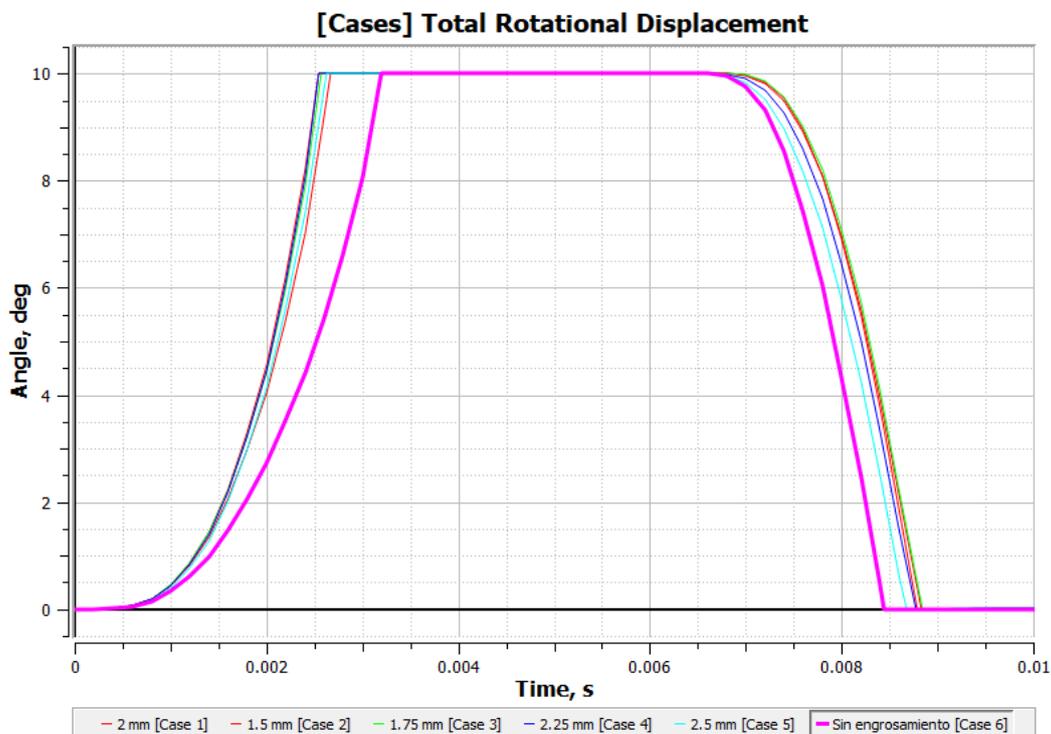
Parameters



10.4 Configuración del análisis paramétrico



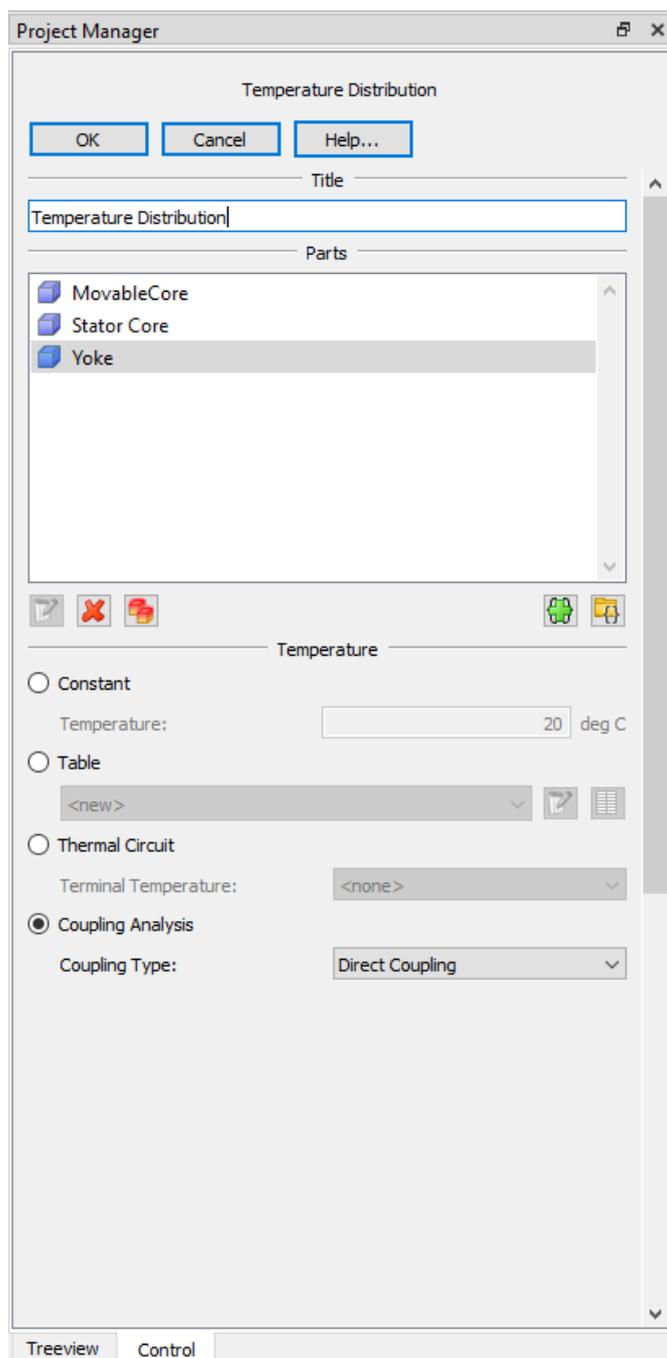
10.5 Representación gráfica del desplazamiento del núcleo móvil para cada valor distinto del radio



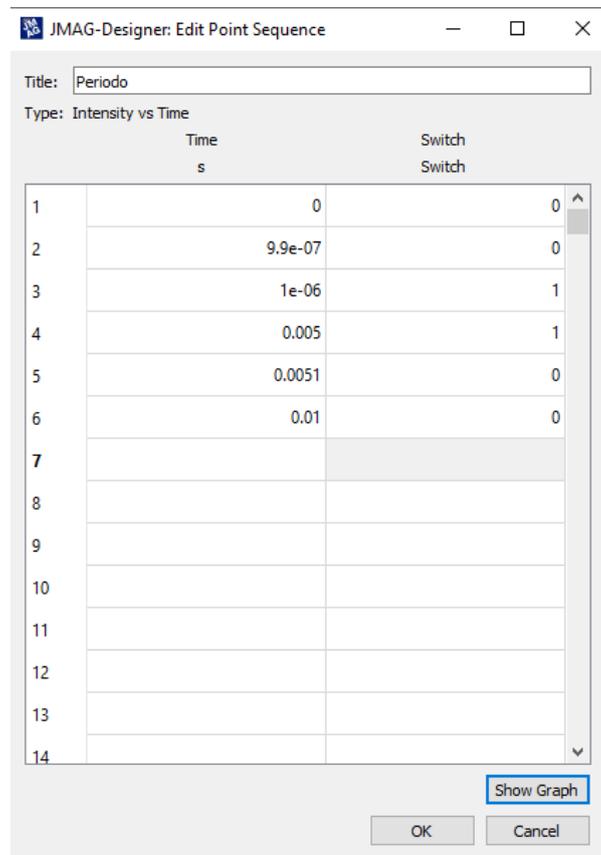
11 Análisis térmico

11.1 Preparación del estudio magnético

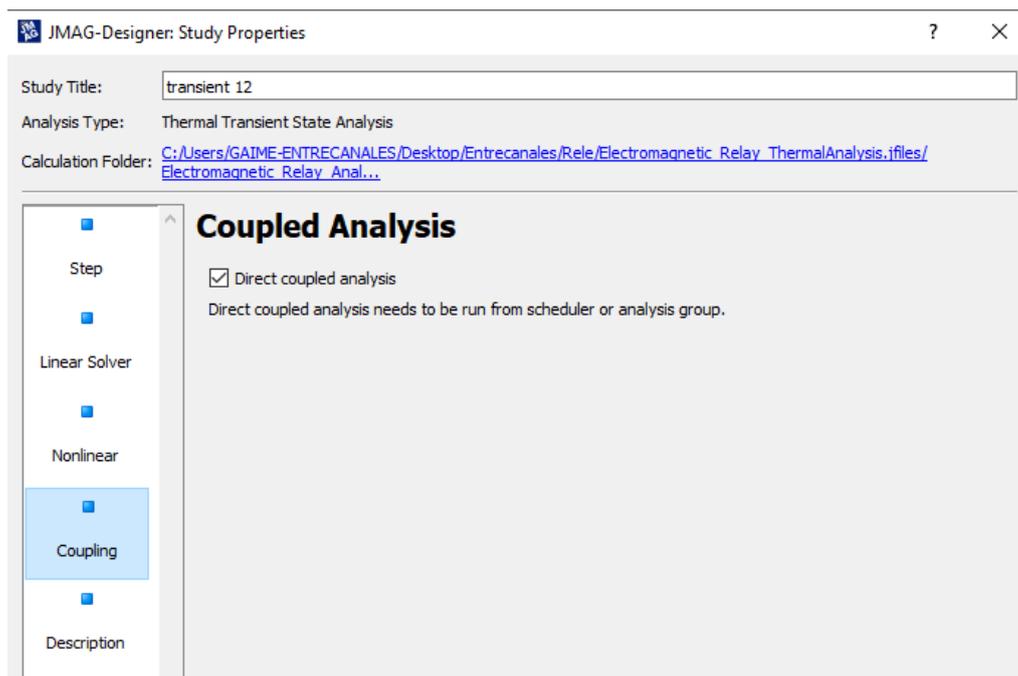
11.1.1 Condición para la distribución de temperaturas



11.1.2 Configuración del interruptor del circuito eléctrico

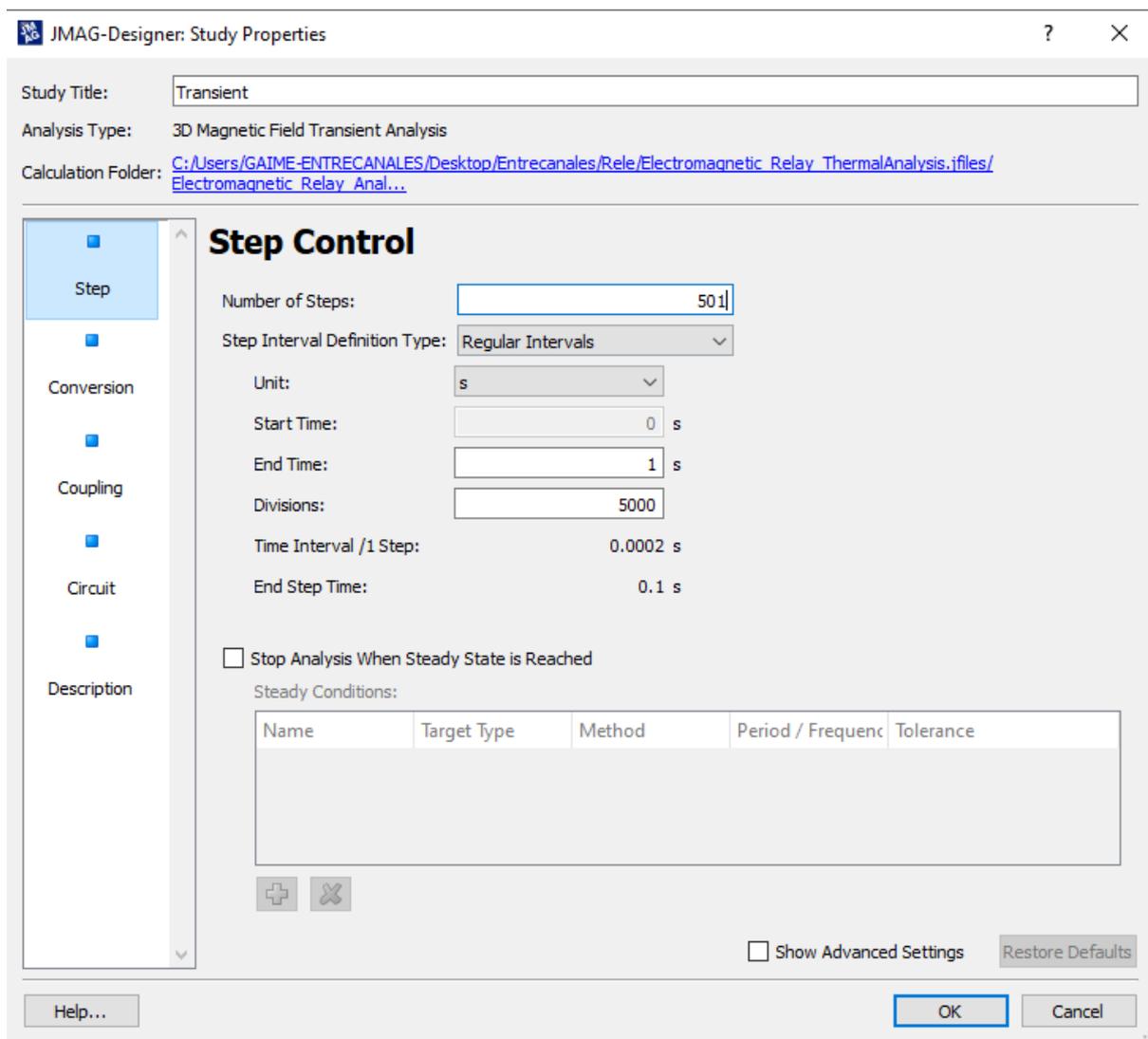


11.1.3 Activación de la opción *Direct Coupling*



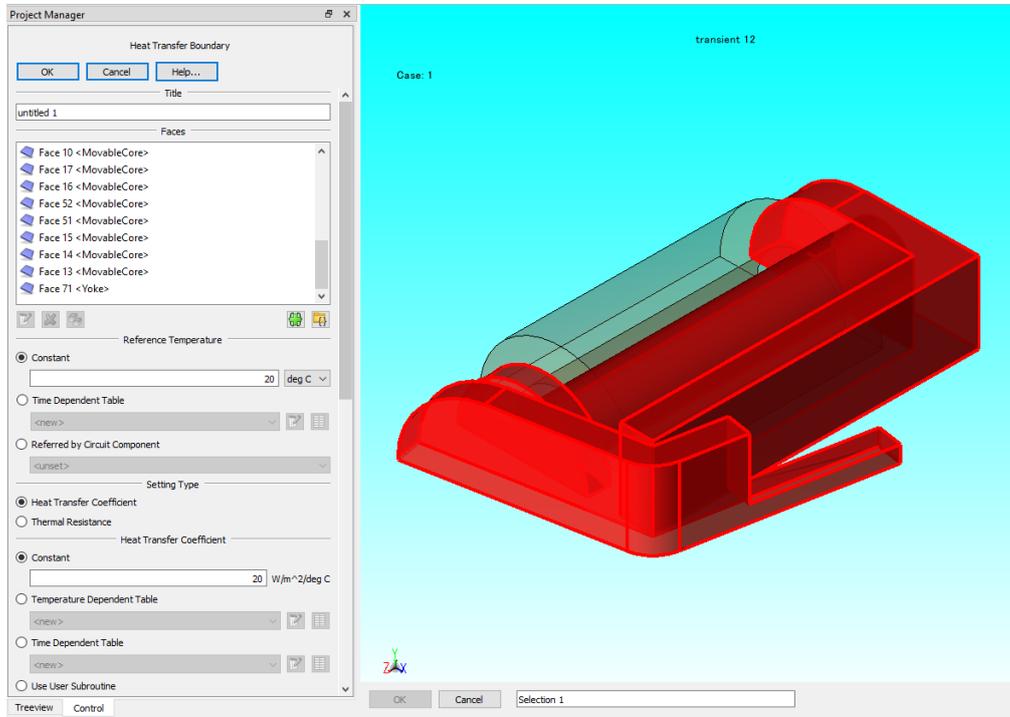
11.2 Preparación del estudio térmico

11.2.1 Ajustes previos de computación

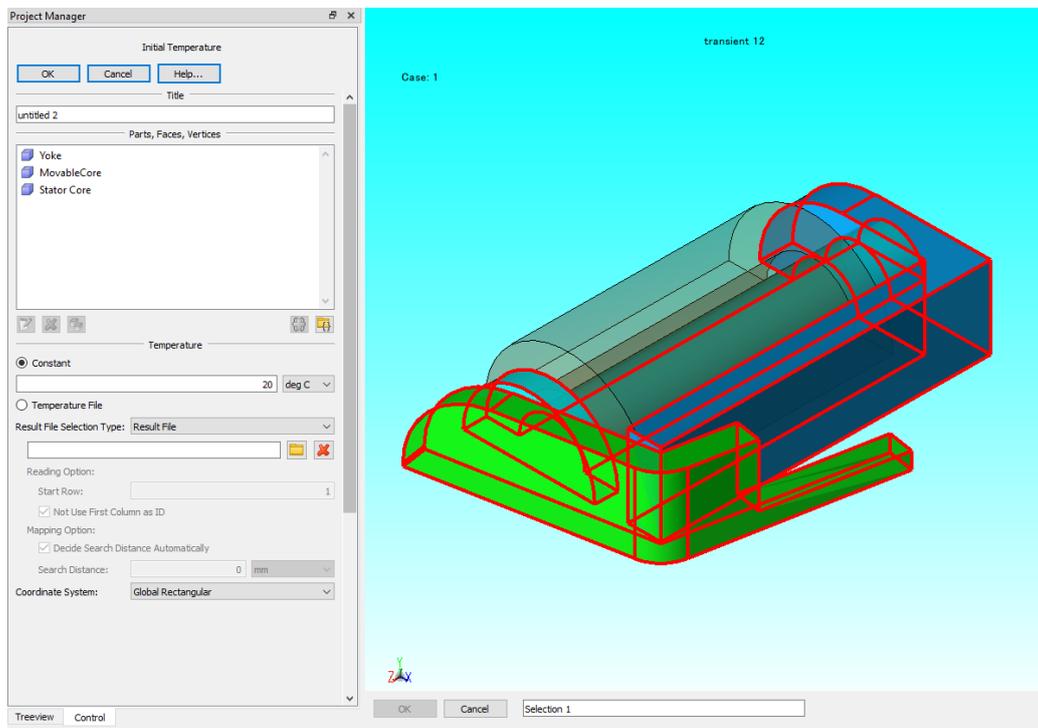


11.2.2 Definición de las condiciones

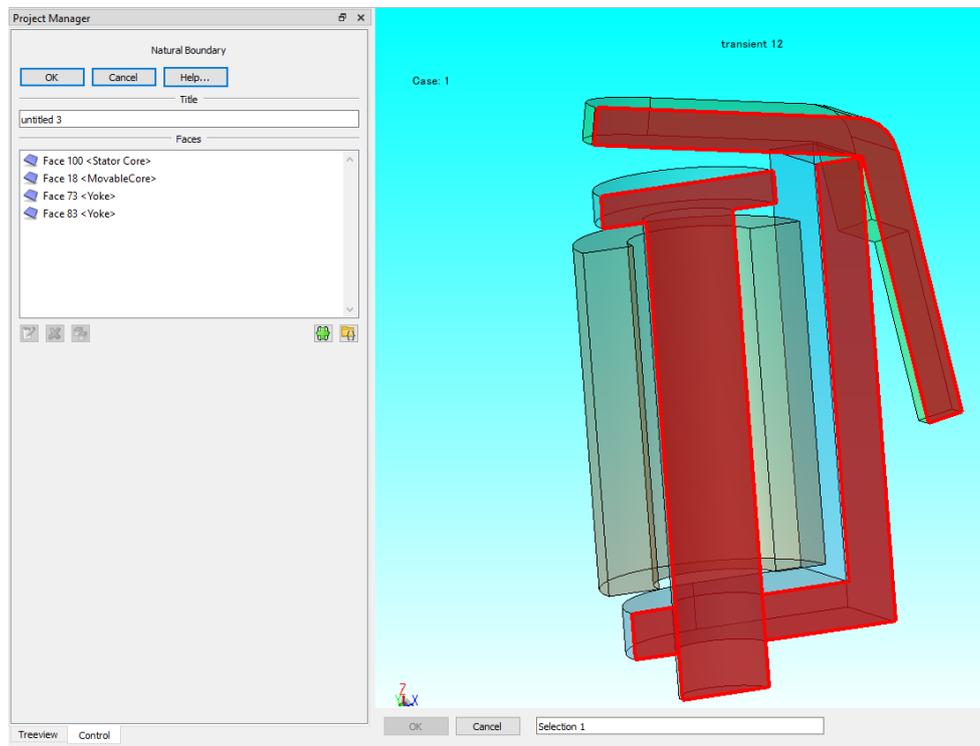
Heat Transfer Boundary



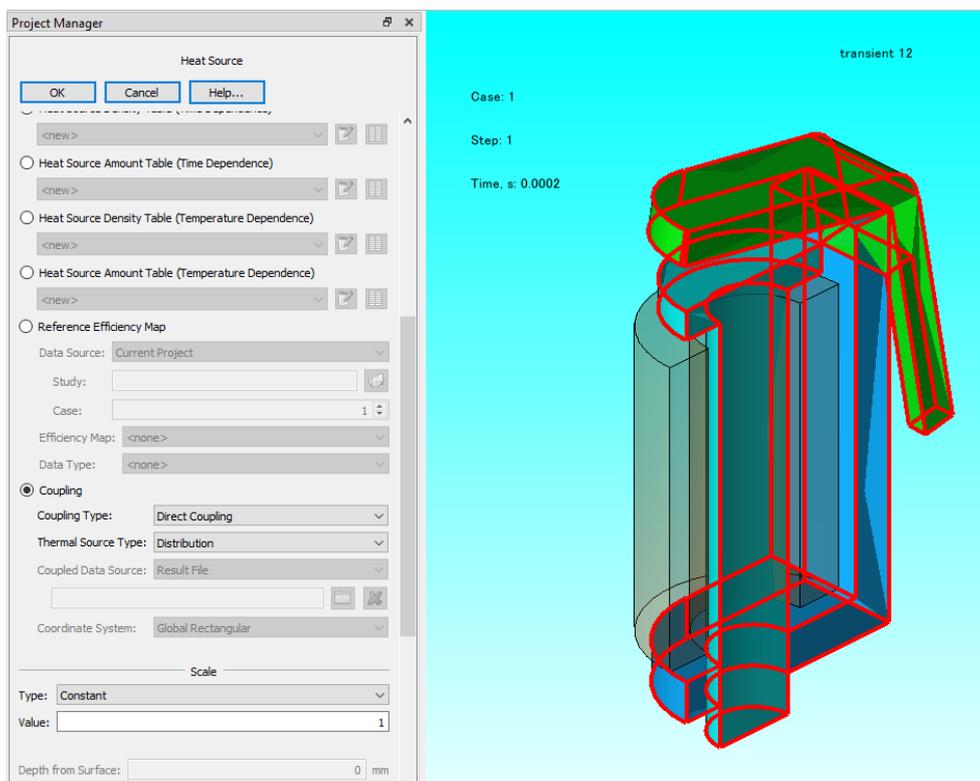
Initial Temperature



Natural Boundary

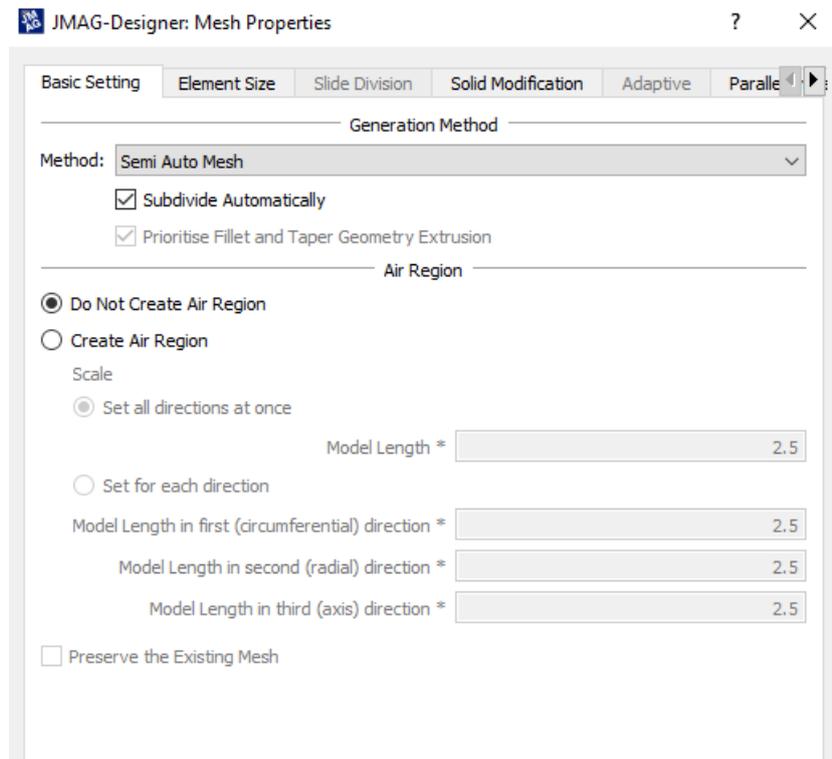


Heat Source

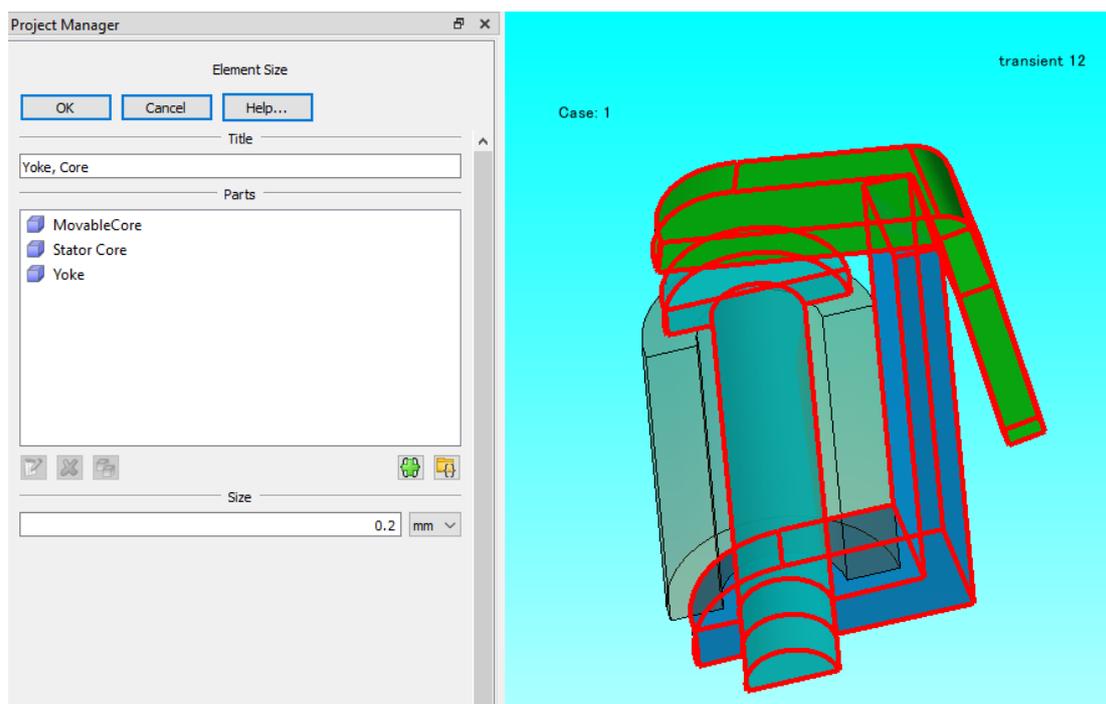


11.2.3 Generación del mallado

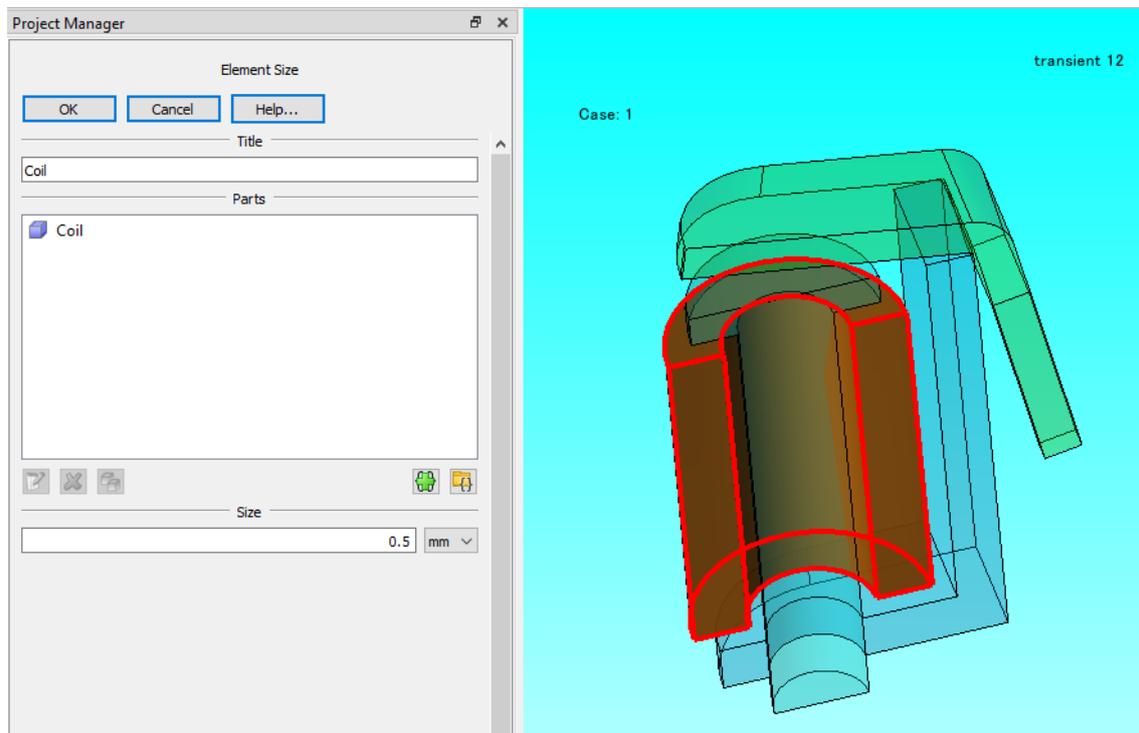
Propiedades del mallado



Control del tamaño de los componentes ferromagnéticos

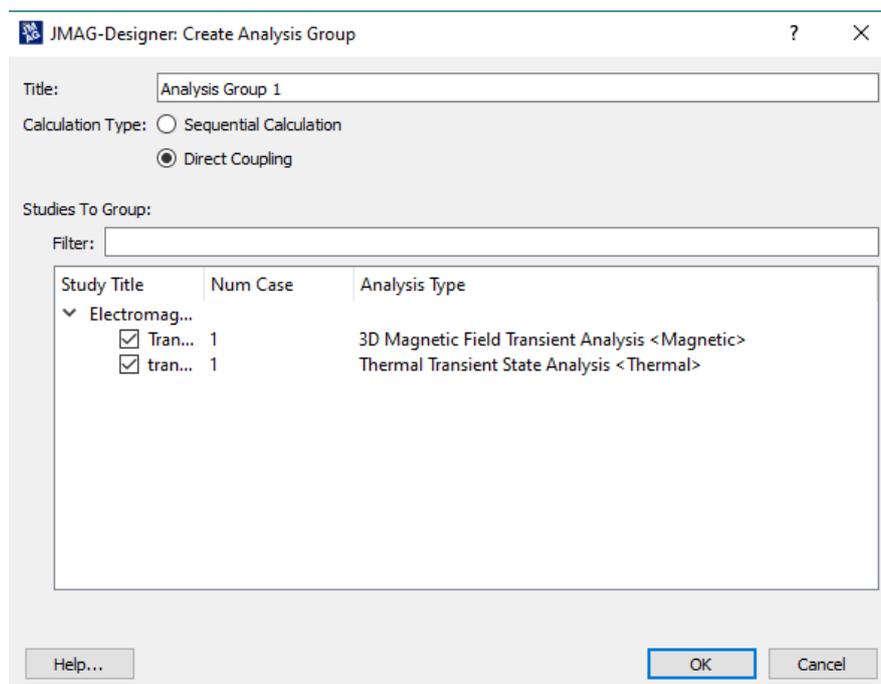


Control del tamaño de la bobina

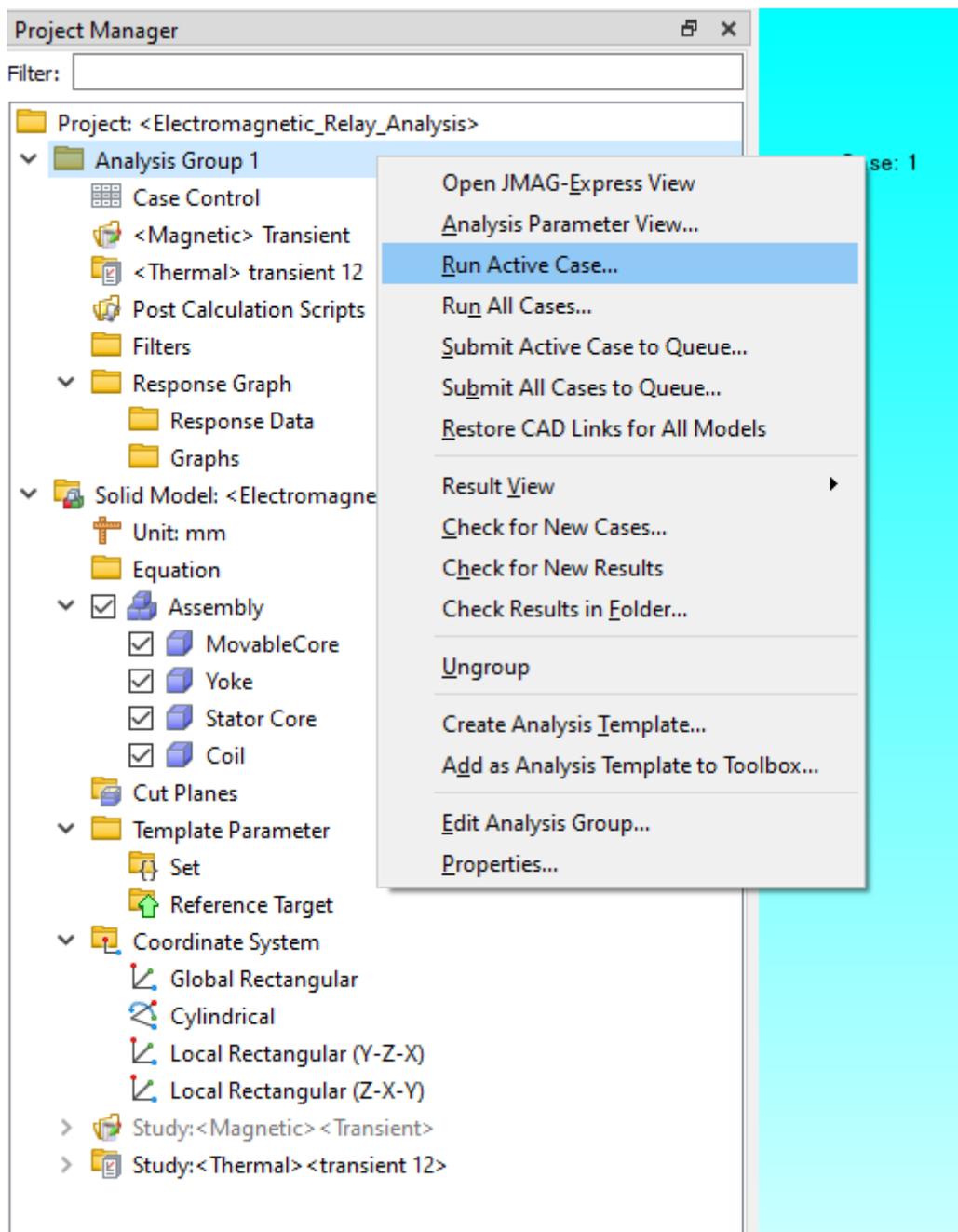


11.3 Simulación del estudio

11.3.1 Configuración del grupo de análisis



11.3.2 Simulación de ambos estudios simultáneamente



11.3.3 Final de la simulación

JMAG-Designer: Messages ? X

C:/Users/GAIME-ENTRECANALES/Desktop/Entrecanales/Rele/Electromagnetic_Relay_ThermalAnalysis.jfiles/Electromagnetic_Relay_Analysis_5~4/Transient~11/Case1/Designer.jplot

Calculation Folder
[C:/Users/GAIME-ENTRECANALES/Desktop/Entrecanales/Rele/Electromagnetic_Relay_ThermalAnalysis.jfiles/Electromagnetic_Relay_Analysis_5~4/Transient~11/Case1](#)

This study has 1 messages

A meshing problem may occur if a mover comes into contact with a stator after moving.
If a mover comes into contact with a stator after moving, the highlighted face should be divided at the contact line.
No problems if movers do not touch any stator during moving.

Code 80269

Name
transient 12

Mesh Information
Elements: 26449
Nodes: 7155

Result File Path
C:/Users/GAIME-ENTRECANALES/Desktop/Entrecanales/Rele/Electromagnetic_Relay_ThermalAnalysis.jfiles/Electromagnetic_Relay_Analysis_5~4/transient_12~12/Case1/Designer.jplot

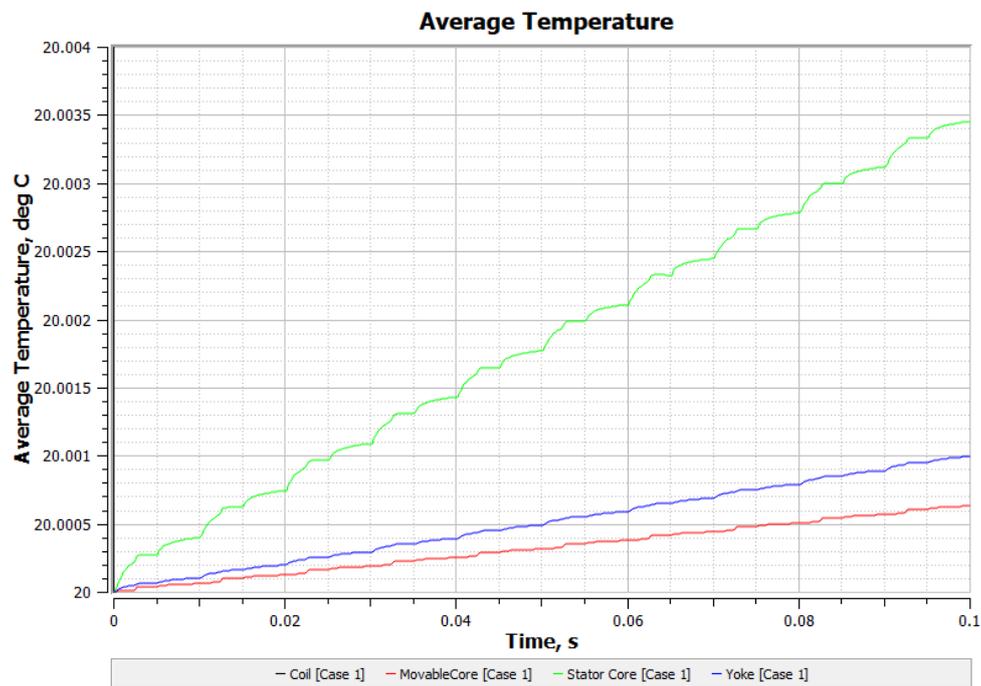
Calculation Folder
[C:/Users/GAIME-ENTRECANALES/Desktop/Entrecanales/Rele/Electromagnetic_Relay_ThermalAnalysis.jfiles/Electromagnetic_Relay_Analysis_5~4/transient_12~12/Case1](#)

This study has 1 messages

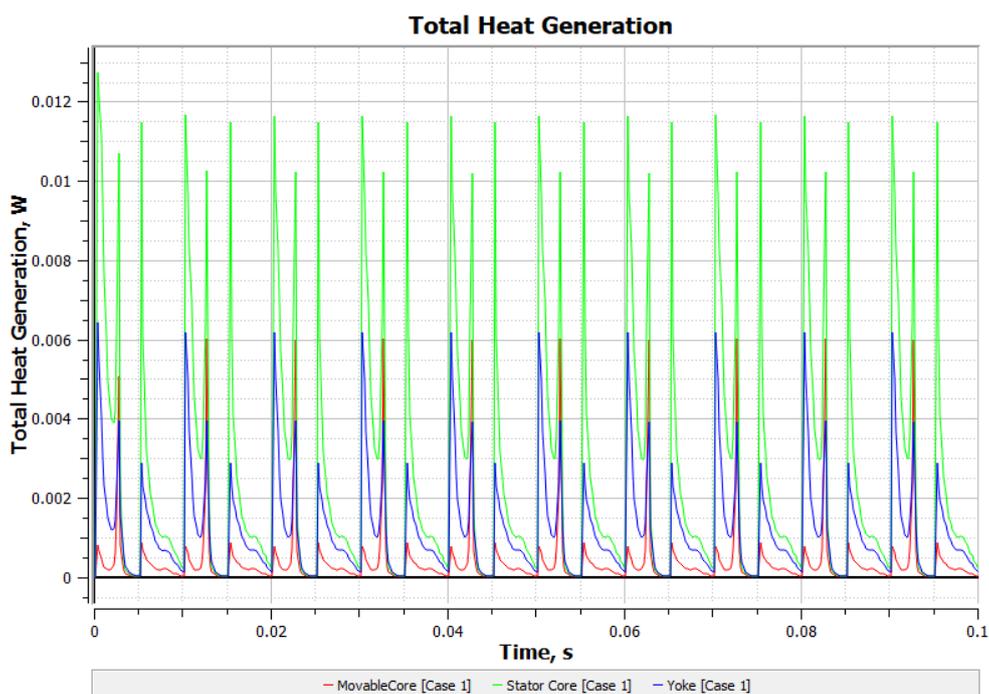
A meshing problem may occur if a mover comes into contact with a stator after moving.
If a mover comes into contact with a stator after moving, the highlighted face should be divided at the contact line.
No problems if movers do not touch any stator during moving.

11.4 Análisis de los resultados

11.4.1 Representación gráfica de la temperatura media

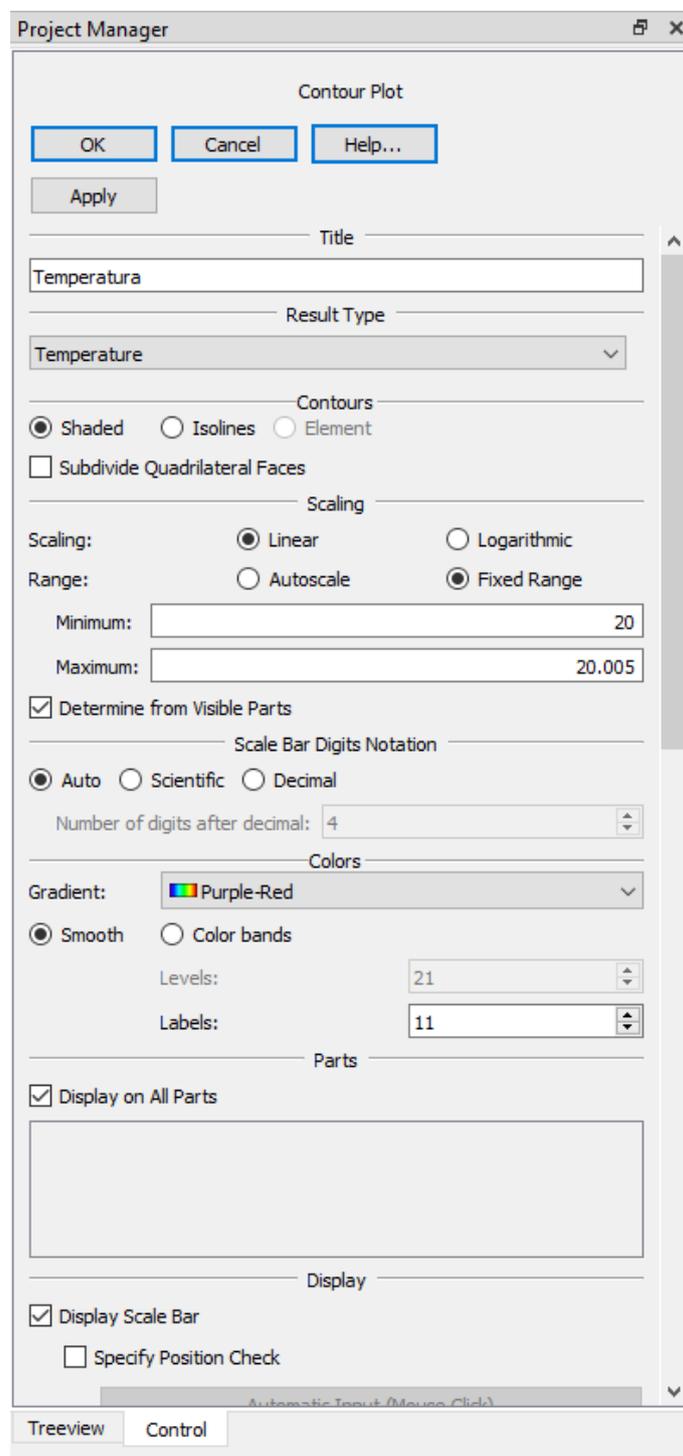


11.4.2 Representación gráfica del calor generado

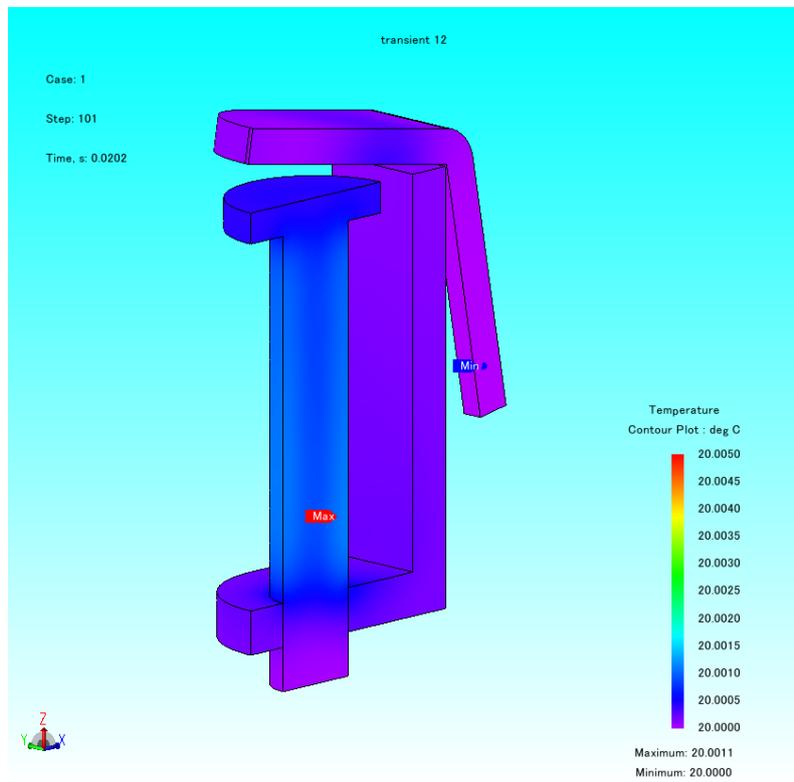


11.4.3 Gráfico tipo *Contour Plot* para la representación de la distribución de temperatura

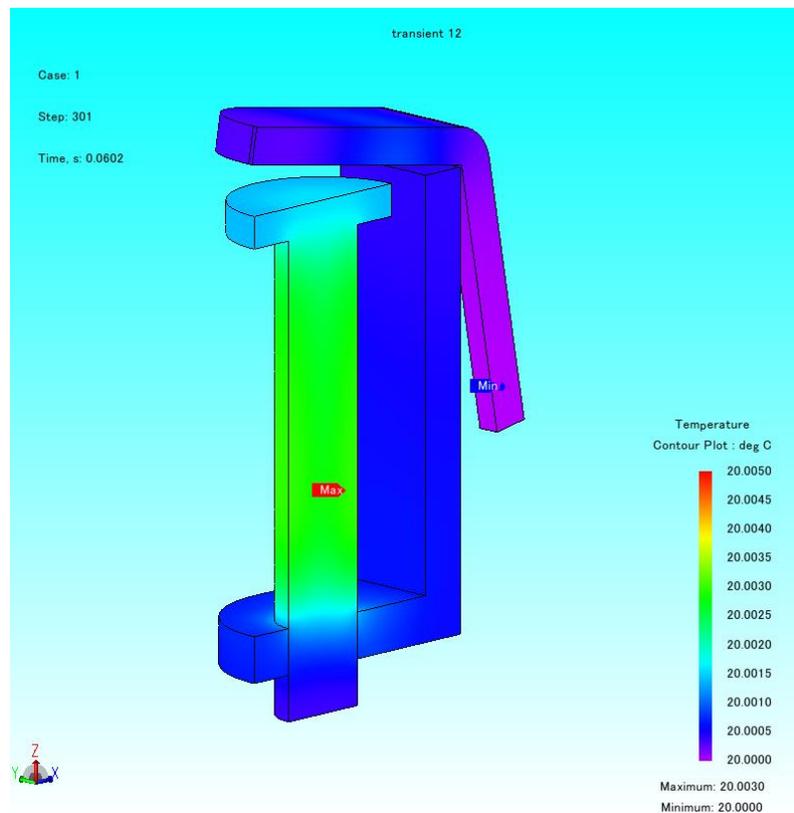
Configuración del gráfico

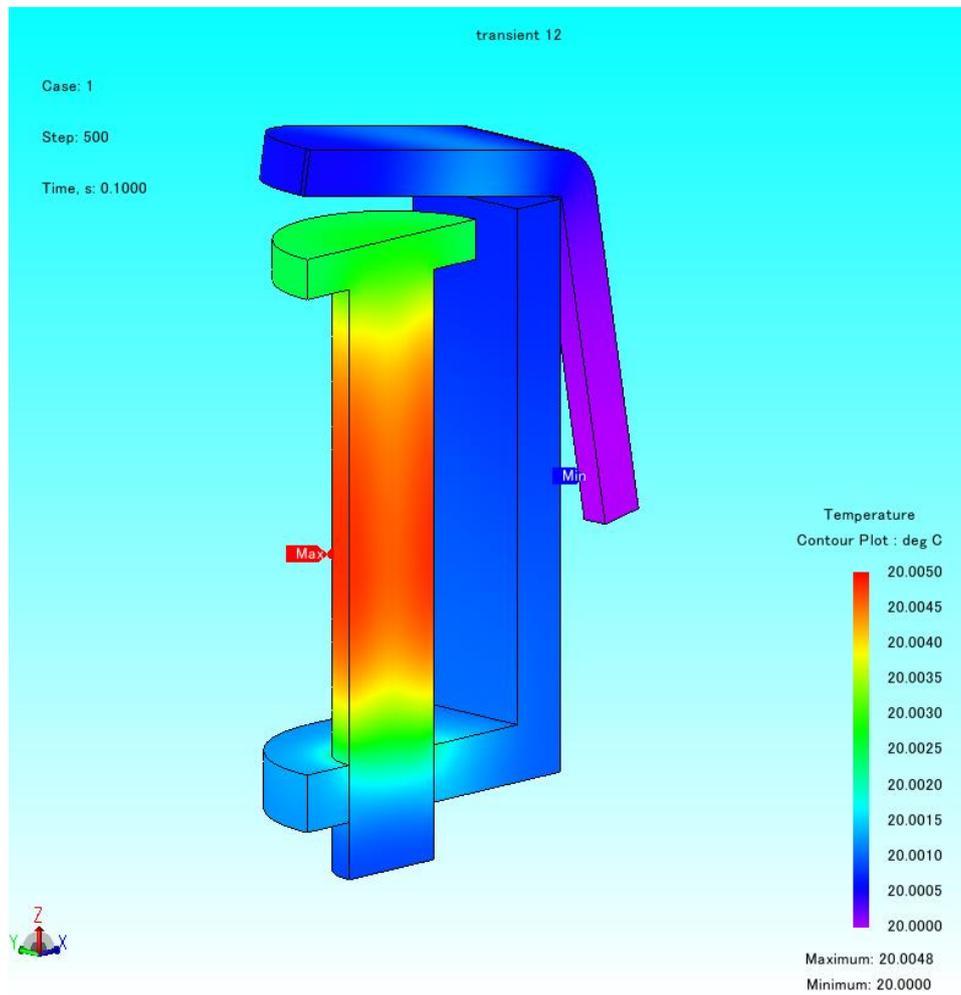


Final de la segunda activación (t = 0.0202 s)



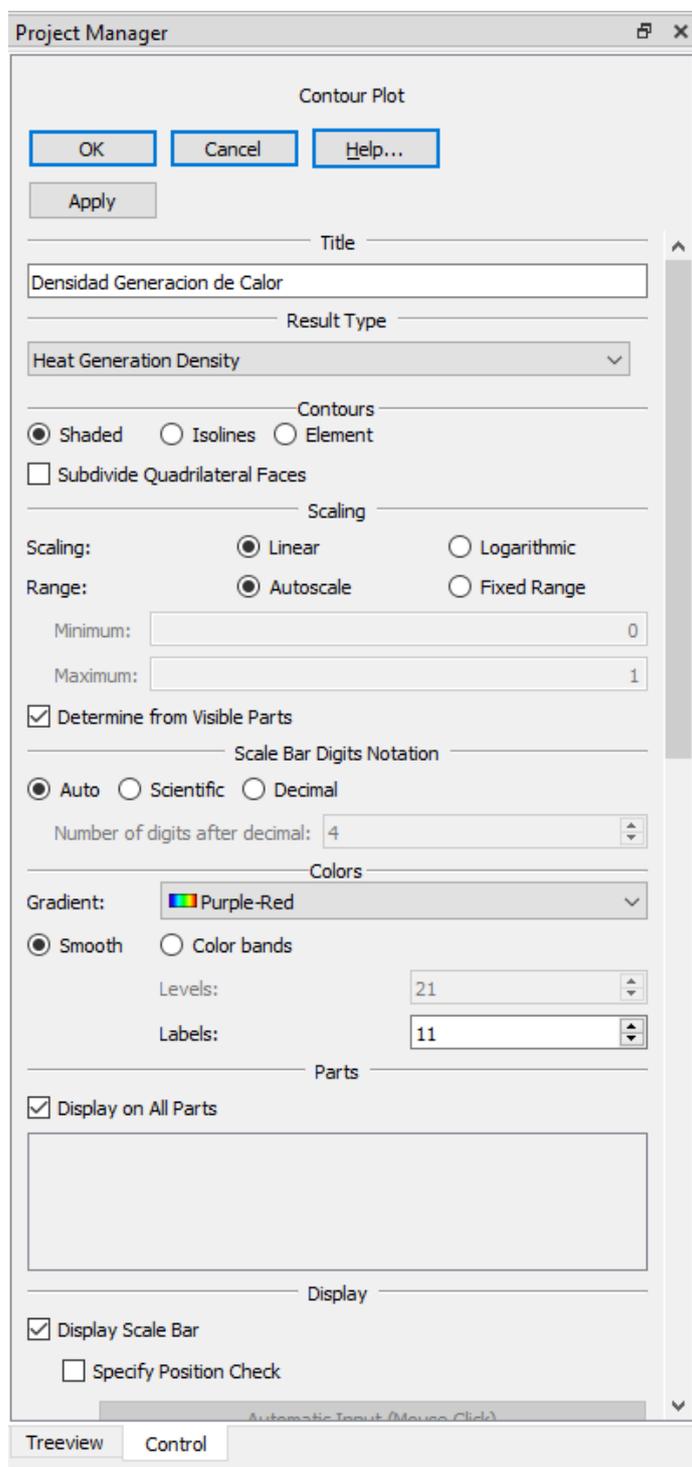
Final de la sexta activación (t = 0.0602 s)



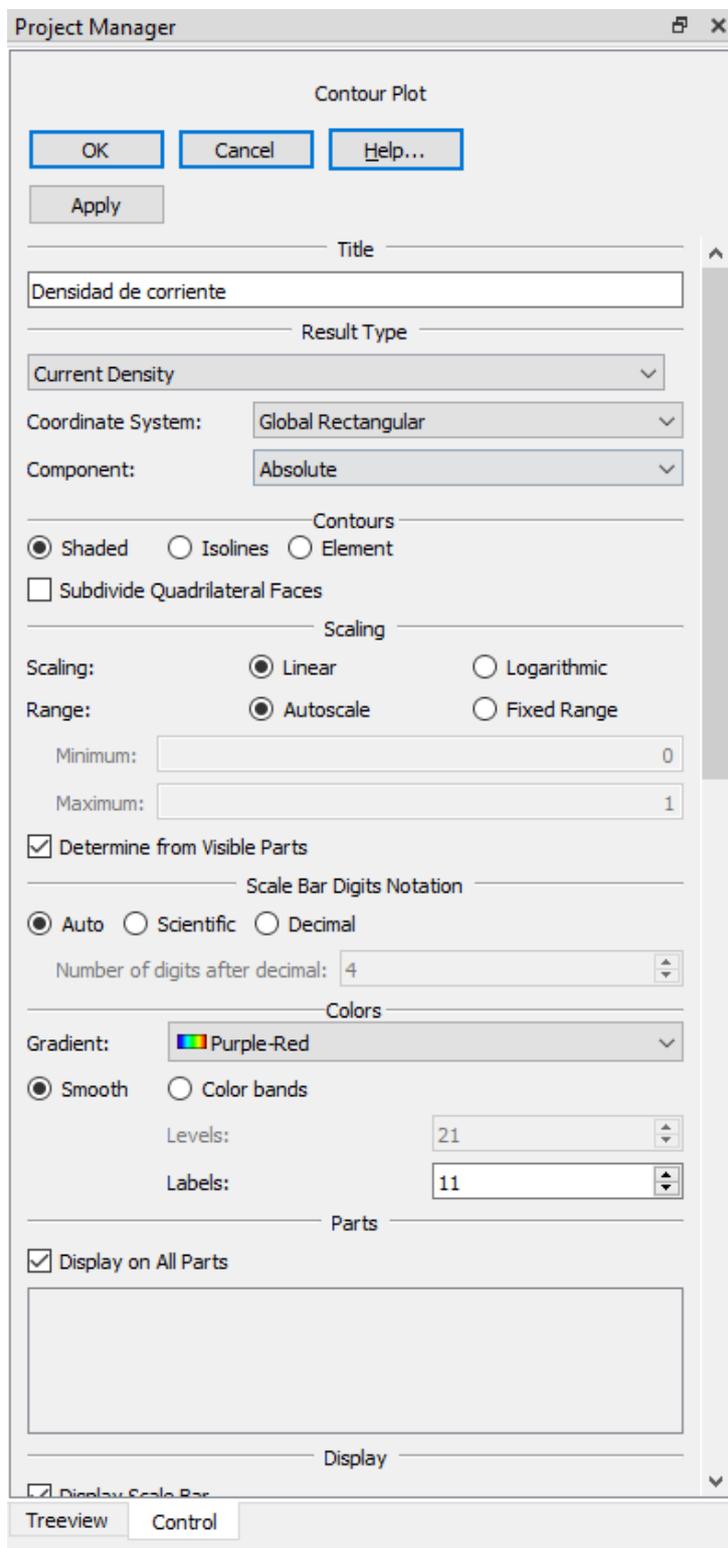
Final de la décima activación (t = 0.1 s)

11.4.4 Gráfico tipo *Contour Plot* para la relación entre la generación de calor y la distribución de las corrientes parásitas

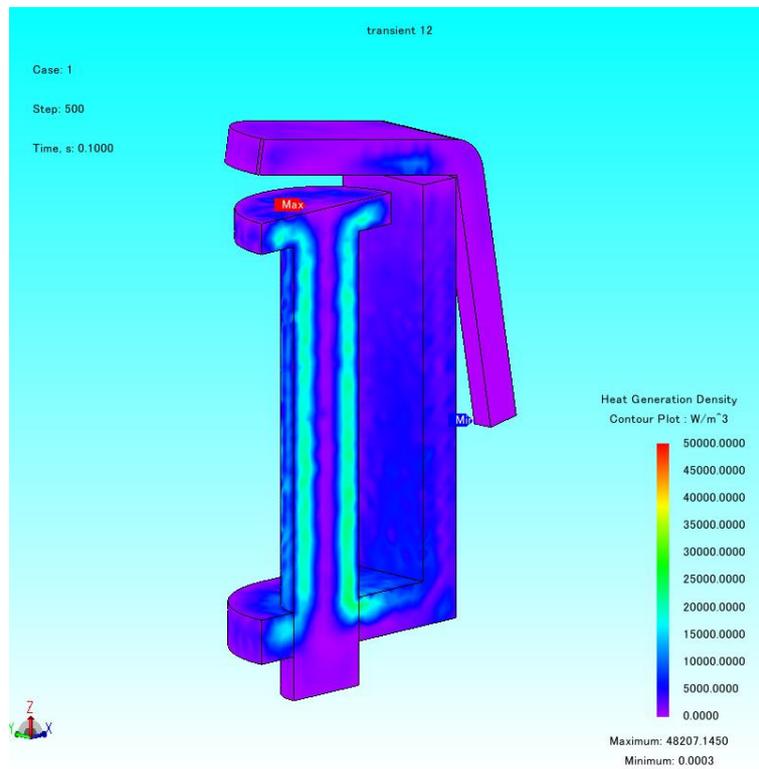
Configuración del gráfico de la densidad de generación de calor



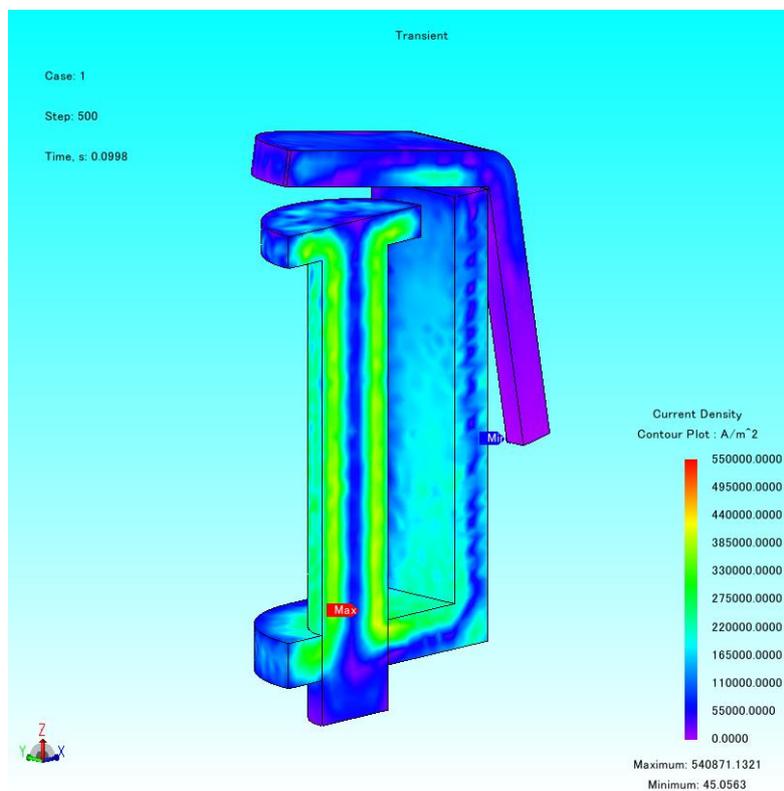
Configuración del gráfico de la densidad de corriente



Densidad de generación de calor



Densidad de corriente



PLIEGO DE CONDICIONES

ÍNDICE PLIEGO DE CONDICIONES

1	Generalidades	187
2	Normativa legal general.....	188
2.1	Orden CIN/351/2009 del Ministerio de Ciencia e Innovación, de 9 de febrero, por la que se establecen los requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial	188
3	Normativa legal universitaria.....	189
3.1	Real Decreto 822/2021, de 28 de septiembre, por el que se establece la organización de las enseñanzas universitarias y del procedimiento de aseguramiento de su calidad	189
3.2	Resolución de 15 de abril de 2013, de la Universidad de Cantabria, por la que se publica el plan de estudios de Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	189
3.3	Memoria para la solicitud de verificación del Grado Universitario en Ingeniería en Tecnologías Industriales de la Universidad de Cantabria	190
4	Normativa administrativa universitaria	194
4.1	Normativa de gestión académica de los estudios de grado de la Universidad de Cantabria (acuerdo de Consejo de Gobierno de 17 de febrero de 2023)	194
4.2	Guía Docente G733 de la asignatura Trabajo Fin de Grado	199
4.3	Normativa del Trabajo Fin de Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación (ETSIIyT) (Comisión Académica de 19 de noviembre de 2021)	202
5	Normas técnicas formales del documento	211
5.1	Norma de Informes Periciales UNE 197001	212
5.2	Norma de Proyectos Técnicos UNE 157001	216
5.3	Norma sobre Información y documentación, de directrices para la redacción de referencias bibliográficas y de citas de recursos de información.....	222

1 Generalidades

El Pliego de Condiciones de este Trabajo Fin de Grado (TFG) tiene como misión reunir y establecer las condiciones legales, administrativas y formales para que el objeto del TFG (desarrollo y presentación) se realice en las condiciones especificadas por la Universidad de Cantabria, el director y el autor del trabajo.

La extensión y estructura de este documento está en función del tipo de TFG que, en este caso, se trata de un estudio práctico titulado simulación JMAG de la respuesta dinámica de un relé electromagnético, influencia del diseño y de las corrientes parásitas. Este Pliego de Condiciones integra cuatro apartados que se desarrollan a continuación.

2 Normativa legal general

2.1 Orden CIN/351/2009 del Ministerio de Ciencia e Innovación, de 9 de febrero, por la que se establecen los requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial

Aunque este título académico no comporta la obtención del título profesional de Ingeniero Técnico Industrial, la memoria de verificación de la titulación (apartado 3.3 de este Pliego de Condiciones) refiere a esta normativa legal sobre profesiones reguladas.

En su artículo único, sobre requisitos de los planes de estudios conducentes a la obtención de los títulos de Grado que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial, establece: *“Los planes de estudios conducentes a la obtención de los títulos de Grado que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial, deberán cumplir, además de lo previsto en el Real Decreto 1393/2007, de 29 de octubre, por el que se establece la ordenación de las enseñanzas universitarias oficiales, los requisitos respecto a los apartados del Anexo I del mencionado Real Decreto que se señalan en el anexo a la presente Orden.”*

En el apartado 5 del Anexo de la Orden se indica que deberá: *“...realizarse un trabajo fin de grado de 12 créditos. El plan de estudios deberá incluir como mínimo, los siguientes módulos”. Siendo el último módulo “Trabajo fin de grado” y las competencias que deben adquirirse “Ejercicio original a realizar individualmente y presentar y defender ante un tribunal universitario, consistente en un proyecto en el ámbito de las tecnologías específicas de la Ingeniería Industrial de naturaleza profesional en el que se sinteticen e integren las competencias adquiridas en las enseñanzas.”*

3 Normativa legal universitaria

3.1 Real Decreto 822/2021, de 28 de septiembre, por el que se establece la organización de las enseñanzas universitarias y del procedimiento de aseguramiento de su calidad

En su capítulo III, sobre organización básica de las enseñanzas universitarias oficiales de Grado, en su artículo 14, sobre directrices generales para el diseño de los planes de estudios de las enseñanzas de Grado, y en su punto 6 establece: *“El trabajo de fin de Grado, de carácter obligatorio y cuya superación es imprescindible para la obtención del título oficial, tiene como objetivo esencial la demostración por parte del o la estudiante del dominio y aplicación de los conocimientos, competencias y habilidades definitorios del título universitario oficial de Grado. Este trabajo de fin de Grado dispondrá de un mínimo de 6 créditos para todos los títulos, y un máximo de 24 créditos para los títulos de 240 créditos, de 30 créditos en los títulos de 300 créditos y de 36 créditos en los títulos de 360 créditos. Deberá desarrollarse en la fase final del plan de estudios, siguiendo los criterios que cada universidad o centro establezca. Asimismo, los trabajos de fin de Grado deberán ser defendidos en un acto público, siguiendo la normativa que a tal efecto establezca el centro o en su caso la universidad.”*

3.2 Resolución de 15 de abril de 2013, de la Universidad de Cantabria, por la que se publica el plan de estudios de Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

En el punto 3 de su Anexo, sobre estructura del Plan de Estudios, establece *“Módulo-Trabajo de fin de Grado, Carácter-Obligatorio, ECTS-12”*.

3.3 Memoria para la solicitud de verificación del Grado Universitario en Ingeniería en Tecnologías Industriales de la Universidad de Cantabria

En el apartado 3, sobre objetivos, el subapartado 3.2 sobre competencias a adquirir por el estudiante, y el punto 3.2.2 sobre competencias específicas del módulo de trabajo fin de grado, indica *“ITI_PFG1. Capacidad de integración”*.

En el apartado 5, sobre planificación de las enseñanzas, el subapartado 5.1 sobre estructura de las enseñanzas, y el punto 5.1.1 sobre distribución del plan de estudios en créditos ECTS por tipo de materia, indica *“TABLA 1. Resumen de las materias y distribución en créditos ECTS”* y en la tabla *“Tipo de materia-Trabajo Fin de Grado, ETCS-12”*.

En el apartado 5, sobre planificación de las enseñanzas, y el subapartado 5.3 sobre descripción detallada de los módulos o materias de enseñanza-aprendizaje de que consta el plan de estudios, incluye estos atributos *“Denominación de la materia-PROYECTO FIN DE GRADO, Créditos ECTS-12, Carácter/Tipo-Obligatorio”*, y una descripción sobre las competencias y resultados del aprendizaje que el estudiante adquiere con el Trabajo Fin de Grado que extracto e inserto a continuación:

“Capacidad para la redacción y desarrollo de proyectos en el ámbito de la Ingeniería Industrial que tengan por objeto la construcción, reforma, reparación, conservación, demolición, fabricación, instalación, montaje o explotación de estructuras, equipos mecánicos, instalaciones energéticas, instalaciones eléctricas y electrónicas, instalaciones y plantas industriales y procesos de fabricación y automatización, todo ello, en el ámbito de la tecnología específica de la titulación de la rama industrial cursada por el alumno.

Capacidad para la dirección de las actividades objeto de los proyectos de ingeniería descritos en el párrafo anterior.

Capacidad para el manejo de especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.

Capacidad de analizar y valorar el impacto social y medioambiental de las soluciones técnicas.

Competencias y resultados del aprendizaje

- *Generales de la titulación*

ITI_GT1. Adquisición de la capacidad para dirigir las actividades objeto de los proyectos de ingeniería descritos en el epígrafe anterior.

ITI_GT3. Adquisición de la capacidad de resolver problemas con iniciativa, toma de decisiones, creatividad,

razonamiento crítico y de comunicar y transmitir conocimientos, habilidades y destrezas en el campo de la Ingeniería Industrial.

ITI_GT5 Adquisición de la capacidad para manejar especificaciones, reglamentos y normas de obligado cumplimiento.

ITI_GT6 Adquisición de la capacidad de analizar y valorar el impacto social y medioambiental de las soluciones técnicas.

ITI_GT9 Adquisición de la capacidad de trabajar en un entorno multilingüe y multidisciplinar.

- *Generales transversales*

GTRA1. Desarrollo del pensamiento crítico.

GTRA2. Desarrollo del pensamiento creativo.

GTRA3. Adquisición de la capacidad de gestionar el tiempo.

GTRA4. Adquisición de la capacidad de resolver problemas.

GTRA7. Adquisición de la capacidad de comunicarse verbalmente.

GTRA8. Adquisición de la capacidad de comunicación escrita.

GTRA10. Adquisición de la capacidad de adaptarse al entorno.

GTRA12. Adquisición de la capacidad de comunicación interpersonal.

GTRA14. Desarrollo de la creatividad.

GTRA15. Adquisición de la capacidad de innovar.

GTRA16. Adquisición de la capacidad de gestionar proyectos

- *Específicas del módulo de selección de tecnología específica*

ITI_PFG1. Adquisición de la capacidad de realizar un ejercicio original individualmente y presentar y defender ante un tribunal universitario, consistente en un proyecto en el ámbito de las tecnologías específicas de la Ingeniería Industrial de naturaleza profesional en el que se sinteticen e integren las competencias adquiridas en las enseñanzas.

Ver anexos: 2.- Listado de competencias 3.- Tabla de materias - competencias”

En el apartado 5, sobre planificación de las enseñanzas, y el sub-apartado 5.3 sobre descripción detallada de los módulos o materias de enseñanza-aprendizaje de que consta el plan de estudios, incluye los requisitos previos con esta descripción: *“Al tratarse de un Trabajo Fin de Grado, son necesarios los conocimientos de las distintas materias de carácter obligatorio impartidas en la titulación, si bien algunas de ellas podrían cursarse simultáneamente con la realización del trabajo.”*.

En el apartado 5, sobre planificación de las enseñanzas, y el subapartado 5.3 sobre descripción detallada de los módulos o materias de enseñanza-aprendizaje de que consta el plan de estudios, incluye las actividades formativas en créditos ECTS y su metodología de enseñanza aprendizaje con esta descripción y un reparto orientativo *“Ejercicio original a realizar individualmente y presentar y defender ante un tribunal universitario, consistente en un proyecto en el ámbito de las tecnologías específicas de la ingeniería industrial, de naturaleza profesional, en el que se sinteticen e integren las competencias adquiridas en las enseñanzas.*

Como referencia, la dedicación a cada una de estas actividades estará en torno a los siguientes porcentajes: Clases presenciales-Tutorías-10%-Evaluación 5% No presenciales-Trabajo autónomo-85%”.

En el apartado 5, sobre planificación de las enseñanzas, y el subapartado 5.3 sobre descripción detallada de los módulos o materias de enseñanza-aprendizaje de que consta el plan de estudios, incluye el sistema de evaluación de la adquisición de las competencias y el sistema de calificaciones con esta indicación *“Defensa, ante un tribunal, del Proyecto Fin de Carrera-100%”*.

En el apartado 5, sobre planificación de las enseñanzas, y el subapartado 5.3 sobre descripción detallada de los módulos o materias de enseñanza-aprendizaje de que consta el plan de

estudios, incluye una breve descripción de los contenidos del Trabajo Fin de Grado que extracto e inserto a continuación:

“El módulo, cubre las competencias descritas en la Orden CIN/351/2009, de 9 de febrero, por la que se establecen los requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico Industrial, en el apartado proyecto fin de grado.

La elaboración de los Proyectos Fin de Carrera comprenderá las siguientes fases:

1ª.- Oferta anual, por parte de los profesores de la titulación y, en particular, por los profesores del Área de Proyectos, de distintos temas que puedan ser objeto de la realización de proyectos fin de carrera. Se procurará que los alumnos concreten el tema a realizar y tengan asignado Director del Proyecto dentro del primer cuatrimestre de 4º curso, sin perjuicio de que puedan surgir temas como consecuencia de la realización por los alumnos de prácticas en empresas.

2ª.- Asignación formal, por parte de los tribunales que hayan de juzgar los PFC, del tema específico y del Director del proyecto, de acuerdo con la normativa que rige la elaboración y defensa de los PFC, aprobada por la Junta de Escuela.

3ª.- Seguimiento del desarrollo de los trabajos, por parte del Director del Proyecto.

4ª.- Depósito de los ejemplares del Proyecto dentro de los plazos establecidos para cada convocatoria, previa autorización del director del Proyecto. Período para el análisis del documento por los miembros del tribunal nombrado al efecto.

5ª.- Exposición y defensa pública del PFC.”

4 Normativa administrativa universitaria

4.1 Normativa de gestión académica de los estudios de grado de la Universidad de Cantabria (acuerdo de Consejo de Gobierno de 17 de febrero de 2023)

En su título VI, nominado Trabajo Fin de Grado, establece en los apartados uno a diez las siguientes condiciones que se extractan e insertan a continuación:

“1. OBJETO Y ÁMBITO DE APLICACIÓN

1. Esta normativa contiene las directrices relativas a la definición, realización, defensa, calificación y tramitación administrativa de los Trabajos de Fin de Grado (en adelante TFG) que se establezcan en los planes de estudios de las distintas titulaciones oficiales de la Universidad de Cantabria que conduzcan a la obtención del Título de graduado de acuerdo con la regulación del R.D. 822/2021.

2. Queda a discreción de cada centro el desarrollo ulterior de la presente normativa para adecuarla a las características propias de cada uno de los títulos de Grado que se impartan en su centro. En cualquier caso, las normas que establezcan los centros deberán ser públicas y adecuarse a lo dispuesto en esta normativa.

2. CARACTERÍSTICAS DEL TFG

1. El TFG consistirá en la realización por parte del estudiante de un trabajo original, autónomo y personal, bajo la orientación de un profesor, en el que se apliquen y desarrollen los conocimientos y capacidades adquiridos a lo largo de la titulación, demostrando que ha alcanzado las competencias previstas en el plan de estudios. El término original queda referido a que en ningún caso pueda ser un trabajo plagiado ni presentado con anterioridad por el alumno en ninguna otra asignatura. Se deberán citar las fuentes utilizadas.

2. La carga de trabajo que el estudiante invierta a lo largo de la realización del TFG debe corresponderse con los créditos ECTS que le otorgue el plan de estudios.

3. El trabajo será desarrollado, defendido y calificado individualmente sin perjuicio de que, cuando el tema elegido así lo aconseje, pueda ser elaborado en colaboración con otros estudiantes, en la manera que el Reglamento del Centro lo prevea.

4. Excepcionalmente, siempre que así esté previsto en la Memoria de Verificación del título, el Trabajo Fin de Grado se podrá ubicar dentro de una materia o módulo que permita favorecer la interacción de grupos heterogéneos mejorando así las capacidades de trabajo cooperativo y de comunicación de los estudiantes.

Esta materia o módulo estará integrado por el Trabajo Fin de Grado y un grupo de asignaturas establecido en la Memoria de Verificación.

A efectos de matrícula, plan docente y actas, la gestión se realizará como una asignatura.

En cualquier caso, el Trabajo Fin de Grado deberá tener una calificación individual y ser evaluado y defendido de acuerdo con lo establecido en esta normativa.

5. En el caso de aquellos planes de estudio que contemplen la posibilidad de realizar Menciones y la Memoria de Verificación del título establezca que el Trabajo Fin de Grado está asociado a la Mención con contenidos y características diferenciados para cada una de las Menciones, los estudiantes que cursen más de una Mención deberán realizar un Trabajo Fin de Grado para cada una de ellas.

3. DIRECCIÓN DEL TRABAJO FIN DE GRADO

1. Cada TFG tendrá asignado al menos un profesor director, que dirigirá y tutorizará” (tutorará) “al alumno a lo largo de la realización del trabajo.

2. Serán obligaciones del director del TFG las siguientes:

a) Establecer claramente los objetivos del TFG, así como la metodología y plan de trabajo.

b) Proporcionar guía, consejo y apoyo al alumno durante la realización del trabajo.

c) Supervisar al alumno en la toma de decisiones que afecten a la estructura del trabajo, tratamiento de los temas, correcta presentación y orientación bibliográfica.

d) Determinar la consecución de los objetivos propuestos y autorizar la presentación del TFG.

e) Conocer los trámites de gestión necesarios para la realización del TFG, facilitando al estudiante los distintos pasos que tiene que dar en cada momento.

3. El director de un TFG deberá ser profesor del centro responsable de la titulación, siendo preferible que sea profesor de la misma. Además, podrá actuar como codirector un profesor de la Universidad o un profesional externo a la misma.

4. En los TFG realizados en instituciones o empresas externas a la Universidad de Cantabria, existirá la figura de un codirector perteneciente a la institución o empresa. En estos casos, el director compartirá con el codirector las tareas de dirección y orientación del estudiante, siendo en cualquier caso responsabilidad del director facilitar la gestión académica.

5. El Centro establecerá los mecanismos necesarios para asegurar que cada estudiante tenga un director y un trabajo, así como para solventar cualquier incidencia que pudiera surgir durante el desarrollo del mismo. Cuando, por circunstancias sobrevenidas, el director cause baja, el centro arbitrará las medidas oportunas para su sustitución.

4. MATRICULACIÓN Y REQUISITOS PARA LA DEFENSA

1. El TFG podrá ser objeto de matrícula por el estudiante en cualquier momento del curso académico hasta la fecha límite de entrega de actas de la convocatoria extraordinaria de junio, siempre que esté matriculado de todas las asignaturas necesarias para acabar la titulación, excepto, si es el caso, las que tenga pendientes de reconocimiento.

2. La defensa del TFG solo podrá llevarse a cabo cuando el estudiante haya superado todas las asignaturas del Grado y acredite haber alcanzado las competencias lingüísticas descritas en el Título V de la presente Normativa.

3. Si el estudiante está matriculado del TFG y no puede defenderlo en dicho curso académico por no tener superadas las restantes asignaturas del Grado, o por no haber alcanzado los requisitos lingüísticos, deberá matricularse nuevamente cuando esté en disposición de defenderlo.

4. La matrícula del TFG da derecho al estudiante a presentarse a dos convocatorias en un mismo curso académico. Si una vez finalizado dicho curso el alumno no hubiese aprobado su TFG, deberá matricularse de nuevo.

5. PERIODOS DE DEFENSA

Los TFG se podrán defender y evaluar en las convocatorias oficiales establecidas por el Centro durante el curso académico que serán, al menos, cuatro.

6. DEPÓSITO DEL TRABAJO

1. Cada alumno deberá realizar una memoria en la que se incluya el desarrollo del trabajo realizado y en la que deberán constar el título de la misma y un resumen escritos en español y en inglés. Todos los TFG deberán contener una portada en la que se detalle el grado, la Facultad o Escuela, título del TFG, nombre del alumno, nombre del director y del codirector si lo hubiera y el año en que se presenta.

2. El Reglamento del Centro podrá concretar más aspectos relativos a la presentación de los TFG y a la forma y plazos en que el estudiante debe depositar su TFG.

7. EVALUACIÓN DEL TFG

1. El Centro regulará la forma de evaluación del TFG y fijará los criterios de valoración y el procedimiento de defensa. Entre los criterios de valoración estarán, al menos, los siguientes: la calidad científica y técnica del TFG presentado, la calidad del material entregado, la claridad expositiva, y la capacidad de debate y la defensa argumental.

2. Se garantizará que al menos uno de los evaluadores del TFG sea profesor de la titulación.

3. El Centro publicará con al menos una semana de antelación, el lugar, día y hora fijados para la defensa de cada trabajo.

8. DEFENSA DEL TFG

1. La defensa del TFG se realizará en un acto público, bien en español o en inglés, en la manera que establezca el Reglamento del Centro.

2. El alumno realizará la defensa del TFG mediante la exposición oral de su contenido o de las líneas principales del mismo y contestará a las preguntas y aclaraciones que se le planteen. El Reglamento del Centro fijará los tiempos que correspondan a cada una de las partes de la defensa.

3. La defensa del TFG se realizará en modalidad presencial. No obstante, se podrá realizar en la modalidad “a distancia” siempre que esté debidamente justificada, existan las condiciones técnicas que lo permitan y se garantice la defensa del TFG.

4. En la modalidad a distancia será necesario que la Comisión Académica y la dirección del TFG tomen las medidas necesarias y oportunas para garantizar la identidad del estudiante y evitar así su suplantación.

9. CALIFICACIÓN Y ACTAS

1. Una vez finalizado el acto de defensa del TFG se firmará el acta individual correspondiente a cada alumno utilizando el sistema de calificación establecido en el Real Decreto 1125/2003. Los TFG no estarán sujetos al porcentaje de Matrículas de Honor previstos en el citado Real Decreto. Todos los estudiantes matriculados en el Trabajo Fin de Grado que no se presenten a la defensa, figurarán en un acta única expedida al finalizar el curso académico.

2. En el caso de que un TFG obtuviera la calificación de suspenso, el evaluador hará llegar un informe al estudiante y a su Director con los criterios que han motivado dicha calificación. Dicho informe podrá incluir recomendaciones para mejorar la calidad del mismo.

3. Los plazos de calificación y entrega de actas serán acordados para cada curso académico por los órganos de gobierno de la Universidad.

10. REPOSITORIO UCrea

1. Con el fin de dar cumplimiento a la normativa sobre política institucional de acceso abierto a la producción académica, científica e investigadora de la Universidad de Cantabria (Repositorio Ucrea), una vez finalizada la presentación de los trabajos fin de grado, aquéllos que resulten aprobados deberán depositarse en el repositorio institucional de acceso abierto de la UC.

2. Para realizar este depósito, las Secretarías de los Centros enviarán una copia de los trabajos en formato electrónico a la Biblioteca Universitaria junto con el documento de consentimiento de los autores y la modalidad de acceso elegida.

3. *La Biblioteca se ocupará también de la conservación de los trabajos cuya difusión no haya sido autorizada por los autores y garantizará el acceso a los mismos para evaluadores, gestores u otras personas en los términos previstos en las disposiciones aplicables.*”

4.2 Guía Docente G733 de la asignatura Trabajo Fin de Grado

Las condiciones de desarrollo del Trabajo Fin de Grado, citadas en las normativas anteriores, se reúnen en la Guía Docente de esta actividad o asignatura.

En su apartado 2, sobre prerrequisitos, se establece *“Para poder matricularse del TFG es necesario matricularse de todas las asignaturas que queden para completar la titulación. Para poder presentarlo y defenderlo, hay que tener aprobadas todas las asignaturas de la titulación y acreditar haber alcanzado las competencias lingüísticas establecidas en la Universidad de Cantabria.”*.

En su apartado 3, sobre competencias genéricas y específicas, se reproducen las mismas del apartado 3.3 de este Pliego de Condiciones.

En su apartado 4, sobre objetivos de la asignatura, se establecen: *“Que el estudiante realice un trabajo original, autónomo y personal, cuyo objetivo es mostrar la adquisición de competencias asociadas a la titulación”* y *“Que el estudiante muestre sus competencias en la elaboración de una memoria que recoja el trabajo realizado y en la defensa en sesión pública del mismo. El trabajo contendrá suficientes elementos de creación personal y citarán adecuadamente todas las fuentes utilizadas”*.

En su apartado 5, sobre modalidades organizativas y métodos docentes, se establece el siguiente reparto orientativo de 300 horas totales de la actividad: *“Seminarios, tutorías, sesiones de laboratorio, etc. realizados con el Director del Trabajo-30 horas”, “Evaluación y Defensa del TFG-15 horas”, “Búsqueda y estudio de documentación, trabajo autónomo de laboratorio o de campo. Desarrollo del trabajo. Escritura de la memoria y preparación de la presentación-225 horas”*.

En su apartado 6, sobre organización docente de la asignatura, se establece:

- *“Organización de la oferta y asignación de Trabajos Fin de Grado”*

“El tema del TFG podrá definirse entre el alumno y el Director del trabajo o ser asignado por el Área de Proyectos.

Para iniciar el desarrollo del TFG, su título y sus líneas de desarrollo deberán contar con la conformidad del Tribunal correspondiente que esté en activo en ese momento. A tal efecto el alumno lo solicitará formalmente en el Negociado de la Escuela mediante la Ficha de Asignación y que se deberá presentar al menos en la convocatoria anterior a la de la defensa del trabajo. En el caso de que el informe sea desfavorable, el Tribunal deberá justificar razonadamente el mismo.”

- *“Temporización: convocatorias, fechas de entrega y defensa de cada convocatoria”. Establece los siguientes fases y fechas de cumplimentación: “Asignación del TFG-Al menos en una convocatoria anterior a la que se realice la defensa”, “Presentación de la memoria-Al menos una semana antes al acto de presentación”, “Convocatorias de defensa del TFG-Diciembre, Febrero, Mayo, Julio, Septiembre”*
- *“¿En qué consiste el TFG? (descripción de la memoria y del material necesario para realizar su defensa pública)”*

“El Trabajo Fin de Grado podrá realizarse de acuerdo con el concepto clásico de Proyecto que se recoge en la norma UNE 157001 "CRITERIOS GENERALES PARA LA ELABORACIÓN DE PROYECTOS", estructurado en los ocho documentos básicos: Índice General, Memoria, Anexos, Planos, Pliego de Condiciones, Estado de Mediciones, Presupuesto y, cuando proceda, Estudios con Entidad Propia. Dependiendo del tipo de Trabajo, especialmente los ligados a modelos experimentales y prototipos, o con alto contenido informático, puede ser conveniente otra estructuración más acorde con la naturaleza de estos trabajos. En esos casos se mantendrá en lo posible y con las adaptaciones necesarias, la estructura tradicional ya que ello facilitará su posterior análisis y revisión y proporcionará uniformidad en la presentación.

El Trabajo Fin de Grado realizado quedará plasmado en un documento en formato PDF.

El formato del documento respetará lo indicado en

<http://web.unican.es/centros/etsiit/Paginas/TFG.aspx>.

La presentación ha de realizarse en formato póster en una sesión pública de hasta tres horas de duración como tiempo de referencia. Es decir el alumno se apoyará en un póster de tamaño A1 y podrá añadir, opcionalmente, una presentación utilizando un ordenador portátil o la presentación de un demostrador en una pequeña mesa.”

- *“Observaciones”*

“Los datos de esta guía académica se extraen de la Memoria del Plan de Estudios y de la Normativa de Trabajo Fin de Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales, aprobada en Comisión Académica de Ingeniería Industrial de 15 de diciembre de 2020.”

En su apartado 7, sobre métodos y criterios de evaluación, se establece:

- *“Composición del tribunal encargado de juzgarla”*

“Para evaluar los TFG se constituirá un Tribunal para cada Materia Optativa reconocida en el Plan de Estudios: 1) Gestión y Organización Industrial, 2) Diseño Mecánico, 3) Electroenergética, 4) Electrónica y Automática y 5) Química.

En cada convocatoria se elegirá para cada Materia Optativa entre la lista de los profesores con docencia de los Grados de la familia Industrial a 4 profesores para formar parte de los Tribunales de Trabajos Fin de Grado cuya composición será la de Presidente, Secretario y dos Vocales. En cada tribunal el presidente será preferentemente un profesor del área de la Materia Optativa. Las designaciones de los profesores se realizarán de forma rotativa.”

- *“Descripción del acto de defensa”*

“La presentación consiste en que, a lo largo de la sesión, los miembros del tribunal (juntos o individualmente) reciben una explicación por parte del alumno y las respuestas a las preguntas que pudieran formular. El alumno se mantiene en el póster durante la sesión o bien se cita con los miembros del tribunal. Fuera del tiempo de explicación del alumno a los miembros del tribunal los posters quedan a exposición pública y el alumno puede atender a los interesados en el trabajo.”

- *“Criterios de valoración orientativos. Establece los siguientes criterios y ponderación: “Calidad científica y técnica del TFG presentado-30%”, “Calidad del material*

entregado-30%", "Claridad expositiva-25%" y "Capacidad de debate y la defensa argumental-15%"

- *"Observaciones"*

"El Tribunal rellenará el Acta con las calificaciones correspondientes y la firmará.

El Presidente entregará en el Negociado de la Escuela el Acta, los documentos con las calificaciones y la copia en formato pdf del Trabajo Fin de Grado. El Negociado publicará las calificaciones.

Cuando parte del Trabajo Fin de Grado haya sido realizado con la ayuda y participación de empresas privadas, el Director del Trabajo podrá solicitar a la Comisión Académica, que para su depósito en la biblioteca se entregue una versión de la memoria en la que aquellos datos confidenciales de la empresa o del Trabajo fin de Grado sean omitidos.

Los alumnos que lo soliciten recibirán por escrito una argumentación de las deficiencias observadas por el Tribunal."

Termina la Guía docente con una observación en su apartado 8, sobre competencias lingüísticas en inglés, que dice: *"Se admite, sin ser obligatorio, la presentación del documento y defensa en inglés. En el caso de alumnos que realizan el proyecto en un programa de intercambio internacional, podrán presentar el documento en el idioma de la universidad en el que se realiza el trabajo"*.

4.3 Normativa del Trabajo Fin de Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación (ETSIIyT) (Comisión Académica de 19 de noviembre de 2021)

Su contenido establece las siguientes condiciones:

"1. CONSIDERACIONES GENERALES

1. El Trabajo Fin de Grado (en adelante TFG) es un trabajo original, autónomo y personal realizado por el estudiante, cuyo objetivo es mostrar la adquisición de competencias asociadas a la titulación.

2. El TFG debe ser dirigido por un "Director de Trabajo". El estudiante deberá confeccionar una memoria que recoja el trabajo realizado, el cual defenderá en sesión pública ante un Tribunal, que lo calificará. El trabajo contendrá suficientes elementos de creación personal y citarán adecuadamente todas las fuentes usadas.

2. TIPOS DE TRABAJO

Los TFG atenderán a una de las siguientes tipologías:

a) Proyecto clásico: pueden versar, por ejemplo, sobre el diseño e incluso la fabricación de un prototipo, la ingeniería de una instalación de producción, la implantación de un sistema en cualquier campo de la ingeniería o un proyecto integral de naturaleza profesional. En este apartado se incluyen los Proyectos de Instalaciones y Plantas Industriales.

b) Estudios técnicos, organizativos o económicos: realización de estudios de equipos, sistemas, servicios, productos y mercados que traten cualquiera de los aspectos de diseño, planificación, producción, gestión, explotación, comunicación, información y cualquier otro propio de los campos de estudio de la titulación, que integre las competencias propias de la misma, relacionando cuando proceda alternativas técnicas con evaluaciones económicas, discusión y valoración de los resultados. En este apartado se incluyen los Proyectos de Desarrollo de Prototipos.

c) Trabajos teóricos, experimentales o numéricos, trabajos de naturaleza teórica, computacional o experimental, en conexión con las líneas de investigación y desarrollo de los Departamentos implicados en la Titulación, que constituyan una contribución a la técnica en los diversos campos de estudio de la Titulación, incluyendo, cuando proceda, evaluación económica, discusión y valoración de los resultados. En este apartado se incluyen los Proyectos de Productos Software, los Proyectos de Investigación y los Proyectos de Consultoría y Auditoría.

3. DIRECCIÓN

1. El Director de un Trabajo Fin de Grado puede ser un profesor que imparta docencia en alguno de los Grados y Másteres de la familia Industrial de la Escuela, esto es, Grados en Ingeniería en Tecnologías Industriales, Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Electrónica y Automática, Ingeniería Química y Másteres en Ingeniería Industrial y de Investigación en Ingeniería Industrial. Igualmente, pueden ser Directores de un TFG los investigadores con suficiencia investigadora que impartan docencia en dichas titulaciones. Los profesores de la Escuela que no impartan docencia en alguna de las titulaciones mencionadas podrán ser directores de un TFG con el visto bueno de la Comisión Académica.

2. El TFG podrá ser realizado en una empresa bajo la dirección de un titulado superior de la misma. Se incluyen también en este supuesto los titulados (ingeniero, licenciado, arquitecto, y grado o máster universitario) contratados por la Universidad de Cantabria en proyectos de investigación. En estos dos supuestos la propuesta deberá contar con la aprobación del Subdirector-Jefe de estudios. Dicha propuesta ha de especificar, a la vez, la designación de un Profesor Ponente, que cumpla las condiciones para ser director del TFG según se indica en el apartado anterior. Dicho Profesor Ponente actuará de coordinador entre el director del TFG y el Centro.

3. El Trabajo Fin de Grado podrá ser co-dirigido," (codirigido,) "siempre que los Directores cumplan los requisitos anteriores, y haciendo constar una lista de los mismos en la memoria.

4. La realización del TFG dentro del programa Erasmus - Sócrates u otros convenios de colaboración referentes al Plan de Estudios tendrá la convalidación que se contemple en el propio convenio.

4. CONTENIDO Y ESTRUCTURA DEL TFG

1. El Trabajo Fin de Grado se realizará preferentemente de acuerdo con el concepto clásico de Proyecto que se recoge en la norma UNE 157001 "CRITERIOS GENERALES PARA LA ELABORACIÓN DE PROYECTOS", estructurado en los ocho documentos básicos: Índice General, Memoria, Anexos (Cálculos, Seguridad, Medio Ambiente, etc.), Planos, Pliego de Condiciones, Estado de Mediciones, Presupuesto y, cuando proceda, Estudios con Entidad Propia.

2. Dependiendo del tipo de Trabajo, especialmente los ligados a modelos experimentales y prototipos, o con alto contenido informático, puede ser conveniente otra estructuración más

acorde con la naturaleza de estos proyectos. En esos casos se mantendrá en lo posible y con las adaptaciones necesarias la estructura tradicional, ya que ello facilitará su posterior análisis y revisión y proporcionará uniformidad en la presentación.

3. El Trabajo Fin de Grado realizado quedará plasmado en un documento en formato PDF.

4. El formato respetará lo indicado al final de esta normativa.

5. MATRÍCULA Y CONVOCATORIAS DEL TFG

1. La matrícula del TFG se podrá efectuar en cualquiera de los períodos hábiles abonando las tasas correspondientes a los créditos fijados para el mismo. Los plazos de matrícula del TFG serán establecidos por el Negociado del Centro.

2. Si el estudiante está matriculado del TFG y no puede defenderlo en dicho curso académico, deberá matricularse nuevamente cuando esté en disposición de defenderlo.

3. Las convocatorias ordinarias en un curso académico se harán públicas en un plazo máximo de un mes desde el inicio del curso. Los estudiantes podrán solicitar la convocatoria de tribunal de forma extraordinaria en otras fechas que estarán sujetas al informe favorable del Jefe de Estudios.

6. ASIGNACIÓN DEL TÍTULO Y DIRECTOR DEL TFG

1. El tema del TFG podrá definirse entre el alumno y el Director del trabajo o ser asignado por el Área de Proyectos de Ingeniería.

2. Para iniciar el desarrollo del TFG, su título y sus líneas de desarrollo deberán contar con la conformidad del Tribunal correspondiente que esté en activo en ese momento. A tal efecto, el alumno lo solicitará en el Negociado de la Escuela mediante la Ficha de Asignación recogida en el anexo y que se deberá presentar al menos en la convocatoria anterior a la de la defensa del proyecto. En el caso de que el informe sea desfavorable, el Tribunal deberá justificar razonadamente el mismo.

7. DESIGNACIÓN DE TRIBUNALES

1. Para evaluar los TFG se constituirá un Tribunal para la Titulación.

2. En cada convocatoria se elegirá entre los profesores con docencia en Grados de la familia Industrial a 3 profesores (1 presidente, 1 secretario y un 1 vocal) para formar parte del Tribunal. Asimismo, se designará a un suplente que deberá estar presente en la constitución del tribunal y actuar como miembro cuando fuera necesario.

3. La composición del Tribunal se hará pública con suficiente antelación.

4. La designación de un profesor como miembro del Tribunal es irrenunciable, salvo causa de fuerza mayor o circunstancia especial que lo impida. En este último caso el profesor deberá solicitar su renuncia por escrito, dirigido al Subdirector-Jefe de Estudios y al director de departamento correspondiente, manifestando el motivo.

5. La designación de los profesores será rotativa. En el caso de fuerza mayor o circunstancia especial que impida actuar como tribunal a un miembro designado éste pasará a formar parte del tribunal inmediatamente siguiente.

8. PRESENTACIÓN A EXAMEN

1. Sólo podrán proceder a la presentación del TFG los alumnos que hayan aprobado todos los demás créditos de la Titulación y tengan la conformidad del Tribunal a través de la ficha de asignación.

2. Para proceder a la presentación del TFG, el Director del proyecto o el Ponente, dará previamente su autorización por escrito, según la ficha de autorización recogida en el anexo, y, si lo considera oportuno, podrá acompañarla de un informe para el Tribunal.

3. Para realizar el examen, el alumno deberá entregar en el Negociado del Centro el documento TFG y su resumen, ambos en formato PDF, según las indicaciones del anexo al menos cinco días antes del comienzo del acto de presentación. Al inicio del TFG se ha de incluir un resumen que, junto con el título, deben estar redactados en español y en inglés.

4. El Jefe de Estudios propondrá la fecha y hora de convocatoria del Tribunal.

5. El Negociado del Centro será el encargado de publicar el lugar, fecha y hora para la presentación de los trabajos y hará llegar a cada miembro del Tribunal una copia (PDF) de los documentos del TFG, con una antelación de, al menos, cuatro días antes de la presentación del TFG. En el caso de que alguno de los miembros del Tribunal, a la vista de la memoria

considere que el trabajo no tiene la calidad suficiente para ser declarado apto, al menos 24 horas antes de defensa pública lo comunicará al Subdirector-Jefe de Estudios de la titulación, que se lo hará saber al estudiante y al resto de miembros del tribunal. El Subdirector-Jefe de Estudios se reunirá con los miembros del Tribunal para resolver de la forma más adecuada.

6. Para que actúe el Tribunal deberán estar presentes tres miembros del mismo. La presidencia recaerá en el profesor de mayor categoría docente y antigüedad. Ejercerá como secretario el profesor de menor categoría docente y antigüedad.

7. La presentación ha de realizarse en formato póster en una sesión pública de hasta tres horas de duración como tiempo de referencia. Es decir, el alumno se apoyará en un póster de tamaño A1 y podrá añadir, opcionalmente, una presentación utilizando un ordenador portátil o la presentación de un demostrador en una pequeña mesa. La presentación consiste en que, a lo largo de la sesión, los miembros del tribunal (juntos o individualmente) reciben una explicación por parte del alumno y las respuestas a las preguntas que pudieran formular. El alumno se mantiene en el póster durante la sesión o bien se cita con los miembros del tribunal. Fuera del tiempo de explicación del alumno a los miembros del tribunal los posters quedan a exposición pública y el alumno puede atender a los interesados en el trabajo.

9. EVALUACIÓN DEL TFG

1. Una vez finalizadas todas las presentaciones de una convocatoria, el Tribunal calificará los TFG teniendo en cuenta la calidad del contenido del documento, la adecuación de la estructura, la claridad en la exposición, las respuestas dadas a las preguntas que le formulen y, en su caso, la información aportada por el Director del TFG.

2. El Tribunal rellenará el Acta con las calificaciones correspondientes y la firmará.

3. El Presidente entregará en el Negociado de la Escuela el Acta los documentos con las calificaciones del Trabajo Fin de Grado. El Negociado publicará las calificaciones.

4. Cuando parte del TFG haya sido realizado con la ayuda y participación de empresas privadas, el Director del Proyecto podrá solicitar a la Comisión Académica de los estudios correspondientes, que para su depósito en la biblioteca se entregue una versión de la memoria en la que aquellos datos confidenciales de la empresa o del TFG sean omitidos.

5. Los alumnos que lo soliciten recibirán por escrito una argumentación de las deficiencias observadas por el Tribunal.

10. REPOSITORIO UCrea

1. Con el fin de dar cumplimiento a la normativa sobre política institucional de acceso abierto a la producción académica, científica e investigadora de la Universidad de Cantabria (Repositorio Ucrea), una vez finalizada la presentación de los TFG, aquellos que resulten aprobados deberán depositarse en el repositorio institucional de acceso abierto de la UC.

2. Para realizar este depósito, la Secretaría del Centro enviará una copia de los trabajos en formato electrónico a la Biblioteca Universitaria junto con el documento de consentimiento de los autores y la modalidad de acceso elegida.

3. La Biblioteca se ocupará también de la conservación de los trabajos cuya difusión no haya sido autorizada por los autores y garantizará el acceso a los mismos para evaluadores, gestores u otras personas en los términos previstos en las disposiciones aplicables.

11.- PROYECTOS FIN DE GRADO REALIZADOS EN PROGRAMAS DE INTERCAMBIO (Adaptación de lo aprobado en JUNTA DE ESCUELA DE 26- Junio-2008)

En el caso de que un alumno que participe en un programa de intercambio: Erasmus, u otro, incluya el TFG en el acuerdo académico deberá presentar en el Negociado de la Escuela la memoria del Trabajo Fin de Grado en disco compacto, con carátula correspondiente e impresos solicitados a todos los estudiantes del Grado (autorización de consulta en línea y documento de recogida de datos de egresados).”

En el caso de que dicho alumno no se matricule del TFG, se aplicará el punto 1.11 del título VII de la Normativa de Gestión Académica.

11.1 Compromiso del estudiante

El estudiante se compromete a realizar su matrícula conforme a la normativa de la Universidad en general y del Centro en particular. En dicha matrícula deberán incluirse todas las asignaturas previstas en el impreso del Plan de Estudios.

Si el alumno no cumple el compromiso indicado en la normativa no se considera el TFG realizado en el programa de intercambio para su inclusión en el expediente.

Para el caso en el que el Alumno que participa en el programa de intercambio, incluyendo el TFG en el acuerdo académico, se haya matriculado en éste, pero al finalizar el programa de intercambio no haya superado todos los créditos del plan de estudios a excepción del TFG

a) Se le guarda la calificación a la espera de la última convocatoria del curso que corresponde a su programa de intercambio.

b) Si al finalizar el curso sigue en la misma circunstancia de no haber superado todos los créditos:

Se le asigna un director y podrá presentar el trabajo realizado en el programa de intercambio ante el tribunal de TFG cuando el director dé el “visto bueno” con la ficha de “autorización de presentación a examen”.

No requiere el trámite de aprobación de la ficha de “asignación de título y director”.

No requiere cambio de formato, sino que entrega el documento generado en la Universidad de destino, aportando un resumen en castellano e inglés.

El Presidente podrá solicitar al Coordinador Erasmus la calificación obtenida por el alumno en la Universidad de destino traducida al sistema Español.” (español).” Esta calificación no condiciona la decisión del tribunal.”

Esta normativa de la ETSIlyT nombra los impresos relativos a estas condiciones académicas y cita como anexos los siguientes:

- Ficha de asignación de título y director del Trabajo Fin de Grado
- Ficha de autorización de presentación a examen del Trabajo Fin de Grado
- Hoja de Resumen del Trabajo Fin de Grado
- Formatos (portada e índices generales) del documento Trabajo Fin de Grado

También nombra otro impreso de consentimiento para depósito en el repositorio institucional UCrea para dar cumplimiento a la normativa anterior de Gestión Académica, pero no se incluye en el anexo.

Adicionalmente, la ETSIIyT solicita otro impreso para el seguimiento de sus egresados. Los impresos administrativos necesarios pueden obtenerse en la web de la ETSIIyT y se relacionan a continuación:

- Ficha de asignación de título y director del Trabajo Fin de Grado
- Ficha de autorización de presentación a examen del Trabajo Fin de Grado
- Impreso de consentimiento UCrea
- Impreso de seguimiento de egresados

5 Normar técnicas formales del documento

Sin perjuicio de las recomendaciones del apartado 4.2 y las instrucciones del apartado 4.3 sobre condiciones formales de estructura y edición del documento, el autor considera que en estos trabajos académicos resulta oportuno aplicar los criterios generales de los documentos profesionales Informe Pericial, Proyecto Técnico y Proyecto de actividad, regulados en las normas UNE 197001 de julio de 2019, UNE 157001 de junio de 2014, y UNE 157601 de julio de 2007. Por este motivo, a continuación, se establecen las condiciones formales del documento.

Dado el objeto del Trabajo Fin de Grado, se descarta el formato de proyecto de actividad y se adopta el de informe pericial con adiciones del formato de proyecto técnico. Estas condiciones se concretan en las correspondencias, modificaciones y consideraciones siguientes (en mayúsculas se nombran los documentos del TFG).

- Se atienden las consideraciones sobre título, identificación (inicial y final) y paginación del informe pericial.
- La declaración de tachas y el juramento o promesa del informe pericial no procede incluirlos y se descartan.
- Se adopta el índice general del informe de pericial agregando apartados para los documentos procedentes del formato del proyecto técnico, simplemente ÍNDICE GENERAL del TFG. En este sentido, el cuerpo del informe y los anejos se corresponden con la Memoria y los Anexos del TFG, respectivamente. Los apartados añadidos al Índice General se corresponden con documentos agregados que se citan más tarde y son: Planos, Pliego de Condiciones, Mediciones, Presupuesto y Estudios con Entidad Propia (si es el caso).
- El cuerpo del informe se corresponde con la memoria del proyecto técnico, simplemente MEMORIA del TFG. La memoria del TFG se estructura con las pautas de un informe pericial, en las siguientes partes: objeto, alcance, antecedentes, consideraciones preliminares, documentos de referencia, terminología y abreviaturas, desarrollo del estudio y conclusiones.

- Los anejos del informe se corresponden con los anexos del proyecto técnico, simplemente ANEXOS del TFG.
- Se añaden los documentos PLANOS, PLIEGO DE CONDICIONES, MEDICIONES y PRESUPUESTO como en los proyectos técnicos.
- El documento MEDICIONES no procede porque este trabajo no comporta una realización material ni actividades experimentales. Carece de contenido concreto.
- El documento PRESUPUESTO no procede porque este trabajo no comporta una realización material ni ha requerido costes económicos de desarrollo. Carece de contenido concreto.
- No se incluye el documento ESTUDIOS CON ENTIDAD PROPIA.

En relación con el apartado Documentos de referencia de la Memoria se establecen las condiciones de presentación de referencias conforme a los indicado en la norma UNE-ISO 690:2013, sub-apartado 5.2 en este apartado.

5.1 Norma de Informes Periciales UNE 197001

A continuación, se incluyen los contenidos de la norma sobre criterios generales para la elaboración de informes periciales, que serán de aplicación en el formato de este TFG. Los puntos 0 a 4 de la norma no son de aplicación en los TFG.

El contenido del TFG atenderá a lo indicado en el apartado 5, sobre contenido del informe pericial, que extractamos y relacionamos a continuación:

“Todo informe pericial debe constar de la siguiente estructura básica:

a) Título.

b) Identificación.

c) Paginación.”

La declaración de tachas y el requisito de veracidad no son de aplicación en los TFG y no forman parte del contenido del TFG.

“f) Índice del cuerpo del informe y de los anejos (si procede).

g) Cuerpo del informe.

h) Anejos (si procede).

5.1 Título

Todo informe pericial debe tener un título que lo identifique de forma clara e inequívoca.

5.2 Identificación

Es el elemento que contiene los datos necesarios, que a continuación se detallan, para identificar el informe pericial:

5.2.1 Al inicio del informe

a) El título y su código o referencia de identificación. Debe existir una correspondencia unívoca entre el código o la referencia del informe correspondiente, de forma que no pueda haber en un mismo emisor otro informe que disponga de la misma identificación.

b) El nombre del organismo u organismos a los que se dirige el informe pericial y el número de expediente o procedimiento, si lo hubiera.

c) El nombre y apellidos del perito, su titulación, y, en su caso, colegio o entidad a la que pertenece, número de colegiado/asociado y si dispone de número de registro como profesional experto certificado o certificado de cualificación profesional en la materia objeto de la pericia, documento de identificación, domicilio profesional, teléfono, fax, correo electrónico y cualquier otro identificador profesional que pudiera existir, salvo aquellos cuya revelación no sea legalmente procedente.

d) El nombre, apellidos y documento de identificación del solicitante del informe pericial, sea en nombre propio o en representación de otra persona física o jurídica, cuyos datos también deben figurar y cualquier otro identificador que pudiera existir, cuya revelación sea legalmente procedente.

e) En el caso en que el objeto del informe pericial contemple un emplazamiento geográfico concreto, se debe definir dicho emplazamiento (dirección y población) y, si procede, sus coordenadas geográficas.”

Los puntos f y g no son de aplicación en los TFG.

“...h) Cuando proceda, si existen más de un informe sobre un mismo asunto, ampliación o corrección, estos deben estar clara e inequívocamente identificados, indicando la referencia.

5.2.2 Al final del informe

a) Cuando proceda, la descripción del sistema del aseguramiento de la integridad del informe, utilizado por el perito.

b) La firma del perito o peritos autores del informe pericial.

c) La fecha de emisión del informe pericial.

5.3 Paginación

En todas las páginas del informe pericial debe figurar el código o referencia de identificación, el número de página y el número total de páginas.”

La declaración de tachas y el requisito de veracidad no son de aplicación en los TFG.

“...5.6 Índice general del cuerpo del informe y de los anejos

El índice general del informe pericial tiene como misión el facilitar la localización de todos y cada uno de los capítulos y apartados.

El índice debe indicar el número de página en que se inicia cada uno de los capítulos y apartados del informe pericial.

5.7 Cuerpo del informe pericial

5.7.1 Generalidades

El cuerpo del informe pericial es el documento principal de su estructura y asume la función de presentar y justificar las conclusiones.

El cuerpo del informe pericial debe ser claramente comprensible por todos los interesados, especialmente en lo que se refiere a sus objetivos, las investigaciones realizadas y las razones que han conducido a las conclusiones adoptadas.

5.7.2 Contenido

El orden y la denominación de los capítulos propuestos pueden variar si existen normas específicas para el tipo de pericia desarrollada o la entidad que va a realizar la pericial tiene procedimientos específicos.

A continuación, se indica la estructura mínima que debe tener el contenido de un informe pericial:

1 OBJETO

En este capítulo del cuerpo del informe pericial se debe indicar su finalidad.

2 ALCANCE

En este capítulo del cuerpo del informe pericial se deben indicar las cuestiones planteadas por el solicitante.

3 ANTECEDENTES

En este capítulo se deben indicar los hechos, cosas, sucesos o asuntos que se hayan producido con anterioridad al inicio del informe pericial, relacionados con la pericia en curso y que estén en conocimiento del perito.

4 CONSIDERACIONES PRELIMINARES

En este capítulo del cuerpo del informe pericial se deben enumerar todos aquellos datos de partida y actuaciones necesarias para la comprensión de la investigación llevada a cabo y su metodología empleada.

Se podrá incluir, en caso necesario, los criterios y técnicas utilizadas para garantizar la representatividad de la muestra objeto del informe pericial.

5 DOCUMENTOS DE REFERENCIA

Este capítulo del cuerpo del informe pericial debe recoger el conjunto de disposiciones normativas, otras normas de no obligado cumplimiento, la buena práctica profesional y la bibliografía que se han tenido en cuenta, y que hayan sido citadas en el informe pericial.

6 TERMINOLOGÍA Y ABREVIATURAS

En este capítulo del cuerpo del informe pericial se deben relacionar todas las definiciones de palabras técnicas, así como el desarrollo y significado de todas las abreviaturas o siglas que se hayan utilizado en el informe pericial.”

El punto 7 del contenido de informe pericial, relativo al desarrollo del estudio, es la parte central del TFG y también de su Memoria. Su estructura será acorde con la naturaleza del contenido técnico del TFG. No se establecen condiciones particulares para esta parte de la Memoria (desarrollo del estudio) en este Pliego de Condiciones.

“...8 CONCLUSIONES

En este capítulo del cuerpo del informe pericial se debe establecer de forma inequívoca la exposición técnica y experta resumida que se emite sobre los extremos que constan en el apartado 5.7.2 (punto 2 ALCANCE).

NOTA Se pueden añadir consideraciones adicionales que a juicio del perito maticen las conclusiones.

5.8 anejos

Los anejos forman parte inseparable de la estructura del informe pericial, y deben estar recogidos en el índice general.

Asimismo, deben estar identificados de manera correlativa y paginados de forma inequívoca.

Como anejo, el perito puede incluir las referencias, documentos, planos, fotografías, muestras y procedimientos de toma y conservación de las mismas, etc. que puedan fundamentar las conclusiones del informe pericial.”

5.2 Norma de Proyectos Técnicos UNE 157001

A continuación, se incluyen algunos contenidos de la norma sobre criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico, que serán de aplicación en el formato y edición de este TFG. Los puntos 0 a 5 de la norma no son de aplicación en los TFG con este tipo de estudios.

El contenido del TFG atenderá a lo indicado en los extractos de los apartados 6 a 11 que recopilamos a continuación.

En relación al apartado 6, sobre la memoria, y sub-apartado 6.1 sobre generalidades se indican las siguientes condiciones a aplicar en el documento Memoria del TFG:

“La Memoria es uno de los documentos que constituyen el Proyecto y asume la función fundamental de nexo de unión entre todos ellos.

Tiene como misión justificar las soluciones adoptadas” y sigue “y, conjuntamente con los planos y el pliego de condiciones, debe describir de forma unívoca el objeto del Proyecto.

La Memoria debe ser claramente comprensible, no sólo por profesionales especialistas sino por terceros, en particular por el cliente, y especialmente en lo que se refiere a los objetivos del Proyecto, las alternativas estudiadas, sus ventajas e inconvenientes, y las razones que han conducido a la solución elegida.”

Se añaden estas condiciones del sub-apartado 6.10 sobre el orden de prioridad entre los documentos:

“En este capítulo de la memoria el autor del Proyecto, frente a posibles discrepancias, debe establecer el orden de prioridad de los documentos del Proyecto.

Si no se especifica otra cosa, el orden de prioridad debe ser el siguiente:

1 Planos.

2 Pliego de condiciones.

3 Presupuesto.

4 Memoria.”

En relación al apartado 7, sobre los anexos, se indican las siguientes condiciones a aplicar en el documento Anexos del TFG:

“7.1 Generalidades

El documento Anexos está formado por los documentos que desarrollan, justifican o aclaran apartados específicos de la memoria u otros documentos del Proyecto.

7.2 Contenido

El documento Anexos, si forma parte de un volumen distinto al documento principal, se debe iniciar con un índice que haga referencia a cada uno de los documentos, capítulos y apartados que lo componen, con el fin de facilitar su utilización.

Este documento debe contener los anejos necesarios (según proceda en cada caso) correspondientes a:

- Documentación de partida. Este Anexo debe incluir aquellos documentos que se han tenido en cuenta para establecer los requisitos de diseño.

- Cálculos. Este Anexo o Anexos tienen como misión justificar las fórmulas aplicadas, las soluciones adoptadas y, conjuntamente con los documentos planos y el pliego de condiciones, debe describir de forma unívoca el objeto del Proyecto.

Debe contener las hipótesis de partida, los criterios y procedimientos de cálculo, así como los resultados finales base del dimensionado o comprobación de los distintos elementos que constituyen el objeto del Proyecto.

- Anexos de aplicación en función del ámbito del Proyecto, son por ejemplo:

- Seguridad (prevención de incendios, sanidad, radiaciones, pública concurrencia, etc.).

- Medio ambiente (acústica, residuos, emisiones, etc.).

- Eficiencia energética.

- Emplazamiento del proyecto, Geotécnicos, Hidráulicos, Hidrológicos, Pluviométricos, etc.

- Gestión de residuos.

- Otros.

- Estudios con entidad propia

Este documento debe contener todos aquellos estudios que deban incluirse en el Proyecto por exigencias legales.

Debe comprender, entre otros y sin carácter limitativo, los relativos a:

- *Estudio Básico de Seguridad y Salud o Estudio de Seguridad y Salud, según corresponda.*

- *Estudio de Impacto Ambiental.*

Cada anexo debe contener la justificación del cumplimiento de la normativa legal vigente aplicable y, si procede, de las fórmulas aplicadas para el cálculo.

- *Otros documentos que justifiquen y aclaren conceptos expresados en el Proyecto*

Se pueden incluir:

- *Catálogos de los elementos constitutivos del objeto del Proyecto.*

- *Listados.*

- *Información en soportes lógicos, magnéticos, ópticos o cualquier otro.*

- *Maquetas o modelos.*

- *Otros documentos que se juzguen necesarios.”*

En relación al apartado 8, sobre los planos, se indican las siguientes condiciones a aplicar en el documento Planos del TFG:

“8.1 Generalidades

El documento Planos es uno de los documentos que constituyen el Proyecto y tiene como misión, junto con la memoria, definir de forma unívoca el objeto del Proyecto.

8.2 Contenido

El documento Planos se debe iniciar con un índice que haga referencia a cada uno de los planos que contiene, indicando su ubicación en el documento, con el fin de facilitar su utilización.

Cada uno de los planos debe contener la información gráfica, alfanumérica, de códigos y de escala, necesaria para su comprensión y correcta ejecución de lo representado.

Los planos y la documentación técnica, en cuanto a principios generales de representación, cajetines, indicaciones, escritura, rotulación, acotación, símbolos gráficos, plegado, listas de elementos, escalas, métodos de proyección, formatos y presentación de los elementos gráficos y gestión de la información técnica asistida por ordenador, deben tener en cuenta, salvo

indicación en contra del autor del Proyecto, lo indicado en las siguientes Normas: UNE 1027, UNE 1032, UNE 1035, UNE 1039, UNE 1089-1, UNE 1089-2, UNE 1135, UNE 1166-1, UNE-EN ISO 3098-0, UNE-EN ISO 3098-2, UNE-EN ISO 3098-3, UNE-EN ISO 3098-4, UNE-EN ISO 3098-5, UNE-EN ISO 3098-6, UNE-EN ISO 5455, UNE-EN ISO 5456-1, UNE-EN ISO 5456-2, UNE-EN ISO 5456-3, UNE-EN ISO 5457, UNE-EN ISO 6433, UNE-EN ISO 10209-2, UNE-EN ISO 11442-1, UNE-EN ISO 11442-2, UNE-EN ISO 11442-3, UNE-EN ISO 11442-4, UNE-EN ISO 81714-1.”

En relación al apartado 9, sobre el pliego de condiciones, se indican las siguientes recomendaciones generales a aplicar en este documento Pliego de Condiciones del TFG:

“El Pliego de condiciones se debe iniciar con un índice que haga referencia a cada uno de los documentos, los capítulos y apartados que lo componen, con el fin de facilitar su utilización.

Debe contener:”, indicando sobre contenido relativo a normas y reglamentación en uno de sus puntos “d) La reglamentación y la normativa aplicables incluyendo las recomendaciones o normas de no obligado cumplimiento que, sin ser preceptivas, se consideran de necesaria aplicación al Proyecto a criterio de su autor.”

En relación al apartado 10, sobre mediciones, se indican las siguientes recomendaciones a aplicar en el documento Mediciones del TFG:

Sobre generalidades, *“El documento mediciones es uno de los documentos del Proyecto y tiene como misión definir y determinar las unidades de cada partida o unidad de obra que configuran la totalidad del producto, obra, edificio, instalación y servicios objeto del Proyecto, basándose en la información contenida en el documento “Planos”.*

Debe incluir el número de unidades y definir las características, modelos, tipos y dimensiones de cada partida de obra o elemento del objeto del Proyecto.

Preferentemente se debe utilizar el sistema internacional de unidades conforme a la Norma UNE 82100 (partes 0 a 13).

Se debe utilizar el concepto de partida alzada en aquellas unidades de obra en que no sea posible desglosar, en forma razonable, el detalle de las mismas.”

Y sobre contenido, “El documento Mediciones, si forma parte de un volumen distinto al principal, se debe iniciar con un índice que haga referencia a cada uno de los documentos, los capítulos y apartados que lo componen, con el fin de facilitar su utilización.

Debe contener un listado completo de las partidas de obra que configuran la totalidad del Proyecto.

Se debe subdividir en distintos apartados o subapartados, correspondientes a las partes más significativas del objeto del Proyecto.

Debe servir de base para la realización del Presupuesto.”

En relación al apartado 11, sobre presupuesto, se indican las siguientes recomendaciones a aplicar en el documento Presupuesto del TFG:

Sobre generalidades, “El Presupuesto es uno de los documentos del Proyecto y tiene como misión determinar el coste económico, en unidades monetarias, de la ejecución material del objeto del Proyecto especificando las partidas ejecutadas por contrata y/o por administración.

Se debe basar en el documento de Mediciones y seguir su misma ordenación.

En los proyectos administrativos es suficiente un resumen de las partidas más importantes (obras, cada una de las instalaciones, mobiliario y maquinaria, medidas correctoras, prevención de incendios, etc.).”

Y sobre contenido, “El Presupuesto se debe iniciar con un índice que haga referencia a cada uno de los documentos, los capítulos y apartados que lo componen, con el fin de facilitar su utilización.

El Presupuesto debe contener:

- un cuadro de precios unitarios de materiales, mano de obra y elementos auxiliares que componen las partidas o unidades

de obra;

- un cuadro de precios unitarios de las unidades de obra, de acuerdo con el documento de mediciones y con la descomposición correspondiente de materiales, mano de obra, elementos auxiliares y costes indirectos;

- el presupuesto propiamente dicho que contenga la valoración económica global, desglosada y ordenada según el documento

de mediciones.

El Presupuesto debe establecer el alcance de los precios, indicando claramente si incluyen o no conceptos tales como:

- gastos generales y beneficio industrial;
- impuestos, tasas y otras contribuciones;
- seguros;
- costes de certificación y visado;
- permisos y licencias; y
- cualquier otro concepto que influya en el coste final de materialización del objeto del proyecto.”

5.3 Norma sobre Información y documentación, de directrices para la redacción de referencias bibliográficas y de citas de recursos de información.

La citación y listado de documentos referenciados en cualquier parte del TFG atenderá a las condiciones estipuladas en la norma UNE-ISO 690 de mayo de 2013.

MEDICIONES

Este documento de mediciones forma parte del TFG con motivo del formato mixto adoptado de la norma UNE 157001 para la redacción de proyectos técnicos y la norma UNE 197001 para la elaboración de informes periciales. Sin embargo, dado el objetivo y el contenido del proyecto, no ha sido necesaria la realización de mediciones físicas, por lo que no se incluirá contenido alguno en este documento.

PRESUPUESTO

El documento de presupuesto se incluye en este TFG con motivo de la estructura mixta adoptada de la norma UNE 157001 para la redacción de proyectos técnicos y la norma UNE 197001 para la elaboración de informes periciales. Sin embargo, para la realización del proyecto se han utilizado los medios dispuestos por el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética sin incurrirse en gastos adicionales, por lo que no se incluirá ningún contenido en este documento.

IDENTIFICACIÓN FINAL

ASEGURAMIENTO DE LA INTEGRIDAD DEL TRABAJO FIN DE GRADO	
Normativa general	- Orden CIN/351/2009 del Ministerio de Ciencia e Innovación de 9 de febrero
Normativa legal universitaria	- Real Decreto 822/2021 de 28 de septiembre - Resolución de 15 de abril de 2013 de la UC - Memoria de verificación del Grado Universitario en Ingeniería en Tecnologías Industriales de la UC
Normativa administrativa universitaria	- Acuerdo de Consejo de Gobierno de la UC de 17 de febrero de 2023 (gestión académica de grado) - Guía Docente de la asignatura G733 del TFG - Acuerdo de Comisión Académica de la ETSIIyT de 19 de noviembre de 2021 (normas TFG-GITI) - Repositorio Ucrea (https://web.unican.es/buc)
PRESENTACIÓN Y DEFENSA DEL TRABAJO FIN DE GRADO	
Lugar	Sala: Vestíbulo ETSIIyT Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación (ETSIIT). Universidad de Cantabria (UC)
Fecha	21 de junio de 2024
Tribunal académico	Tribunal Titular: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sancibrían Herrera, Ramón ▪ Díaz Rodríguez, F. Javier ▪ Bernardos Llorente, Pilar Tribunal suplente <ul style="list-style-type: none"> ▪ Blanco Wong, Haydee
FIRMA DEL AUTOR Y FECHA	
21 de junio de 2024	