

## Trabajo Fin de Grado

ANÁLISIS DE UN AUTOTRANSFORMADOR  
COMERCIAL (2,5 kVA) MEDIANTE EL  
MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

ANALYSIS OF A COMMERCIAL  
AUTOTRANSFORMER (2,5 kVA) USING THE  
FINITE ELEMENTS METHOD

Autor/es

Daniel González Yeguas

Director/es

Antonio Usón Sardaña

Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
Universidad de Zaragoza  
2019



## AGRADECIMIENTOS:

El trabajo que aquí se presenta, no hubiese sido posible sin el grandísimo apoyo, dedicación e implicación de mi tutor Antonio Usón, por ello quiero comenzar el presente trabajo agradeciéndole toda su ayuda, tanto en este trabajo como en su labor como docente de las asignaturas de Líneas Eléctricas y Física II.

También agradecer a mi familia y mi pareja Andrea todo el apoyo brindado, por creer en mí y por acompañarme en los buenos y malos momentos de toda esta etapa.

Agradecer también, su labor docente a todos los profesores implicados en mi enseñanza durante mi estancia como estudiante, pero en especial nombrar a dos personas que, aparte de transmitirme un gran conocimiento debido a su implicación docente, me transmitieron grandes valores personales.

Ellos son:

Felipe Petriz, mi tutor de Matemáticas III.

Dolores Leris, mi tutora de Matemáticas II.

A todos ellos, gracias de corazón.

## Contenido

1. INTRODUCCIÓN GENERAL .....	6
1.1. Objetivos .....	6
1.2. Definición del Autotransformador .....	6
1.3. Breve introducción histórica .....	7
1.4. Principio de funcionamiento .....	8
1.5. Posibilidades de funcionamiento .....	9
1.5.1. Reductor – Sustractivo .....	9
1.5.2. Reductor-Aditivo .....	9
1.5.3. Elevador-Sustractivo .....	10
1.5.4. Elevador-Aditivo .....	10
1.6. Deducción del circuito equivalente correspondiente a la configuración Reductor-Aditivo. .....	10
1.7. Descripción del autotransformador seleccionado .....	12
1.7.1. Especificaciones facilitadas por el fabricante.....	12
1.7.2. Especificaciones obtenidas en laboratorio .....	13
1.8. Ventajas y desventajas frente a los transformadores clásicos .....	17
1.8.1. Ventajas.....	17
1.8.2. Desventajas .....	17
1.9. Aplicaciones.....	17
2. ENSAYOS DE LABORATORIO .....	19
2.1. Características físicas .....	19
2.2. Ensayos de laboratorio realizados .....	19
2.2.1. Ensayo de vacío .....	21
2.2.2. Ensayo de vacío para estimar la curva de magnetización.....	23
2.2.3. Ensayo de cortocircuito.....	25
2.3. Circuito equivalente exacto.....	28
3. SIMULACIONES MEDIANTE FEMM 2D.....	30
3.1. Método elementos finitos (M.E.F) .....	30
3.2. Modelos utilizados en el análisis en FEMM2D .....	31
3.2.1. Modelo Planar .....	31
3.2.2. Modelo Axisimétrico .....	32
3.3. Propiedades de los materiales utilizados en FEMM2D .....	32
3.3.1. Propiedades del bloque del conductor (ALUMINIUM, 1100) .....	33

3.3.2. Propiedades del bloque de la chapa ferromagnética (CHAPA AUTO) .....	33
3.3.3. Propiedades del bloque del aire (AIR).....	35
3.4. Condiciones de contorno .....	35
3.5. Propiedades de los bloques creados en FEMM2D.....	36
3.5.1. Descripción del bloque del aire (AIR) .....	36
3.5.2. Descripción del bloque de la chapa ferromagnética (CHAPA AUTO).....	36
3.5.3. Descripción del bloque de los bobinados serie y común .....	37
3.6. Simulación del ensayo de vacío en FEMM2D.....	38
3.6.1. Resultados del ensayo de vacío con modelo Planar .....	38
3.6.2. Ensayo de vacío modelo Axisimétrico .....	39
3.7. Simulación del ensayo de cortocircuito en FEMM2D .....	40
3.7.1. Resultados de las simulaciones .....	41
3.8. Comparativa de resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio y las simulaciones en FEMM2D.....	42
4. ANEXO I. PLANOS .....	45



## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN GENERAL

## 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

### 1.1. Objetivos

El objetivo del presente trabajo fin de grado es, tras la compra de un autotransformador comercial de 2 500 VA, analizar y comparar su comportamiento experimental en el laboratorio y el comportamiento teórico utilizando la herramienta de cálculo denominada Método de los Elementos Finitos (M.E.F). Con ello trataremos de verificar los resultados numéricos con los obtenidos experimentalmente.

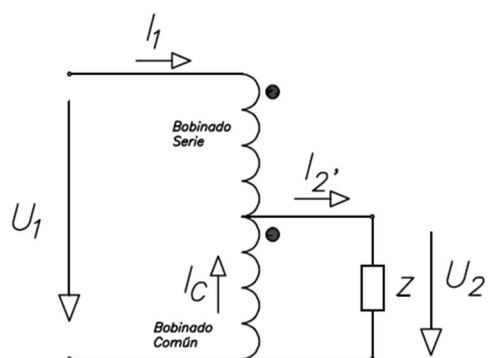
### 1.2. Definición del Autotransformador

El transformador monofásico es una máquina estática la cual transforma una tensión alterna de entrada en una tensión alterna de salida distinta, sin modificar su potencia, es decir, en un caso ideal de la máquina, la potencia de entrada es igual a la de salida; esto no siempre es así, ya que existen dos tipos de pérdidas que siempre están presentes en este tipo de máquinas:

- Pérdidas en el hierro del circuito magnético
- Pérdidas en el aluminio de los bobinados

El autotransformador no es más que un caso particular del transformador, pero la principal diferencia es que solo cuenta con un único devanado el cual va bobinado sobre el núcleo magnético. Este devanado actúa a su vez como primario y secundario, esto quiere decir que están unidos galvánicamente. A lo largo de este trabajo definiremos los devanados como bobinado serie y bobinado común; el circuito también se puede ver como un divisor de tensión.

Mi autotransformador puede trabajar en ambos sentidos, es decir, como reductor y como elevador, pero su función principal sería la de reductor, y según la dirección de sus bobinados es un autotransformador reductor aditivo.



**Ilustración 1.1** Autotransformador Reductor - Aditivo

### 1.3. Breve introducción histórica

Tal y como hemos comentado en el punto anterior el autotransformador es un caso particular del transformador. Aunque trabaja como tal, no tiene las mismas características ni constructivas, ni técnicas. La principal diferencia entre estos dos elementos es que el autotransformador tiene un único devanado y esto le da una serie de ventajas sobre el transformador común. Para entender el funcionamiento de esta máquina debemos conocer las siguientes referencias históricas [FRA\_95]:

- **Michael Faraday (Septiembre 1791 – Agosto 1867)**  
Enunció la ley de inducción, la cual terminó en 1831.
- **James Clerk Maxwell (Junio 1831 – Noviembre 1879)**  
Su teoría del electromagnetismo, la cual apareció en su libro Tratado sobre la Electricidad y el Magnetismo, publicado en 1873, sintetizó en cuatro ecuaciones todos los fenómenos electromagnéticos observados hasta entonces, y permitió el desarrollo posterior de la tecnología eléctrica.
- **George Westinghouse (Octubre 1846 – Marzo 1914) / Nikola Tesla (Julio 1856 – Enero 1943)**  
El sistema de corriente alterna fue desarrollado por Nikola Tesla, con el apoyo capital de George Westinghouse.
- **Miksa Déri (Octubre 1854 – Marzo 1938), Ottó Titusz Bláthy (Agosto 1860 – Septiembre 1939) y Károly Zipernowsky (Abril 1853 – Noviembre 1942)**  
Entre 1884 y 1885, estos tres ingenieros crearon en Budapest (Hungría) el modelo “DBZ” de transformador de corriente alterna, este transformador fue basado en un diseño de Gaulard y Gibbs. Dedujeron la fórmula matemática de los transformadores, la cual iguala tensiones con número de espiras.
- **Primer transformador comercial de la historia**  
La aparición del primer transformador comercial fue en 1885 cuando George Westinghouse compró las patentes del modelo DBZ y las de Gaulard y Gibbs. Este, le encargó la tarea de construir un transformador de tipo ZBD a William Stanley para su uso comercial. Este diseño se comercializó por primera vez en 1886.



## 1.4. Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento del autotransformador es el mismo que el del transformador; están basados en el principio de campos magnéticos variables en el tiempo. La relación de transformación de cualquier autotransformador es la relación entre el número de espiras del devanado total (Bobinado Serie + Bobinado Común) y el número de espiras del bobinado común, tal y como dice la principal fórmula matemática que define estas máquinas, la cual también nos indicará la relación de transformación de esta. [FRA\_95]:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{U_s + U_c}{U_c} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{N_s + N_c}{N_c} = rt \quad [1]$$

Siendo:

$U_1$  = Tensión en el bobinado serie + bobinado común [V]

$U_2 = U_c$  = Tensión en el bobinado común [V]

$U_s$  = Tensión en el bobinado serie + bobinado común [V]

$N_1$  = Número de espiras totales

$N_2 = N_c$  = Número de espiras del bobinado común

$rt$  = Relación de transformación

Tal y como vemos en la ilustración 1.1, la tensión de la red primaria, es  $U_1$ , aplicada en la suma de los dos devanados. Como toda bobina con núcleo de hierro, en cuanto se aplica esa tensión circula una corriente. En el final del devanado serie tenemos un punto común con dos salidas, una será la toma positiva del secundario de la máquina y la otra salida será el principio del devanado común. Entre la toma final del devanado serie y el punto donde termina la bobina común tendremos el secundario de la máquina, siendo la tensión entre estos dos puntos  $U_2$ .

La potencia eléctrica en esta máquina, a diferencia de los transformadores clásicos, tiene dos formas de pasar del primario al secundario; estas dos formas son las siguientes [WIN\_02]:

- Potencia transferida por conducción
- Potencia transferida por inducción

Esta ecuación explica perfectamente las dos potencias que fluyen desde el primario al secundario. [WIN\_02]:

$$S_1 = U_1 \cdot I_1 = S_2 = U_2 \cdot I_2 = S_{COND} + S_{IND} = U_2 \cdot I_s + U_2 \cdot I_c \quad [2]$$

Donde:

$S_1$  = Potencia aparente en el primario [VA]

$S_2$  = Potencia aparente en el secundario [VA]

$I_1 = I_s$  = Intensidad por el primario, la cual recorre el bobinado serie [A]

$I_2$  = Intensidad en el secundario [A]

$I_c = (I_2 - I_1)$  = Intensidad en el bobinado común [A]

$S_{COND}$  = Potencia aparente transferida por conducción [VA]

$S_{IND}$  = Potencia aparente transferida por inducción magnética [VA]

## 1.5. Posibilidades de funcionamiento

Una vez descrito el funcionamiento de la máquina analizada procedemos a ver sus posibilidades de funcionamiento, las cuales van a depender de dos factores.

Según su conexión de alimentación la máquina podrá trabajar en dos direcciones:

- Reductor
- Elevador

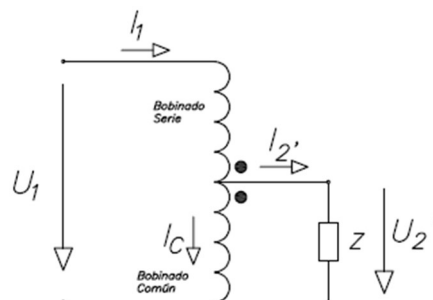
Dependiendo de su forma constructiva, en concreto dependiendo del sentido de bobinado de sus devanados, el autotransformador podrá trabajar en otras dos formas de trabajo.

- Sustractivo
- Aditivo

Combinando estas dos posibilidades de funcionamiento obtenemos cuatro formas de trabajo para el autotransformador

### 1.5.1. Reductor – Sustractivo

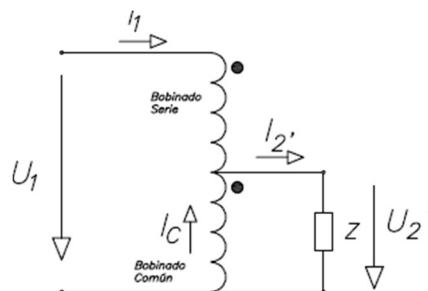
El autotransformador como Reductor-Sustractivo, tiene los devanados arrollados en oposición, y es alimentado por la fuente de alimentación en su lado de A.T. y la carga está conectada en el lado de B.T.



**Ilustración 1.2** Autotransformador Reductor - Sustractivo

### 1.5.2. Reductor-Aditivo

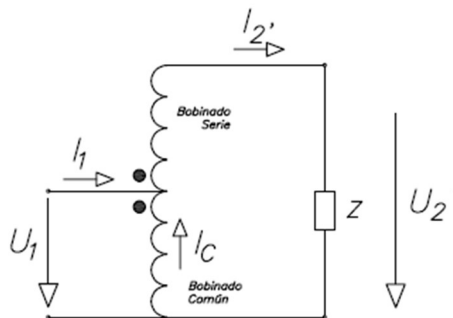
El autotransformador como Reductor-Aditivo tiene la fuente de alimentación y la carga como el anterior, ya que sigue siendo reductor, pero se diferencia en que los devanados van bobinados en serie y con el mismo sentido de arrollamiento.



**Ilustración 1.3** Autotransformador Reductor - Aditivo

### 1.5.3. Elevador-Sustractivo

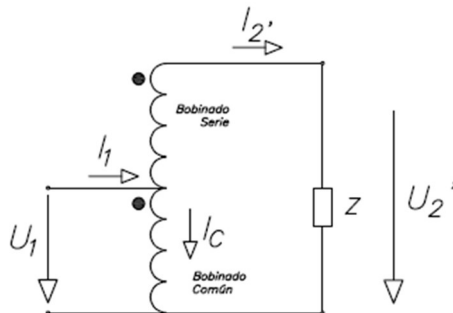
El autotransformador como Elevador-Sustractivo, está alimentado por el lado de B.T. y la carga conectada en el lado de A.T. y sus devanados están arrollados en oposición.



**Ilustración 1.4** Autotransformador Elevador - Sustractivo

### 1.5.4. Elevador-Aditivo

El autotransformador trabajando como Elevador-Aditivo, es alimentado por la fuente de alimentación por la parte de B.T. y la carga está conectada en el lado de A.T. y sus devanados están bobinados en serie y arrollados en el mismo sentido.

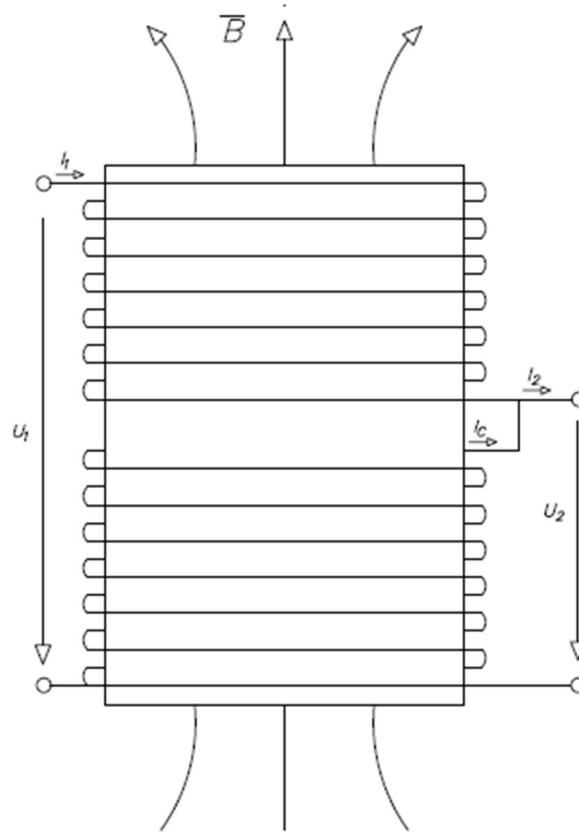


**Ilustración 1.5** Autotransformador Elevador – Aditivo

## 1.6. Deducción del circuito equivalente correspondiente a la configuración Reductor-Aditivo.

En este punto, voy a pasar a utilizar la teoría electromagnética, para demostrar los circuitos equivalentes que se usan en los análisis electrotécnicos.

La corriente procedente de la red, que circula por el devanado serie, crea un flujo común que atraviesa tanto el devanado serie como el común. Ese flujo magnético común, es el que da lugar a la aparición de la fuerza electromotriz ( $fem$ )  $U_2$  en la bobina común.



**Ilustración 1.6** Bobinado total sobre el núcleo ferromagnético

Siguiendo la segunda ley de Kirchhoff obtenemos la siguiente expresión:

$$U_1 = U_2 + U_c \quad [3]$$

Y según la ley de Faraday:

$$\Phi_{B_c} = \Phi_{B_s} = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad [4]$$

$$\varepsilon_c = (-) N_c \frac{d\Phi_B}{dt} \rightarrow \frac{d\Phi_B}{dt} = \frac{\varepsilon_c}{N_c}$$

$$\varepsilon_s = (-) N_s \frac{d\Phi_B}{dt} \rightarrow \frac{d\Phi_B}{dt} = \frac{\varepsilon_s}{N_s}$$

Igualando las dos expresiones obtenidas mediante la ecuación 4, obtenemos la siguiente expresión:

$$\frac{\varepsilon_c}{N_c} = \frac{\varepsilon_s}{N_s} \quad [5]$$

Siendo:

$\varepsilon_s$  = fem producida por el bobinado serie [V]

$\varepsilon_c$  = fem producida por el bobinado común [V]

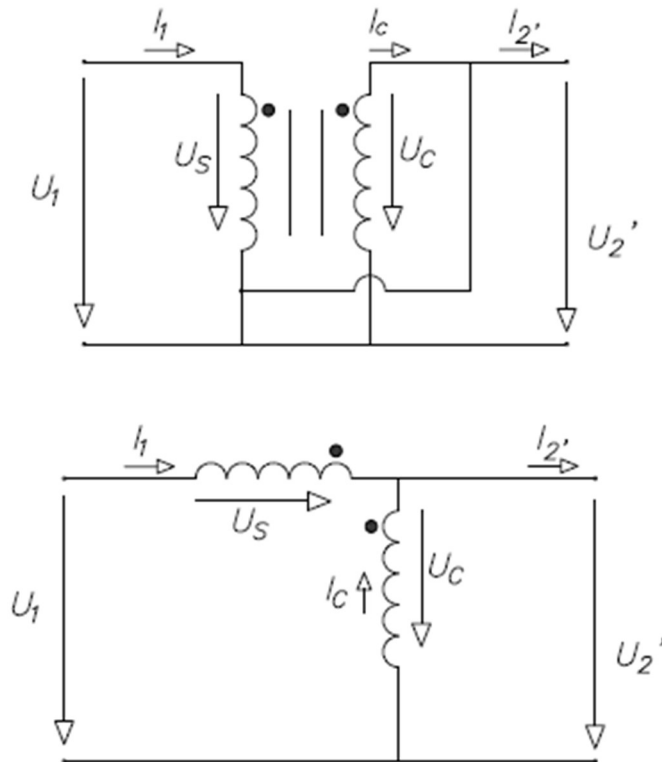
Ahora siguiendo la Ley de Ampère, podemos obtener la siguiente expresión:

$$N_C \cdot I_C - N_S \cdot I_S = \Phi_B \cdot \mathcal{R} \quad [6]$$

Siendo:

$\Phi_B$  = Flujo magnético en el núcleo [Wb]

$\mathcal{R}$  = Reluctancia  $\left[ \frac{A \cdot Vuelta}{Wb} \right]$



**Ilustración 1.7** Circuito equivalente según la teoría electromagnética

## 1.7. Descripción del autotransformador seleccionado

El autotransformador seleccionado para este análisis ha sido un autotransformador monofásico reductor para cambio de tensión tipo seco y clase de seguridad I, de 2500 VA, fabricado por la empresa POLIYLUX y distribuido por la web [www.trafo-direct.com](http://www.trafo-direct.com).

### 1.7.1. Especificaciones facilitadas por el fabricante

A continuación, se detallan las especificaciones que nos facilita el fabricante y el distribuidor mediante su página web; los datos que se presentan a continuación han sido extraídos de la ficha técnica que nos proporciona el fabricante, la cual se adjunta en el apartado de anexos.

**Tabla 1.1** Especificaciones facilitadas por el fabricante

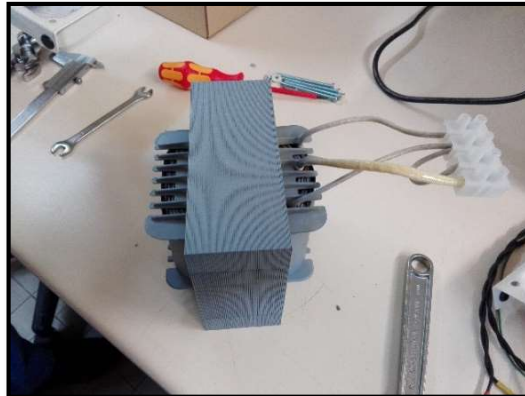
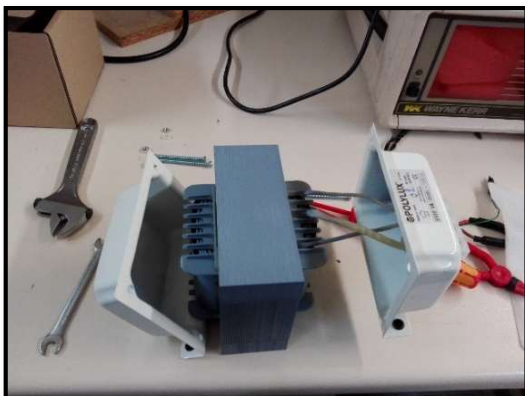
CARACTERÍSTICAS:	
<b>Autotransformador</b>	<i>Monofásico Reversible</i>
<b>Tipo</b>	<i>Seco</i>
<b>Modelo</b>	<i>AUR2500</i>
<b>Potencia</b>	<i>2 500 VA</i>
<b>Tensión de entrada</b>	<i>220 V</i>
<b>Tensión de salida</b>	<i>125 V</i>
<b>Frecuencia</b>	<i>50/60 Hz</i>
<b>Clase de seguridad</b>	<i>I</i>
<b>Grado de protección</b>	<i>IP-20</i>
<b>Refrigeración</b>	<i>ANAN</i>
<b>Temperatura ambiente</b>	<i>25º C</i>
<b>Incremento de temperatura</b>	<i>Clase B</i>
<b>Aislantes</b>	<i>Clase B – 130 °C</i>
<b>Bobinado</b>	<i>Clase HC – 220 °C</i>
<b>Tensión de prueba</b>	<i>3 kV (1 min, 50 Hz)</i>
<b>Normas</b>	<i>IEC/EN/UNE-EN 61558 CE</i>
<b>Fijación</b>	<i>Tornillería</i>
<b>Peso</b>	<i>9 kg</i>
<b>Dimensiones generales</b>	<i>126x175x108 mm</i>

### 1.7.2. Especificaciones obtenidas en laboratorio

Para la obtención de varios parámetros que son necesarios para el análisis, he tenido que desmontar el autotransformador poco a poco revisando y midiendo los parámetros necesarios. A continuación, se detallan los pasos que se han seguido para la obtención de todos estos datos.

#### Paso 1 Apertura de la envoltente

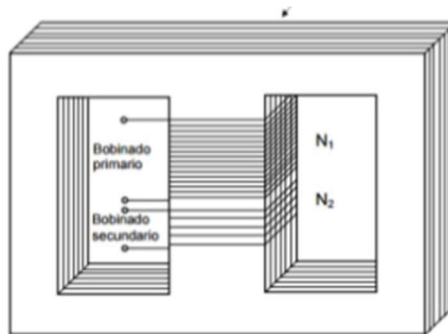
En el paso uno, se ha quitado la fijación del autotransformador con ayuda de herramientas manuales y se han retirado la envoltente metálica, dejando el autotransformador desnudo.



**Ilustración 1.8** Apertura de la envoltente

Después de abrir la envolvente del autotransformador observamos que el núcleo elegido para el bobinado de este autotransformador es un núcleo tipo acorazado.

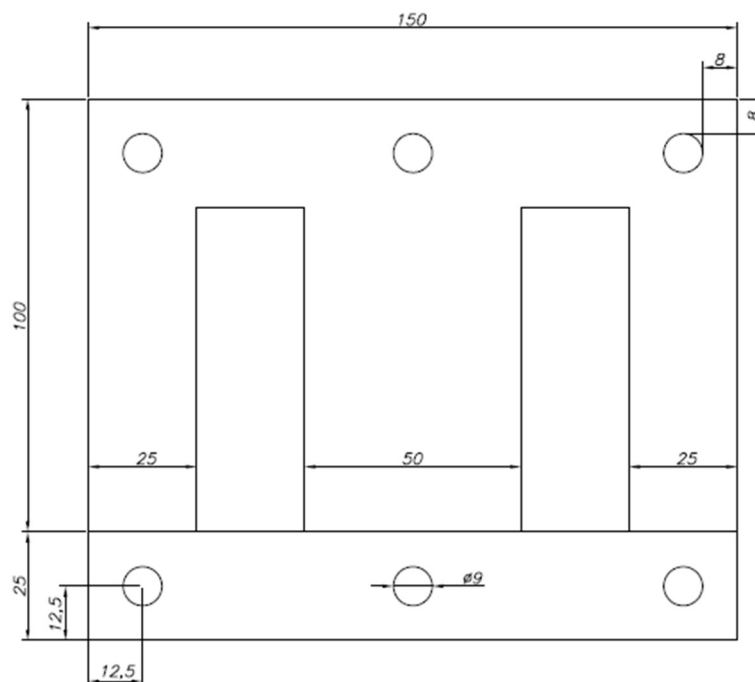
Este núcleo es más efectivo que el otro posible, de tipo columnas, ya que con el acorazado elegido se reduce la dispersión.



**Ilustración 1.9** Núcleo tipo acorazado

Este núcleo se realiza mediante chapas E y chapas I, las cuales se colocan unas hacia arriba y otras hacia abajo, alternando para aumentar todavía más su resistencia. A este tipo de enchapado se llama de uniones convencionales.

Con la envolvente retirada se han podido medir, con un calibre, todas las dimensiones correspondientes al enchapado, las cuales pueden verse en la siguiente figura:

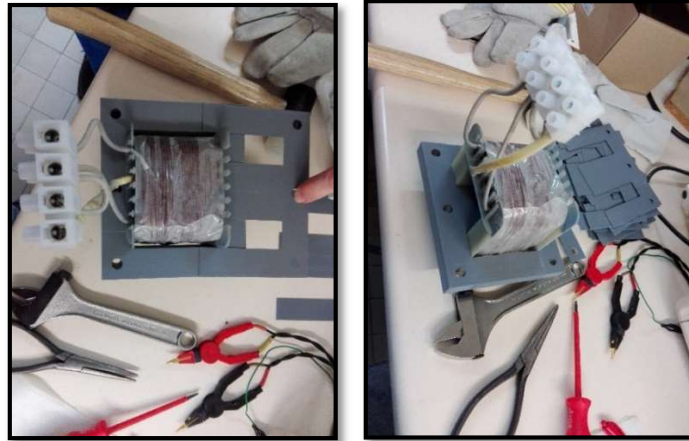


**Ilustración 1.10** Medidas del núcleo del autotransformador

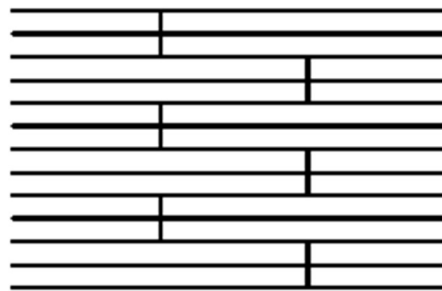
A parte de las medidas indicadas en la ilustración 1.10, es necesario añadir la profundidad total del autotransformador, la cual son 60 mm.

### **Paso 2 Desenchapado del núcleo ferromagnético**

En este paso se han retirado las chapas del autotransformador, que permanecían unidas únicamente por presión. Observé que el núcleo estaba constituido por 115 chapas de 0,5 mm de espesor cada una.



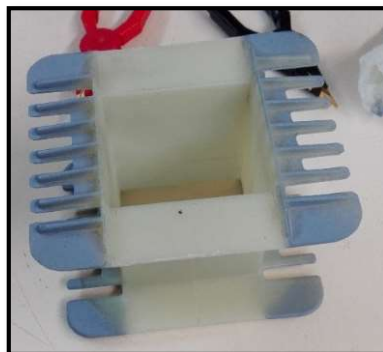
***Ilustración 1.11 Proceso de desenchapado***



***Ilustración 1.12 Enchapado con uniones convencionales***

### **Paso 3 Desarmado del arrollamiento del autotransformador**

En el tercer y último paso se ha procedido a desenrollar el autotransformador, dejando únicamente el carrete por una parte y el bobinado por otra.



***Ilustración 1.13 Proceso de desenrollado del bobinado***



En este paso se ha ido midiendo el diámetro del conductor, su longitud y el número de vueltas del bobinado serie y común.

Una vez finalizado el proceso de desmontaje del autotransformador he obtenido la siguiente tabla

**Tabla 1.2** Especificaciones técnicas del autotransformador obtenidas en laboratorio

CARACTERÍSTICAS:	
<b>Núcleo ferromagnético</b>	<i>Tipo E I</i>
<b>Alto del núcleo</b>	125 mm
<b>Ancho del núcleo</b>	150 mm
<b>Profundidad del núcleo</b>	125 mm
<b>Ancho del pilar central</b>	50 mm
<b>Ancho de los pilares exteriores</b>	25 mm
<b>Longitud Circuito Magnético</b>	0,325 m
<b>Nº Espiras bobinado común</b>	174 Vueltas
<b>Nº Espiras bobinado serie</b>	132 Vueltas
<b>rt teórica</b>	1,76
<b>Sección columna central</b>	3000 mm <sup>2</sup>
<b>Sección del conductor</b>	3,14 mm <sup>2</sup>
<b>Diámetro del conductor</b>	2,2 mm
<b>Espesor esmalte del conductor</b>	0,1 mm
<b>Número de chapas</b>	115
<b>Espesor de cada chapa</b>	0,5 mm
<b>Longitud total de las chapas</b>	57,5 mm
<b>Factor apilamiento</b>	0.958
<b>Resistencia de Bobinado total (220 V)</b>	0,82 Ω
<b>Resistencia de Bobinado común (125 V)</b>	0,44 Ω
<b>Resistencia de Bobinado serie</b>	0,38 Ω
<b>Conductividad Aluminio teórica</b>	38 m/Ω*mm <sup>2</sup>
<b>Resistencia de Bobinado total en AC</b>	2,75 Ω
<b>Resistencia del Bobinado total DC</b>	0,82 Ω
<b>Longitud 1 hilo común</b>	45,6 m
<b>Longitud 2 hilo serie</b>	41,4 m
<b>Longitud total del conductor</b>	87 m
<b>Conductividad Aluminio experimental</b>	33,365 m/Ω*mm <sup>2</sup>

## 1.8. Ventajas y desventajas frente a los transformadores clásicos

A continuación, se presentan las ventajas y desventajas del autotransformador monofásico frente a un transformador monofásico. [FRA\_95]:

### 1.8.1. Ventajas

Las principales ventajas del autotransformador frente al transformador son las siguientes:

- Solo una parte de la energía se transfiere por inducción
- La otra parte de energía se transfiere eléctricamente por conducción.
- El autotransformador, debido a sus características, es de menor tamaño que el transformador.
- El flujo de campo magnético es menor y con menor superficie del núcleo ferromagnético se consiguen autotransformadores más ligeros.
- En el autotransformador solo existe un único devanado.
- Las caídas de tensión son menores que en un transformador.
- La intensidad de vacío también es menor que en un transformador.
- Constructivamente es más simple que un transformador y se reduce el material necesario para su bobinado.
- Repasando los puntos anteriores podemos deducir que su construcción es más económica que la de un transformador.
- Las pérdidas eléctricas siempre son menores que las pérdidas magnéticas.
- El autotransformador tiene más rendimiento que un transformador.
- Si un autotransformador y un transformador son de especificaciones similares, el autotransformador puede transformar más potencia.

### 1.8.2. Desventajas

Así como sus ventajas, también tiene ciertas desventajas que debemos considerar, las cuales son las siguientes:

- La mayor desventaja es que únicamente tiene un devanado y por tanto no existe aislamiento galvánico entre primario y secundario.
- En caso de un cortocircuito podría quedar expuesto el secundario a la tensión del primario.
- Se obtiene una baja regulación de tensión debido a su baja impedancia equivalente.

## 1.9. Aplicaciones

Las principales aplicaciones de los autotransformadores son las siguientes:

- En sistemas eléctricos de potencia donde se deben interconectar circuitos que trabajan a diferentes tensiones.
- Dentro de entornos industriales se utilizan para conectar máquinas cuya alimentación es distinta a la de salida de red, eso sí, debe ser relación cercana a 2:1.
- También en entornos domésticos donde se utilizan tensiones de alimentación distintas a las de la red.
- En el sistema ferroviario para reducir las pérdidas en transporte de energía eléctrica.

## CAPÍTULO 2

# ENSAYOS DE LABORATORIO

## 2. ENSAYOS DE LABORATORIO

### 2.1. Características físicas

Las características físicas del autotransformador que más nos interesan en este análisis son las que se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 2.1** Características necesarias para los ensayos

CARACTERÍSTICAS	
Alto del núcleo	125 mm
Ancho del núcleo	150 mm
Profundidad del núcleo	60 mm
Espesor columna central	50 mm
Longitud del circuito magnético	0,325 m
Nº Espiras bobinado serie	132
Nº Espiras bobinado común	174
Relación de transformación real	1,758
Espesor del esmalte	0,1 mm
Sección conductor	3,14 mm
Diámetro del conductor con esmalte	2,2 mm
Factor apilamiento	0,9583
Nº chapas	115 chapas
Espesor chapas	0,5 mm
Longitud Chapas	57,5 mm

### 2.2. Ensayos de laboratorio realizados

Los ensayos realizados en laboratorios del departamento de Ingeniería Eléctrica son los que se explican en los siguientes puntos, pero antes se presenta un listado de los equipos utilizados.

#### Equipos utilizados para los ensayos en laboratorio

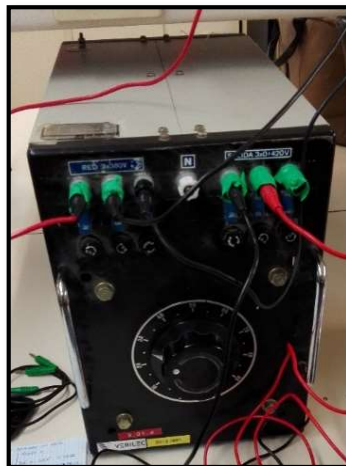
- |                                    |                                    |
|------------------------------------|------------------------------------|
| ➤ Vatímetro 1                      | Metrix PX-120                      |
| ➤ Vatímetro 2                      | Yokogawa WT110 Digital power meter |
| ➤ Multímetro 1                     | Promax multímetro TRMS PD-782      |
| ➤ Multímetro 2                     | Promax multimeter PD-163           |
| ➤ Fuente de alimentación regulable | Variac Salicru 3ARC-5-2            |



*Ilustración 2.1* Vatímetro 1 y Vatímetro 2



*Ilustración 2.2* Multímetro 1 y Multímetro 2



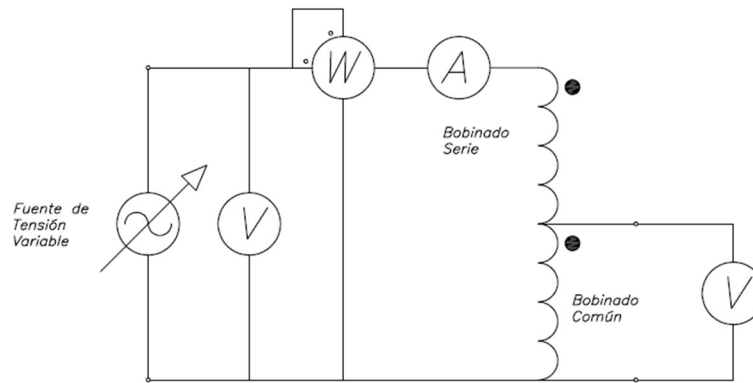
*Ilustración 2.3* Fuente de alimentación variable

Una vez enumerados los equipos utilizados en laboratorio para los ensayos, pasamos a describir los ensayos realizados en los siguientes puntos.

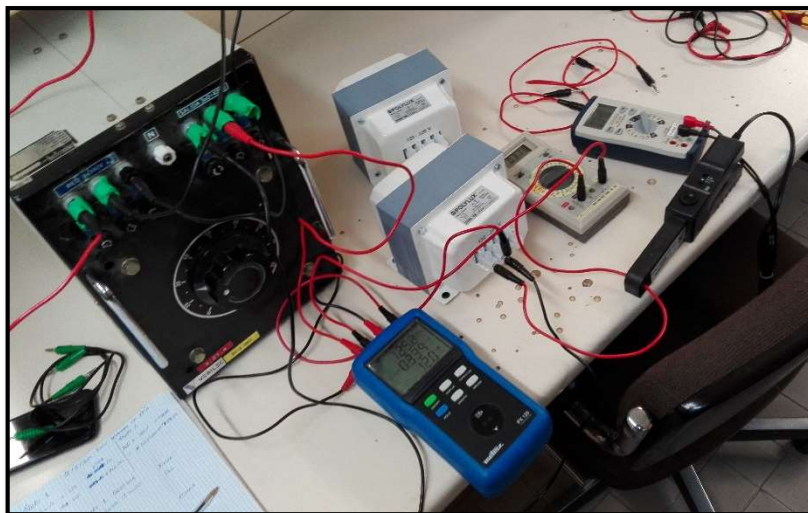
### 2.2.1. Ensayo de vacío

El objetivo de este ensayo es el de caracterizar la rama de vacío del circuito equivalente del autotransformador. Al tener un autotransformador reductor, para el ensayo de vacío aplicaremos una tensión nominal en el lado de A.T. [FRA\_95]:

El montaje que se ha seguido para este ensayo se detalla en la siguiente imagen



**Ilustración 2.4** Esquema de montaje para el ensayo de vacío

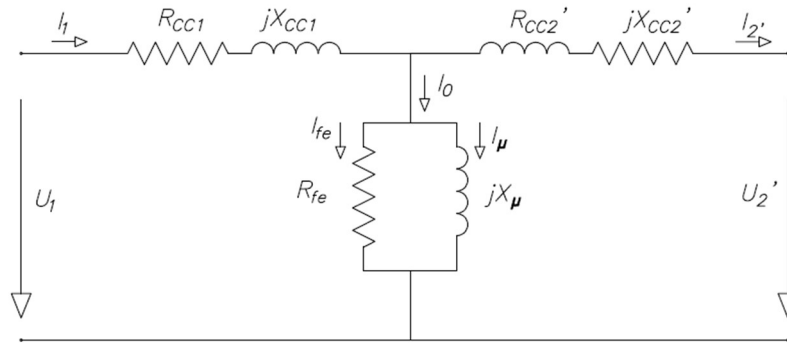


**Ilustración 2.5** Ensayo de vacío en laboratorio

Las medidas tomadas han sido las siguientes:

- $U_1 = U_0 = U_{1n}$  Tensión de primario aplicada [V]
- $I_1 = I_0 =$  Intensidad en el primario [A]
- $U_2 =$  Tensión en el secundario [V]
- $P_1 = P_0 =$  Potencia activa de Vacío [W]

Para calcular los parámetros de la rama de vacío, despreciamos la caída de tensión en la resistencia y reactancia de dispersión del autotransformador, y a continuación, observamos el circuito equivalente exacto, el cual vamos a tomar como ejemplo para conseguir caracterizar la rama de vacío.



**Ilustración 2.6** Circuito equivalente exacto del autotransformador

Con estas condiciones, la corriente aplicada desde la fuente de tensión, es la corriente de vacío, y la tensión aplicada es la que cae en la rama de vacío; de esta forma podemos calcular la resistencia de pérdidas en el hierro de la siguiente forma

$$R_{fe} = \frac{U_0^2}{P_0} \quad [6]$$

Una vez obtenido esta resistencia, también podemos obtener la corriente que circula por esta:

$$I_{fe} = \frac{U_0}{R_{fe}} \quad [7]$$

A continuación, podremos obtener la intensidad que circula por la reactancia magnetizante:

$$I_\mu = \sqrt{I_0^2 - I_{fe}^2} \quad [8]$$

Y conocida esta intensidad ya podemos calcular el valor de la reactancia:

$$X_\mu = \frac{U_0}{I_\mu} \quad [9]$$

Por último, con el valor de la reactancia podemos determinar la inductancia de magnetización:

$$L_\mu = \frac{U_0}{2 \pi f \cdot I_\mu} \quad [10]$$

Siendo:

- $R_{fe}$  = Resistencia de la chapa magnética [ $\Omega$ ]
- $I_{fe}$  = Corriente que atraviesa la chapa magnética [A]
- $X_\mu$  = Reactancia magnetizante [ $\Omega$ ]
- $I_\mu$  = Corriente que atraviesa la impedancia magnetizante [A]
- $L_\mu$  = Inductancia de magnetización [H]

El ensayo de vacío del autotransformador nos ha permitido obtener los siguientes parámetros:

- Pérdidas en el hierro [W]
- $R_{fe}$  [ $\Omega$ ]
- $X_{\mu}$  [ $\Omega$ ]
- $r_t$

Cuyo valor numérico se representa en las siguientes tablas:

**Tabla 2.2** Medidas obtenidas en laboratorios

$V_1$ [V]	$I_1$ [mA]	$P_1$ [W]	$V_2$ [V]
220	191	12,2	125,1

**Tabla 2.3** Magnitudes obtenidas a partir de las medidas tomadas

$I_{\mu}$ [mA]	$R_{fe}$ [ $\Omega$ ]	$I_{fe}$ [mA]	$X_{\mu}$ [ $\Omega$ ]	$L_0$ [H]
182,77	3967,21	55,45	1203,68	3,83

### 2.2.2. Ensayo de vacío para estimar la curva de magnetización

Para estimar la curva B-H del autotransformador, necesaria posteriormente para los modelos numéricos, he realizado un ensayo de vacío, tomando nota de las medidas ya comentadas en el anterior punto. He tomado 74 medidas, desde 0 a 400 V, las cuales están detalladas en los anexos.

Antes de empezar a desarrollar los cálculos, debemos conocer el número de espiras del bobinado serie, el número de espiras del bobinado común, la longitud del circuito magnético y las secciones del pilar central y de los pilares laterales, siendo estos dos últimos simétricos. Estos parámetros los hemos obtenido a partir de los datos expuestos en la tabla 2.1.

$N_s$  = Número de espiras del bobinado serie

$N_c$  = Número de espiras del bobinado común

En la siguiente figura podemos ver las secciones que debemos calcular

$S_1$  = Sección del pilar central = Espesor pilar central  $\times$  Profundidad [ $m^2$ ]

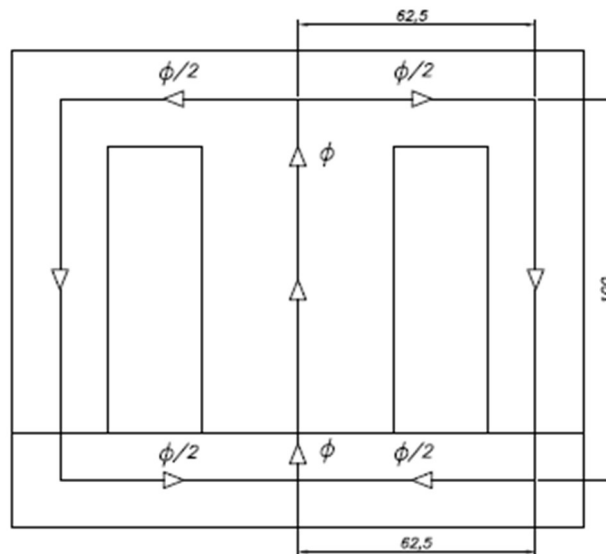
$S_2$  = Sección del pilar lateral = Espesor pilar lateral  $\times$  Profundidad [ $m^2$ ]



**Ilustración 2.7** Secciones  $S_1$  y  $S_2$



También debemos conocer la longitud del circuito magnético. Si esta máquina fuera ideal, el recorrido del flujo magnético sería el que se muestra en la figura siguiente, con sus medidas correspondientes, las cuales se han usado para el análisis.



**Ilustración 2.8** Longitud circuito magnético

Observando la figura y sumando las longitudes, vemos que la longitud total del circuito magnético a evaluar es de 325 mm, tal y como habíamos deducido en el punto 1.7.2.

$L_m$  = Longitud del circuito magnético [m]

$\Phi_B$  = Flujo magnético [Wb]

Conocidos estos datos, podemos obtener todos resultados para representar la curva B-H.

En primer lugar, debemos calcular la inducción magnética en la columna central, mediante la ley de Faraday:

$$\varepsilon = (-) \frac{d\Phi_B}{dt} = \omega \cdot S_1 \cdot (N_C + N_S) \cdot \hat{B} = \hat{U}_1 \quad [11]$$

Siendo:

- $\omega = 2\pi f$  = Frecuencia angular  $\left[\frac{rad}{s}\right]$
- $\hat{B}$  = Valor máximo del módulo del vector inducción magnética en el núcleo [T]
- $\hat{U}_1$  = Valor máximo del módulo de la tensión de entrada [V]

De la expresión anterior se deduce que el vector inducción magnética vale:

$$\hat{B} = \frac{\hat{U}_1}{\omega \cdot S_1 \cdot (N_C + N_S)}$$

A continuación, procedemos a calcular para cada punto medido, el módulo del vector intensidad de campo magnético mediante la ley de Ampère, pero antes debemos conocer la corriente abrazada por la trayectoria mediante la siguiente fórmula:

$$I_{abr} = N \cdot I \quad [12]$$

Siendo:

- $I_{abr} = \text{Intensidad abrazada [A]}$
- $N = \text{Número de vueltas que rodean el núcleo}$
- $I = \text{Intensidad de corriente que circula por las espiras [A]}$

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint_C H dl = H \int_0^{L_m} dl = H \cdot L_m = N \cdot I = \mathcal{F}_{mm} \quad [13]$$

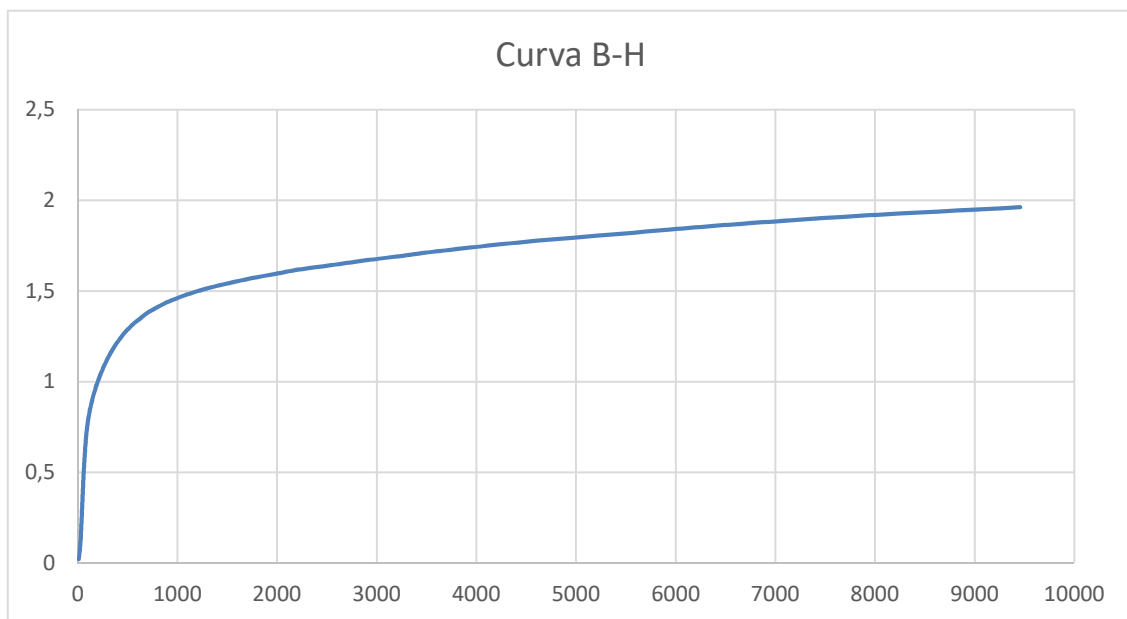
$$H \cdot L_1 + H \cdot L_2 = N \cdot I$$

$$H = \frac{N \cdot I}{L_m}$$

Siendo:

- $H = \text{Módulo del vector intensidad de campo magnético} \left[ \frac{\text{A} \cdot \text{Vuelta}}{\text{m}} \right]$
- $\mathcal{F}_{mm} = \text{Fuerza magnetomotriz [A vuelta]}$

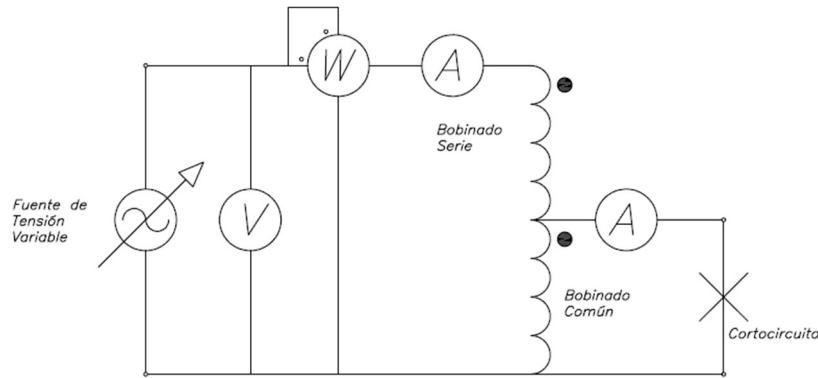
Una vez hallado el campo magnético  $H$ , trasladamos a la gráfica las parejas de valores  $(B, H)$ .



**Ilustración 2.9** Curva B-H Estimada del Autotransformador

### 2.2.3. Ensayo de cortocircuito

El objetivo de este ensayo es conocer la impedancia de cortocircuito del circuito equivalente exacto, el representado en la ilustración 2.6; consiste en cortocircuitar el secundario y aplicar la intensidad de primario nominal. Para realizar este ensayo hemos empleado el montaje que aparece en la ilustración 2.10 [FRA\_95]:



**Ilustración 2.10** Ensayo de cortocircuito



**Ilustración 2.11** Ensayo de cortocircuito en laboratorio

Una vez montado el sistema y aplicada la tensión con la cual obtengamos la intensidad nominal del lado de A.T. procederemos a tomar las medidas siguientes:

- $U_1 = U_{CC} =$  Tensión de primario aplicada [V]
- $I_1 = I_{CC} = I_{1n} =$  Intensidad en el primario [A]
- $I_2 =$  Intensidad en el secundario [A]
- $P_1 = P_{CC} =$  Potencia activa de Cortocircuito [W]

En este ensayo no se llegó a la corriente nominal debido a limitaciones con los instrumentos de laboratorio, que únicamente alcanzaba 9,23 A aplicando en el lado de A.T. 7,2 V.

La tensión aplicada es muy pequeña, por lo que se puede despreciar la rama de vacío. Despreciando esta rama sabemos entonces que la corriente que circula por la impedancia de cortocircuito es la corriente de cortocircuito. Así pues, podemos calcular su valor de la siguiente forma:

$$Z_{CC} = \frac{U_{CC}}{I_{CC}} \quad [14]$$

Continuando con los cálculos con la simplificación ya mencionada y sabiendo que la potencia activa medida solo se disipa en la resistencia de cortocircuito, su valor se puede obtener como:

$$R_{CC \text{ tota}} = \frac{P_{CC}}{I_{CC}^2} \quad [15]$$

Habiendo obtenido estos dos valores, podemos obtener la reactancia de cortocircuito como:

$$X_{CC\ total} = \sqrt{Z_{CC}^2 - R_{CC}^2} \quad [16]$$

Como estamos utilizando el circuito equivalente exacto, debemos separar la resistencia calculada en las dos partes que se ven en el esquema ya mencionado. Para realizar esta separación deberíamos aplicar c.c. en los devanados, pero se suele dividir en partes iguales como resultado aproximado (debiendo estar referidas en el mismo nivel de tensión) entre los dos bobinados.

$$R_{CC\ total} = R_{CC1} + R'_{CC2} \quad [17]$$

$$\frac{R_{CC\ total}}{2} = R_{CC1} = R'_{CC2}$$

Para obtener la separación de las reactancias no existe un procedimiento; también recurriremos a la división en partes iguales (debiendo estar referidas en el mismo nivel de tensión) entre los dos bobinados.

$$X_{CC\ total} = X_{CC1} + X'_{CC2} \quad [18]$$

$$\frac{X_{CC\ total}}{2} = X_{CC} + X'_{CC}$$

Con la impedancia de cortocircuito podemos obtener también la inductancia de cortocircuito:

$$L_{CC} = \frac{X_{CC\ total}}{2 \pi f} \quad [19]$$

El ensayo de cortocircuito del autotransformador nos ha permitido obtener los siguientes parámetros:

- $R_{CC\ total}$  = Resistencia de cortocircuito total [ $\Omega$ ]
- $R_{CC1}$  = Resistencia de cortocircuito de primario [ $\Omega$ ]
- $R'_{CC2}$  = Resistencia de cortocircuito de secundario referida al primario [ $\Omega$ ]
- $X_{CC\ total}$  = Reactancia de cortocircuito total [ $\Omega$ ]
- $X_{CC1}$  = Reactancia de cortocircuito total [ $\Omega$ ]
- $X'_{CC2}$  = Reactancia de cortocircuito de secundario referida al primario [ $\Omega$ ]
- $L_{CC}$  = Inductancia de cortocircuito [H]

Los resultados obtenidos en el ensayo de cortocircuito realizados en laboratorio se muestran en las tablas siguientes.

**Tabla 2.4** Medidas tomadas en laboratorio

V <sub>1</sub> [V]	I <sub>1</sub> [A]	P <sub>1</sub> [W]	I <sub>2</sub> [A]
7,2	9,23	65	3,712

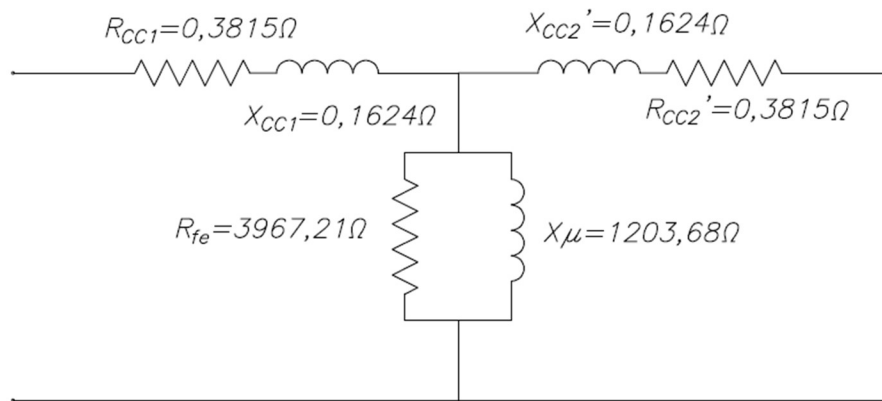
**Tabla 2.5** Magnitudes obtenidas a partir de las medias tomadas

$R_{CC\text{ TOTAL}} [\text{m}\Omega]$	$X_{CC\text{ TOTAL}} [\text{m}\Omega]$	$L_{CC\text{ TOAL}} [\mu\text{H}]$
762,97	162,39	516,91

### 2.3. Circuito equivalente exacto

Como ya he ido nombrando en los ensayos anteriores, el circuito equivalente utilizado ha sido el exacto.

A continuación, se muestra el circuito equivalente, con todos los parámetros que he obtenido mediante el ensayo de vacío y el ensayo de cortocircuito



**Ilustración 2.12** Circuito equivalente exacto con valores obtenidos en los ensayos referidos al primario

## CAPÍTULO 3

# ANÁLISIS MEDIANTE MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

### 3. SIMULACIONES MEDIANTE FEMM 2D

#### 3.1. Método elementos finitos (M.E.F)

El método de los elementos finitos (M.E.F.) o más conocido por sus siglas en inglés (F.E.M), es un método numérico para la integración de ecuaciones diferenciales utilizado en problemas de ingeniería, matemática y física.

Este método solo puede emplearse mediante ordenadores, ya que exige resolver una gran cantidad de sistemas de ecuaciones algebraicas asociadas a los nodos de los elementos finitos en los que se divide el espacio.

Aunque pueden utilizarse en varios campos, en este trabajo final de grado ha sido utilizado para resolver el problema planteado de tipo electromagnético. [USO\_07]:

*“El procedimiento de análisis del MEF puede resumirse en las siguientes etapas:*

*1º Discretización del espacio mediante la utilización de una serie de elementos adecuados, dispuestos en forma apropiada según la naturaleza del problema. Debe decidirse el número, tamaño, tipo (que incluye el número de nudos y el grado de las funciones de aproximación) y situación de los elementos a utilizar.*

*2º Una vez definido el tipo de elemento, quedan determinadas las matrices elementales asociadas al elemento, por lo que es posible obtener estas sin tener en cuenta el resto de elementos de la discretización.*

*3º Ensamblaje de las matrices y vectores elementales para obtener la matriz y el vector globales.*

*4º Imposición de las condiciones de contorno esenciales.*

*5º Solución del sistema de ecuaciones y obtención de los valores  $a_i$  en los nudos.*

*6º Cálculo de valores auxiliares en puntos no coincidentes con los nudos.*

*En la actualidad, los programas de elementos finitos comerciales se componen de tres partes de software independientes:*

- **Preprocesador**, que permite realizar el modelo en dos o tres dimensiones, o importarlo de uno ya realizado en CAD, mallarlo (definiendo el tipo de elemento en cada subdominio) y establecer las condiciones de contorno.
- **Programa de análisis** o código de resolución del sistema de ecuaciones, diferentes en función del número de variables espaciales y dependencias temporales, y
- **Postprocesador**, que permite realizar los cálculos posteriores necesarios para el análisis final del problema partiendo de las soluciones originales.”

Existen varios softwares los cuales resuelven modelos tridimensionales y bidimensionales; yo utilizaré FEMM2D, un software de libre acceso cuyo autor es David Meeker. Decir que estoy familiarizado con este software, ya que también se ha utilizado en asignaturas como Física II y Líneas eléctricas del grado en Ingeniería Eléctrica.

### 3.2. Modelos utilizados en el análisis en FEMM2D

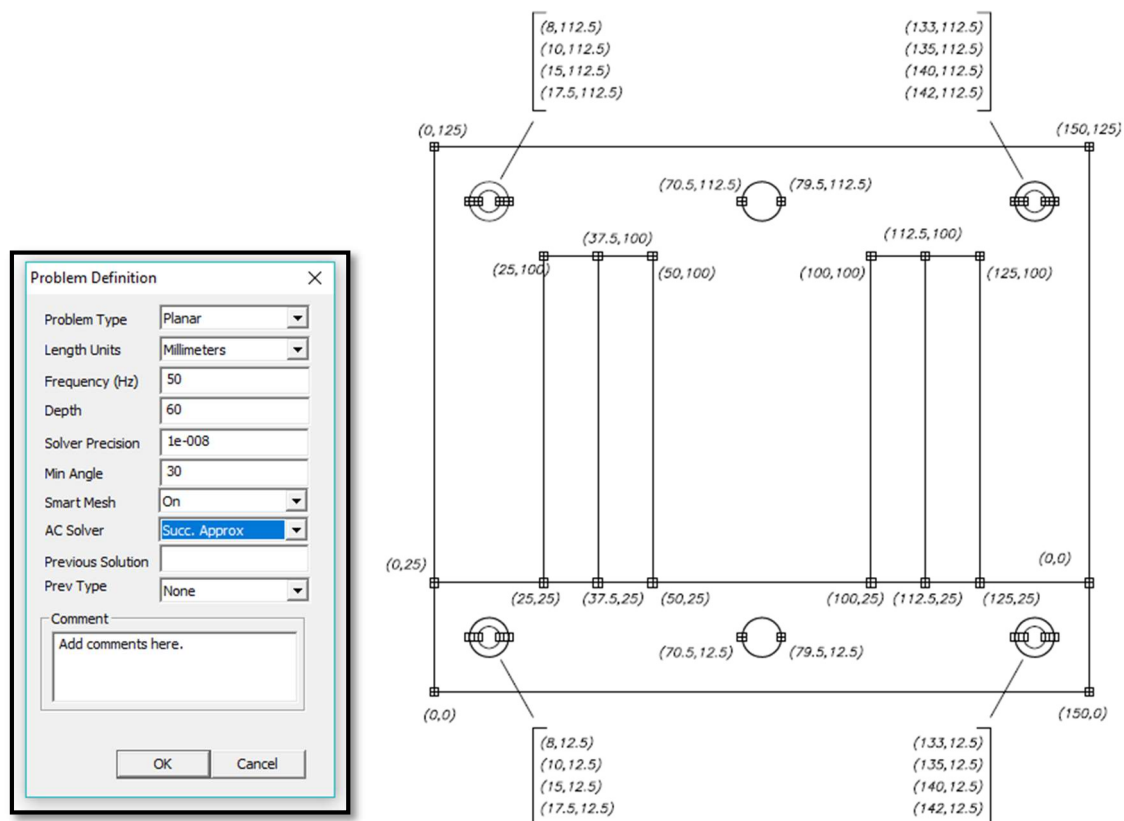
A continuación, se describen los dos modelos propuestos y utilizados para el análisis con el software ya mencionado.

#### 3.2.1. Modelo Planar

Antes de empezar a dibujar es conveniente definir la naturaleza del problema, en este caso es el modelo Planar.

Este modelo consiste en una representación frontal de la máquina, insertando un valor de profundidad.

Para realizar los modelos, se ha procedido a utilizar las medidas obtenidas en el punto 1.7, y se ha realizado el dibujo en el software ya explicado. A continuación, se muestra el modelo detallando los puntos utilizados en Femm2D.

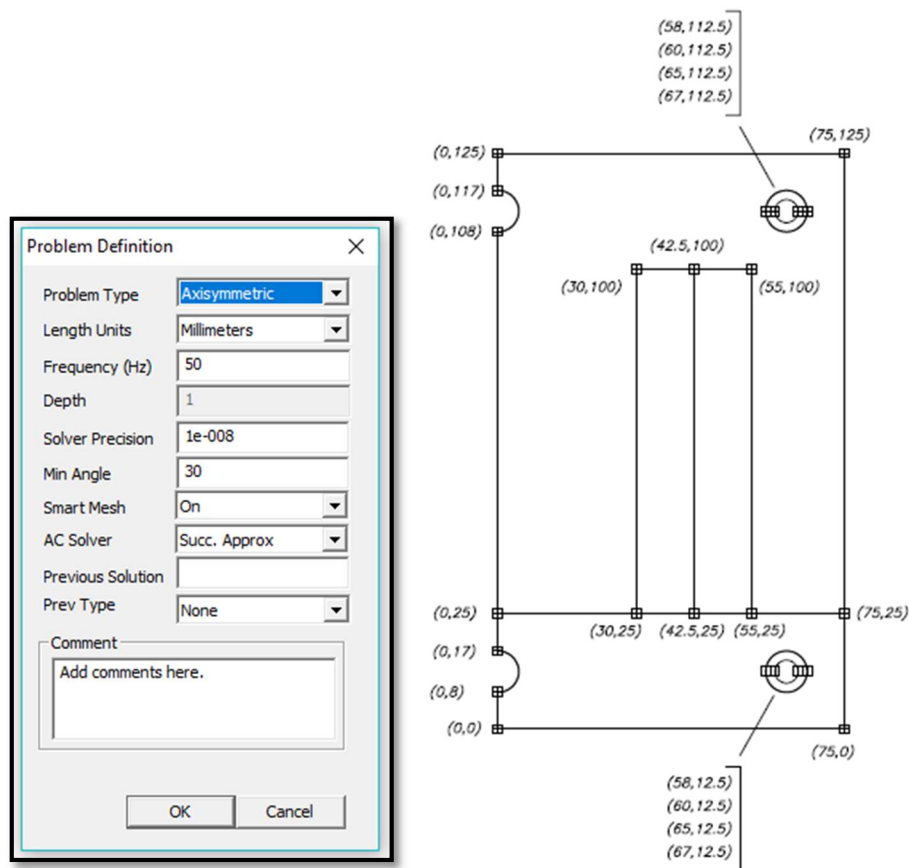


**Ilustración 3.1** Definición del problema y descripción geométrica del modelo Planar



### 3.2.2. Modelo Axisimétrico

El modelo Axisimétrico, consiste en realizar la representación frontal, pero únicamente la mitad simétrica de la máquina, ya que este modelo lo que hace es una rotación de la sección en torno al eje Z. Para este modelo se han utilizado también las medidas obtenidas en el punto 1.7, quedando el modelo tal y como se aprecia en la siguiente figura.



**Ilustración 3.2** Definición del problema y descripción geométrica modelo Axisimétrico

Debido a que en este modelo existe una rotación en torno al eje Z, el modelo resultante tendrá sección circular; por esto, he calculado el nuevo radio para el núcleo central más aproximado igualando las secciones del autotransformador. La sección real con la sección circular del modelo axisimétrico será:

$$S_1 = \pi r^2 \quad [12]$$

Conocida esta sección he calculado cual sería el radio aproximado para este modelo.

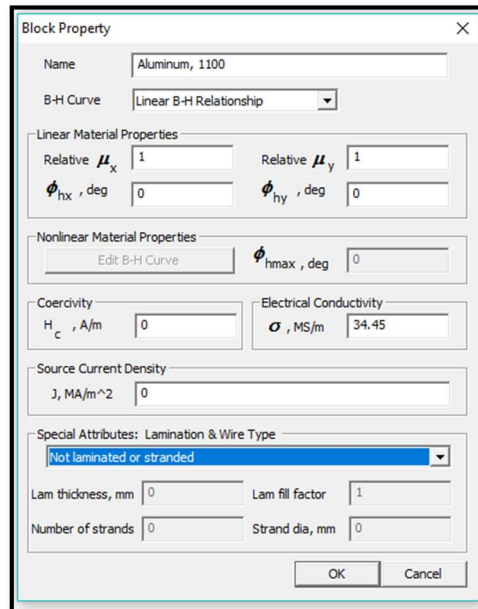
- $S_1 = \text{Sección del pilar central} = 3000 \text{ mm}^2$
- $r = \text{Radio real} = 25 \text{ mm}$
- $r' = 30,902 \text{ mm}$

### 3.3. Propiedades de los materiales utilizados en FEMM2D

Para la simulación de los ensayos, se han parametrizado todos los materiales, tal y como se detallan punto por punto a continuación.

### 3.3.1. Propiedades del bloque del conductor (ALUMINIUM, 1100)

Como ya hemos mencionado en puntos anteriores, el material constructivo del conductor utilizado para el devanado es Aluminio 1100 y las características correspondientes a este material están detalladas en la siguiente figura.



The 'Block Property' dialog box for Aluminum, 1100 contains the following fields and options:

- Name: Aluminum, 1100
- B-H Curve: Linear B-H Relationship
- Linear Material Properties:
  - Relative  $\mu_x$ : 1
  - Relative  $\mu_y$ : 1
  - $\phi_{hx}$ , deg: 0
  - $\phi_{hy}$ , deg: 0
- Nonlinear Material Properties:
  - Edit B-H Curve: [button]
  - $\phi_{hmax}$ , deg: 0
- Coercivity:
  - $H_c$ , A/m: 0
- Electrical Conductivity:
  - $\sigma$ , MS/m: 34.45
- Source Current Density:
  - $J$ , MA/m<sup>2</sup>: 0
- Special Attributes: Lamination & Wire Type:
  - Not laminated or stranded (selected)
- Lam thickness, mm: 0
- Lam fill factor: 1
- Number of strands: 0
- Strand dia, mm: 0

Buttons: OK, Cancel

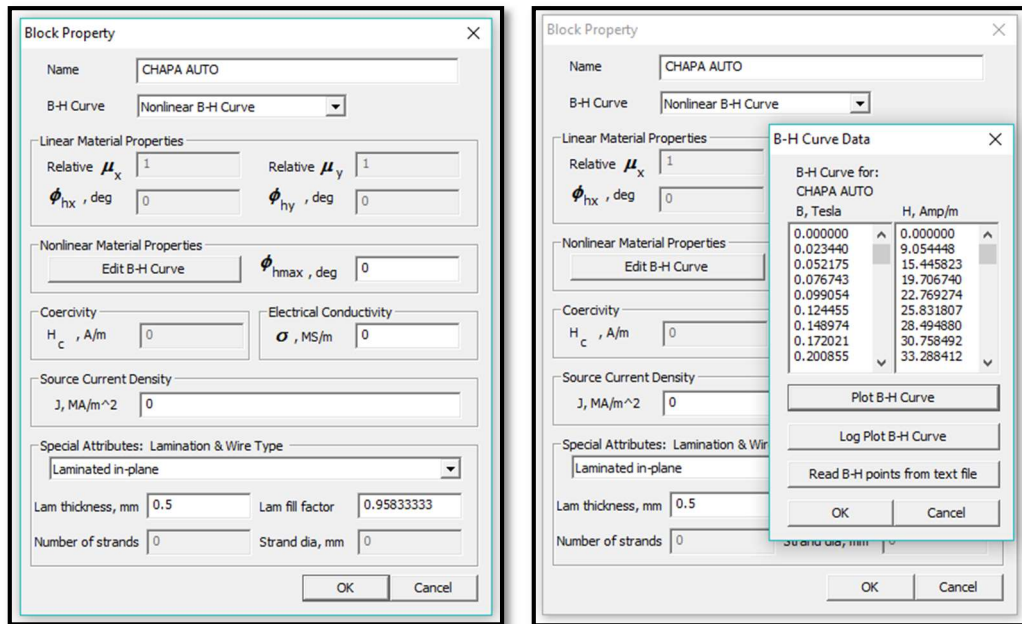
**Ilustración 3.3** Propiedades de bloque para el Aluminio 1100

### 3.3.2. Propiedades del bloque de la chapa ferromagnética (CHAPA AUTO)

Este es sin duda el material más importante del presente trabajo, por esta razón se ha realizado un ensayo de vacío para la determinación de la curva B-H tan exhaustivo.

Con la obtención de la curva B-H, y observando a los valores de campo magnético que puede llegar el autotransformador ya hemos deducido que se trata de una chapa magnética normal, la cual tiene los parámetros que se indican a la izquierda de la ilustración 3.4.

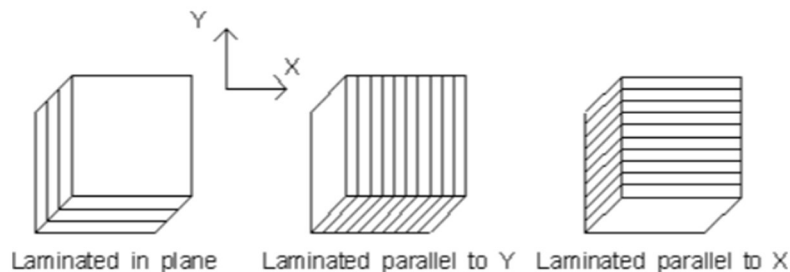
Debido a que la curva B-H no tiene una relación lineal, debemos editarla pinchando en el botón Edit B-H Curve. Nos aparece la siguiente ventana, donde he introducido los valores correspondientes al ensayo de vacío para la determinación de la curva B-H. A continuación, vemos la ventana con los valores ya introducidos a la derecha de la ilustración 3.4.



**Ilustración 3.4** Propiedades de bloque para la chapa ferromagnética e introducción de datos de la curva B-H

Una vez introducidos los datos, podremos representar la curva, mediante el botón Plot B-H Curve. Esta deberá ser idéntica a la representada en la ilustración 2.9, ya que los valores introducidos son los que se han obtenido anteriormente.

**Laminated in plane:** Esta opción nos dice como está físicamente laminado el núcleo, y por tanto definidos lamianted in plane, tal y como nos dice el manual [MEE\_18]:



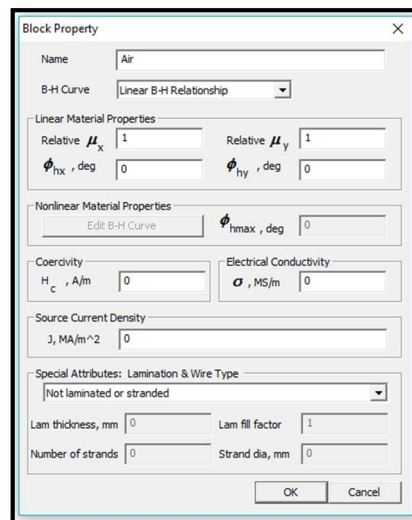
**Ilustración 3.5** Laminado del Autotransformador

**Lamm fill factor:** (Factor de apilamiento), ha sido obtenido tal y como explica el manual de referencia de FEMM2D, y como dice la teoría de cálculo de transformadores. [MEE\_18]:

$$\text{Lamm fill factor} = \frac{N^{\circ} \text{ Chapas} \cdot \text{Espesor chapa}}{\text{Profundidad total}} = \frac{115 \text{ chapas} \cdot 0,5 \text{ cm}}{60 \text{ cm}} = 0,9583 \quad [20]$$

### 3.3.3. Propiedades del bloque del aire (AIR)

El aire ya viene parametrizado en FEMM2D, únicamente debemos revisar que todos los parámetros sean los correctos, a continuación, se representan.



The 'Block Property' dialog box for 'Air' contains the following fields and values:

- Name: Air
- B-H Curve: Linear B-H Relationship
- Linear Material Properties:
  - Relative  $\mu_x$ : 1
  - Relative  $\mu_y$ : 1
  - $\phi_{rx}$ , deg: 0
  - $\phi_{ry}$ , deg: 0
- Nonlinear Material Properties:
  - Edit B-H Curve: (button)
  - $\phi_{hmax}$ , deg: 0
- Coercivity:
  - $H_c$ , A/m: 0
- Electrical Conductivity:
  - $\sigma$ , MS/m: 0
- Source Current Density:
  - $J$ , MA/m<sup>2</sup>: 0
- Special Attributes: Lamination & Wire Type:
  - Not laminated or stranded (dropdown)
  - Lam thickness, mm: 0
  - Lam fill factor: 1
  - Number of strands: 0
  - Strand dia, mm: 0

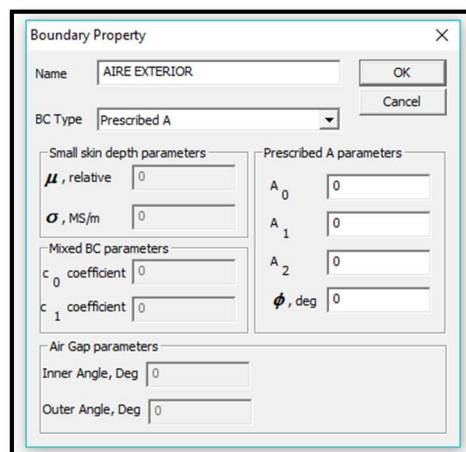
**Ilustración 3.6** Propiedades del bloque para el aire

## 3.4. Condiciones de contorno

Al ser problemas de fronteras abiertas, debemos limitar el espacio a lo que se conoce como background. En los límites de este volumen los campos se truncan y hay que establecer una condición de contorno que dé lugar a los menores errores posibles en las soluciones del problema.

Con la geometría que tenemos para el transformador, la condición más adecuada para el campo magnético en puntos muy lejanos es la tangencial.

Para definir el background de mis modelos, he optado por realizar una circunferencia exterior de 0,5 m. de Aire, la cual tiene unas condiciones de contorno que se pueden ver en la siguiente ilustración 3.7, donde A hace referencia al vector potencial magnético [Mek\_19]:



The 'Boundary Property' dialog box for 'AIRE EXTERIOR' contains the following fields and values:

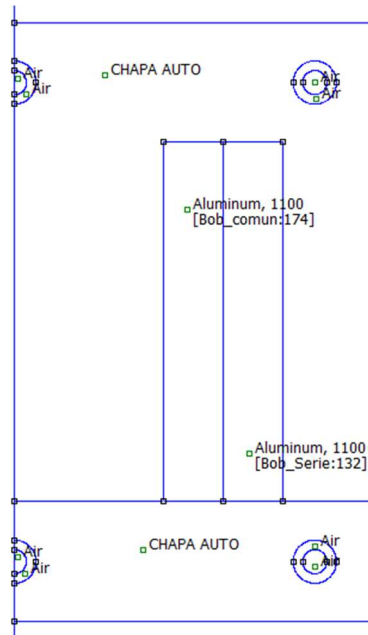
- Name: AIRE EXTERIOR
- BC Type: Prescribed A
- Small skin depth parameters:
  - $\mu$ , relative: 0
  - $\sigma$ , MS/m: 0
- Prescribed A parameters:
  - $A_0$ : 0
  - $A_1$ : 0
  - $A_2$ : 0
  - $\phi$ , deg: 0
- Mixed BC parameters:
  - $c_0$  coefficient: 0
  - $c_1$  coefficient: 0
- Air Gap parameters:
  - Inner Angle, Deg: 0
  - Outer Angle, Deg: 0

**Ilustración 3.7** Condiciones de contorno

### 3.5. Propiedades de los bloques creados en FEMM2D

En el modelo se deben introducir los bloques con el material que corresponde en cada bloque. En el dibujo aparecen como puntos coloreados en verde, tal y como se ve en la figura 3.8.

Para las simulaciones, el espacio se divide en bloques, los cuales van a tener distintos valores tanto de materiales como de discretización o triangulación. En aquellos bloques en los que es necesario calcular los campos con mucha precisión, es necesario emplear pequeños valores de *MESH SIZE* (tamaño de mallado) ya que esto nos da lugar a zonas del espacio con muchos nodos, muy próximos entre ellos, esto se traduce en mayor precisión de cálculo.



*Ilustración 3.8 Modelo Axisimétrico en FEMM2D*

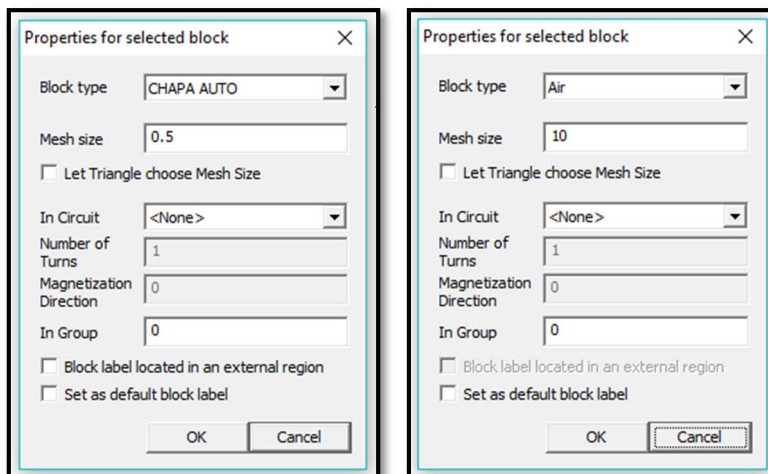
A continuación, se van a explicar las propiedades que les he asignado a los bloques anteriormente explicados.

#### 3.5.1. Descripción del bloque del aire (AIR)

Al introducir el bloque de aire, he optado por introducirle un mallado de 10, ya que no es la zona más importante que debemos observar en los ensayos. Aplicarle un mayor valor de mallado solo nos produciría un mayor tiempo de cálculo del ordenador siendo el mismo resultado final. Puede apreciarse este valor de mallado en la parte derecha de la ilustración 3.9.

#### 3.5.2. Descripción del bloque de la chapa ferromagnética (CHAPA AUTO)

Al introducir el bloque de la chapa, he decidido poner un valor de mallado de 0,5, ya que en esta zona necesitaremos que el mallado sea lo más preciso posible, tal como se aprecia en la ilustración 3.9.

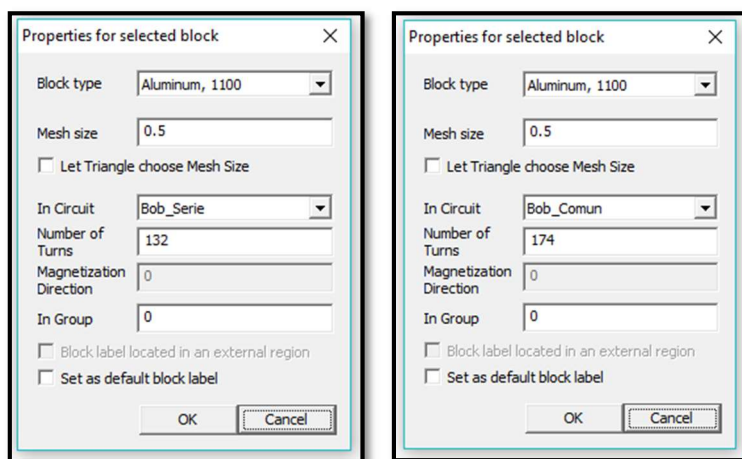


**Ilustración 3.9** Propiedades de la Chapa magnética y del Aire

### 3.5.3. Descripción del bloque de los bobinados serie y común

Los bobinados también son una zona donde debemos conocer lo que ocurre con precisión por ello también se le ha asignado un valor de mallado de 0,5.

En el modelo Planar, existe una pequeña diferencia con los bloques de aire y chapa, ya que al bobinado debemos darle el valor de número de vueltas y su sentido. En la figura 3.10 podemos apreciar que se han asignado los números de vueltas de los bobinados en sentido positivo, esto sería en un lado del autotransformador y habría que asignarle el mismo valor de número de vueltas, pero en sentido negativo al otro lado para poder realizar una simulación con éxito, ya que esto nos define correctamente el sentido de la corriente que circula por la bobina. Deben ser opuestos, porque de lo contrario se restarían una con otra y al ser del mismo valor resultaría que circula una intensidad nula.



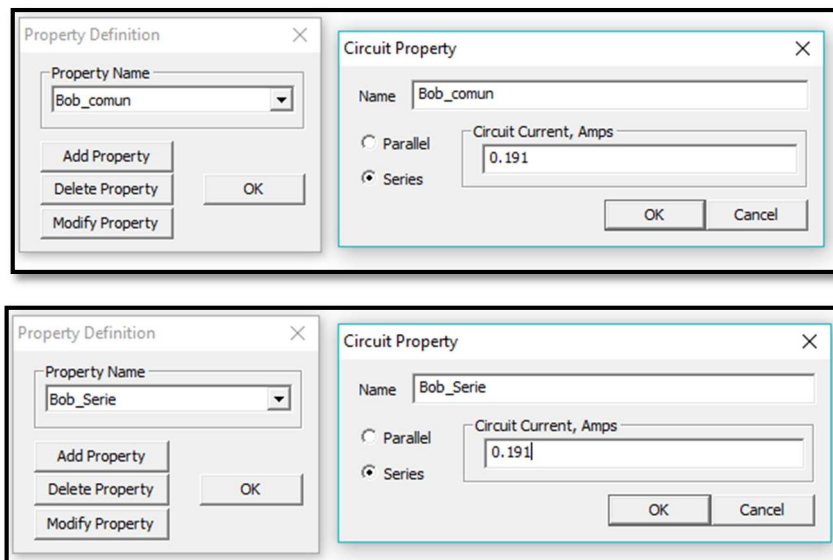
**Ilustración 3.10** Propiedades del Bobinado Serie y Bobinado Común

### 3.6. Simulación del ensayo de vacío en FEMM2D

Una vez dibujado e introducido todos los parámetros necesarios para poder realizar simulaciones se procede a realizar el ensayo de vacío en FEMM2D.

Con el fin de obtener los resultados más exactos, se utiliza la intensidad de primario obtenida a valores de voltaje nominal en el ensayo de vacío realizado en laboratorio.

Al tener el lado de baja tensión en circuito abierto, observamos que la intensidad de primario atraviesa tanto el bobinado serie como el bobinado común. Por tanto, los valores introducidos para el análisis son los siguientes:

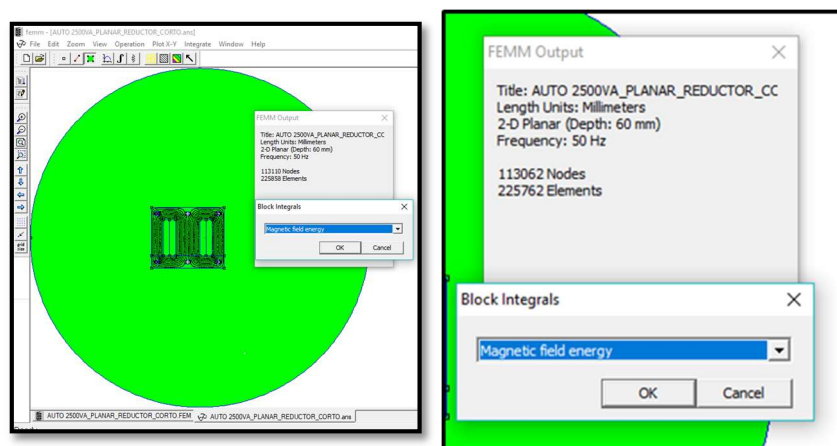


**Ilustración 3.11** Intensidad de Vacío en los Bobinado Serie y Común

#### 3.6.1. Resultados del ensayo de vacío con modelo Planar

Una vez realizado el modelo y compruebo que se ha mallado correctamente, en este caso son 113 062 nodos, tal y como se ve en la parte derecha de la ilustración 3.12.

Tras la anterior comprobación, pasamos a realizar el cálculo numérico. Una vez realizada la simulación, los resultados los observamos en el post-procesador.



**Ilustración 3.12** Post-Procesador FEMM2D Modelo Planar



Para la determinación de la inductancia de magnetización,  $L_{mag}$ , utilizaremos el procedimiento de la energía magnética, que consiste en calcular la energía magnética contenida en todo el espacio que rodea las bobinas. Una vez obtenido este valor ya podemos obtener el valor de la inductancia de magnetización, tal y como se deduce con la fórmula siguiente.

$$W_{mag} = \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot L_{mag} \quad [21]$$

$$L_{mag} = \frac{2 \cdot W_{mag}}{I^2}$$

Siendo:

- $L_{mag}$  = Inductancia de magnetización [H]
- $W_{mag}$  = Energía de magnetización [J]
- $I$  = Intensidad aplicada en FEMM2D [A]

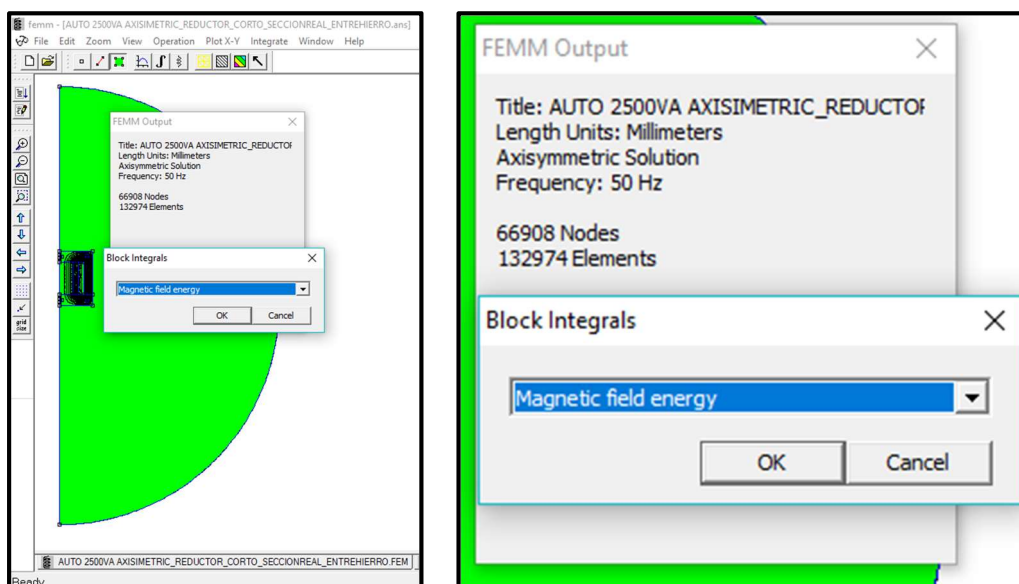
En la tabla siguiente podemos observar los resultados obtenidos del ensayo y magnitudes calculadas.

**Tabla 3.1** Resultados y magnitudes del ensayo de vacío para el modelo Planar

$W_{mag}$ [mJ]	$L_{mag}$ [H]	$X_{\mu}$ [ $\Omega$ ]
50,27	2,756	865,88

### 3.6.2. Ensayo de vacío modelo Axisimétrico

Repetimos el proceso del punto anterior, pero con el modelo Axisimétrico. Para este ensayo tenemos un total de 66908 Nodos, como se ve en la parte derecha de la siguiente ilustración.



**Ilustración 3.13** Post-Procesador FEMM2D Modelo Planar



**Tabla 3.2** Resultados de simulaciones del ensayo de vacío para modelo axisimétrico

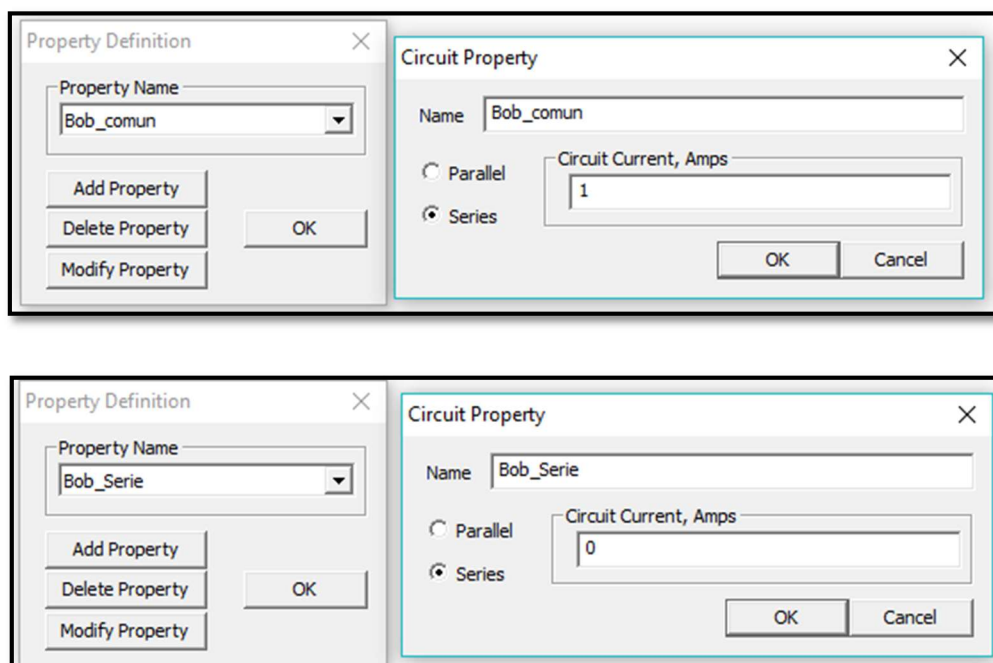
$W_{\text{mag}}$ [mJ]	$L_{\text{mag}}$ [H]	$X_{\mu}$ [ $\Omega$ ]
56,31	3,087	969,897

### 3.7. Simulación del ensayo de cortocircuito en FEMM2D

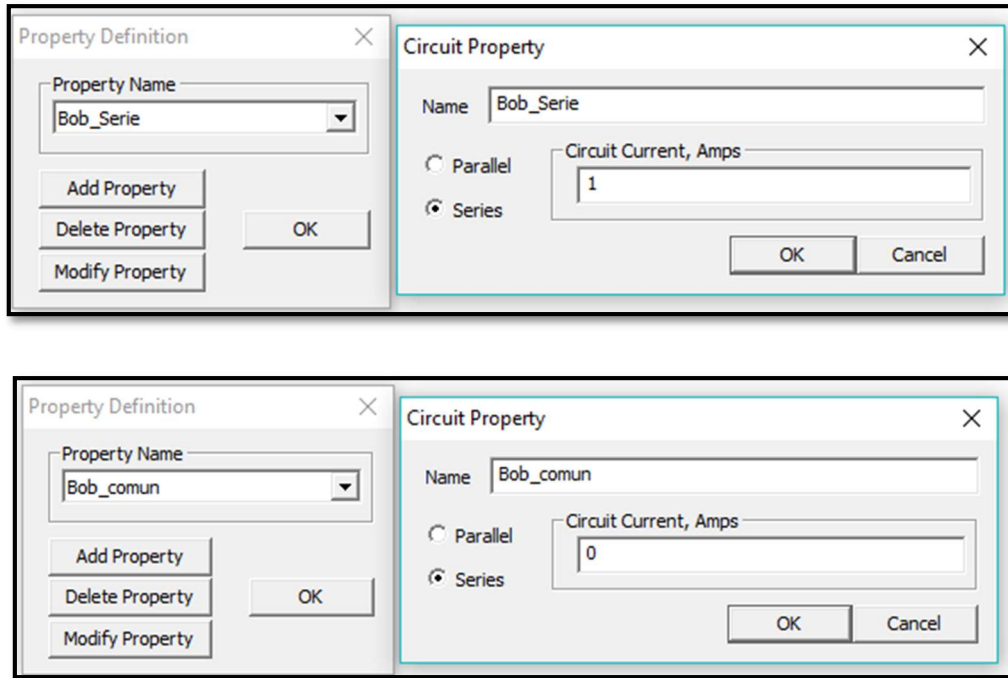
Como he comentado anteriormente, una vez finalizado el dibujo de los modelos, solo nos quedaría introducir los valores de las intensidades observadas en el ensayo. El inconveniente es que no está circulando la misma corriente por los devanados, y tampoco sabemos cuanta corresponde cada uno de ellos. Por lo tanto, he optado por realizar la simulación de las bobinas por separado y con un valor de corriente eléctrica igual a la unidad, de manera que la obtención de la inductancia de cortocircuito sea sencilla.

Para calcular la inductancia de cortocircuito de la bobina serie, haré circular una corriente de un amperio por dicha bobina y de 0 amperios de la común y para la obtención de la bobina común haré la operación opuesta.

Una corriente de un amperio no satura el núcleo como lo haría la corriente real de cortocircuito, por lo tanto, en los modelos de FEMM, es necesario introducir una discontinuidad en el núcleo que origine un fenómeno similar a la saturación, con lo que, el fenómeno de dispersión podrá ser equivalente. En los modelos, esta discontinuidad la he simulado sustituyendo el material de la columna central por aire.



**Ilustración 3.14** Intensidades de Cortocircuito en Bobinado Común y Bobinado Serie para ensayo en el Bobinado Común



**Ilustración 3.15** Intensidades de Cortocircuito en Bobinado Común y Bobinado Serie para ensayo en el Bobinado Serie

### 3.7.1. Resultados de las simulaciones

Después de simular en el modelo Planar y Axisimétrico los valores anteriormente explicados podemos observar los resultados de dicha simulación

**Tabla 3.3** Resultados de las simulaciones de los ensayos de cortocircuito

		$W_{mag} [\mu J]$	$L_{mag} [\mu H]$	$X_{\mu} [m\Omega]$
MODELO PLANAR	Bobina Serie	145,38	290,76	100,27
	Bobina Común	63,12	126,24	184,70
MODELO AXISIMÉTRICO	Bobina Serie	300,25	600,51	174,95
	Bobina Común	111,42	222,85	86,64
MEDIA			502,07	157,73

Hay que tener en cuenta que los valores que nos proporciona FEMM2D son valores reales, y para poder sumar las dos inductancias de magnetización debemos referir al mismo nivel de tensión una de ellas, en este caso, he decidido reducir al primario la bobina común y sumarlas para obtener  $L_{mag}$  de cada modelo, para después hacer la media de la mediante la siguiente fórmula:

$$L_{mag \text{ PLANAR/AXISIMÉTRICO}} = L_{mag \text{ Bobina Serie}} + \frac{L_{mag \text{ Bobina Común}}}{rt^2} \quad [22]$$

$$L_{mag \text{ MEDIA}} = \frac{L_{mag \text{ PLANAR}} + L_{mag \text{ AXISIMÉTRICO}}}{2} \quad [23]$$

### 3.8. Comparativa de resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio y las simulaciones en FEMM2D

Habiendo obtenido todos los datos en estos ensayos, tanto experimentales como numéricos mediante simulación, podemos compararlos en la siguiente tabla

**Tabla 3.4** Comparativa de los resultados experimentales con los de las simulaciones

	Ensayo de Vacío		Ensayo de Cortocircuito	
	$L_{mag}$ [H]	$X_{\mu}$ [ $\Omega$ ]	$L_{mag}$ [ $\mu$ H]	$X_{\mu}$ [m $\Omega$ ]
Datos Experimentales	3,831	1203,682	516,913	162,393
Datos de Simulación	3,087	969,897	502,069	157,729
Porcentaje de Error	19,43%	19,42%	2,87%	2,87%

Para dicha comparación he calculado el porcentaje de error mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ error} = \frac{\text{Valor Experimental} - \text{Valor de simulación}}{\text{Valor Experimental}} \cdot 100 \quad [24]$$

Observamos que para el ensayo de cortocircuito los valores se aproximan bastante, ya que las pérdidas son las que se producen en el aluminio (conocidas como pérdidas en el cobre). Con esto podemos deducir que el material utilizado en las simulaciones (Aluminio 1100) es el correcto y, por tanto, podemos determinar que las herramientas de simulación pueden hacer una estimación aproximada para este tipo de ensayos.

Para el ensayo de vacío hemos obtenido un error bastante alto; esto puede ser debido a no haber tenido acceso a la curva real de magnetización de las chapas magnéticas. Debido a errores en la estimación de la curva B-H y también sumados a los que se producen en las simulaciones acentúan más el error total. Con una curva de magnetización exacta podríamos haber obtenido valores de simulación mucho más próximos a los valores experimentales.

Puedo concluir que los resultados de las simulaciones se aproximan lo suficiente a los experimentales, como para poder utilizar este tipo de software para ensayos y mejoras de este tipo de máquinas.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se han estudiado autotransformadores comerciales de pequeña potencia, tanto desde el punto de vista teórico como experimental y numérico (mediante el método de elementos finitos). Originalmente me propuse el estudio de este tipo de máquinas, debido a que no suelen ser tratadas en los planes de estudio y cuyo comportamiento difiere de un transformador convencional. Es, además, un instrumento de biografía escasa, a pesar de que industrialmente su uso está muy extendido. También me interesaba comprobar que las herramientas informáticas eran válidas para el cálculo y perfeccionamiento de dichas máquinas.

En la etapa experimental desmonté uno de los autotransformadores y pude observar la simplicidad constructiva de estas máquinas.

Fue formativa la labor de toma de medidas, ya que accedí a instrumentación muy específica que se encuentra en el departamento.

La labor de la simulación fue especialmente compleja, debido a mi escasa experiencia en el empleo de FEMM y al no contar con antecedentes que pudieran guiarme. En general, los modelos se ajustan bien a lo observado mediante las medidas, aunque hubiese sido conveniente haber accedido a la curva real de magnetización de las chapas magnéticas para poder ser más precisos en las simulaciones.

## BIBLIOGRAFÍA

[FRA\_95]: Fraile Mora, J. “Máquinas Eléctricas”. Editorial Colegio de ingenieros de caminos canales y puertos, 3ª Edición, Madrid 1995.

[USO\_07]: Usón Sardaña, A. “Aplicación del método de elementos finitos para el perfeccionamiento de pinzas amperimétricas”. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza 2007.

[COR\_76]: Corrales Martín, J. “Cálculo industrial de máquinas eléctricas”. Universidad Politécnica de Barcelona, Barcelona 1976

[MEE\_18]: Meeker, David. “Finite Elements Method Magnetics (User’s Manual)”. Versión 4.2, January 30, 2018.

[MEE\_19]: <http://www.femm.info/wiki/HomePage>, 20/6/2019

[WIN\_02]: Winders, John J. Jr. “Power Transformers Principles and Applications”. Editorial CRC Press, April 12, 2002.



## ANEXOS

### 4. ANEXO I. PLANOS

#### 4.1 DATOS TÉCNICOS FACILITADOS POR EL DISTRIBUIDOR

##### Autotransformador portátil monofásico reversible Polylux AUR



Aislantes	Clase B - 130° C
Envoltorio	Con tapas metálicas
Frecuencias	50-60 Hz
Grado de Protección	IP-21
Incluye	Cable de conexión con clavijas hasta 1000 VA Asa hasta 2000 VA
Normas	IEC/EN/UNE-EN 60726 CE
Temperatura ambiente	25°C
Tensión de Prueba	3 kV (1 min, 50 Hz) entre bobinados y masa

##### Referencias autotransformadores portátiles monofásicos reversibles AUR

**Negrita:** Producto en stock

Ref.	Descripción	Potencia	T. entrada	T. salida	Preco
AUR100	<b>AUR - autotransformador portátil monofásico</b>	100 VA	220 V	126 V	11,80 €
AUR200	<b>AUR - autotransformador portátil monofásico</b>	200 VA	220 V	126 V	18,80 €
AUR500	<b>AUR - autotransformador portátil monofásico</b>	500 VA	220 V	126 V	21,00 €
AUR1000	<b>AUR - autotransformador portátil monofásico</b>	1000 VA	220 V	126 V	30,80 €
AUR1500	<b>AUR - autotransformador portátil monofásico</b>	1500 VA	220 V	126 V	38,20 €
<b>AUR2500</b>	<b>AUR - autotransformador portátil monofásico</b>	<b>2500 VA</b>	<b>220 V</b>	<b>126 V</b>	<b>58,10 €</b>
AUR4000	<b>AUR - autotransformador portátil monofásico</b>	4000 VA	220 V	126 V	88,20 €

##### Medidas y pesos

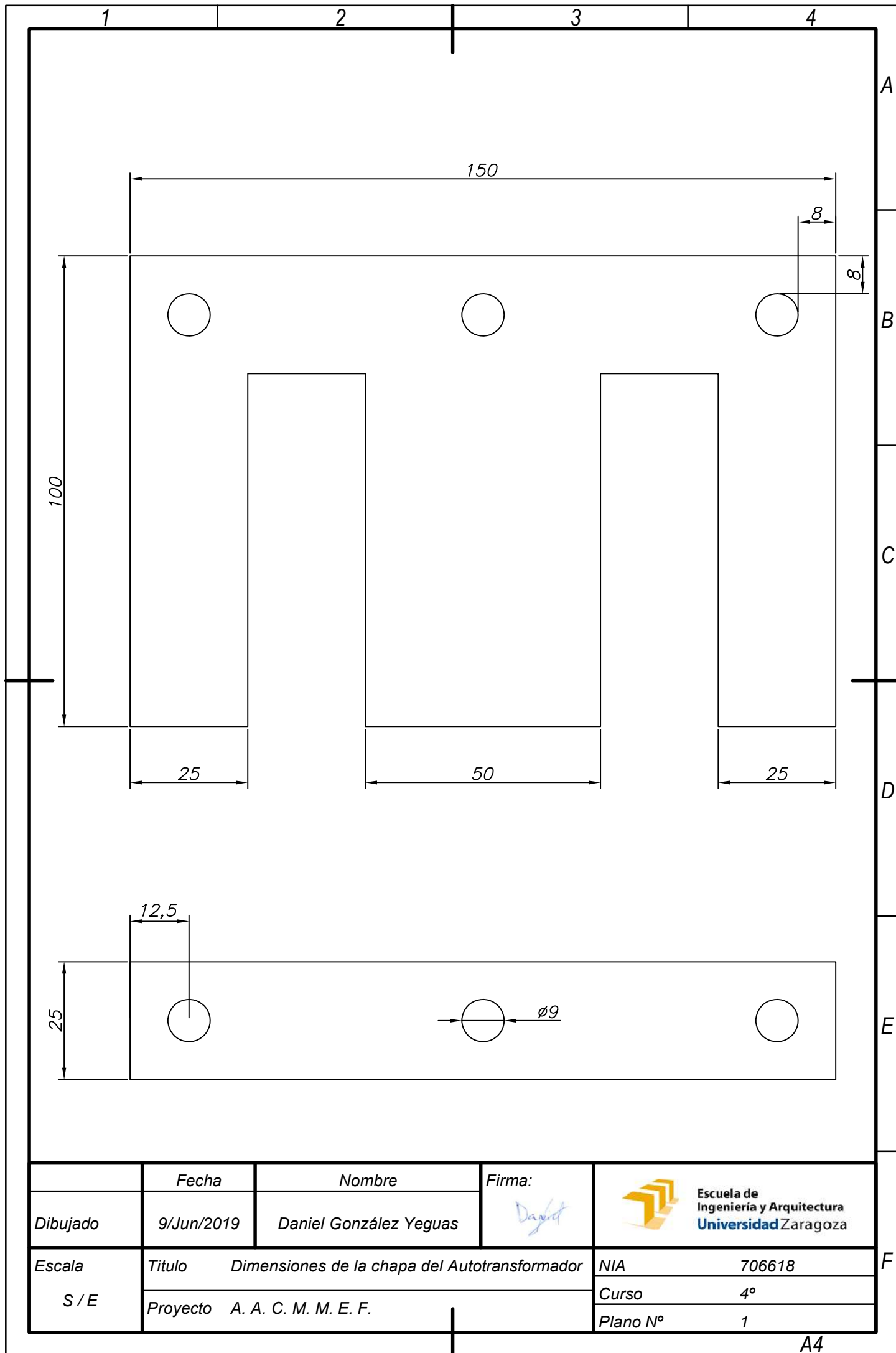
Referencia	Potencia	Dimensiones mm						Peso kg	Fig
		A	B	C	D	E	Ø		
AUR100	100 VA	75	102	65	0	0	0	1	
AUR200	200 VA	84	115	75	0	0	0	2.1	
AUR500	500 VA	96	122	83	0	0	0	2.7	
AUR1000	1000 VA	108	143	92	0	0	0	4.5	
AUR1500	1500 VA	126	150	108	0	0	0	6.7	
AUR2500	2500 VA	126	175	108	0	0	0	9	
AUR4000	4000 VA	150	190	128	0	0	0	14	

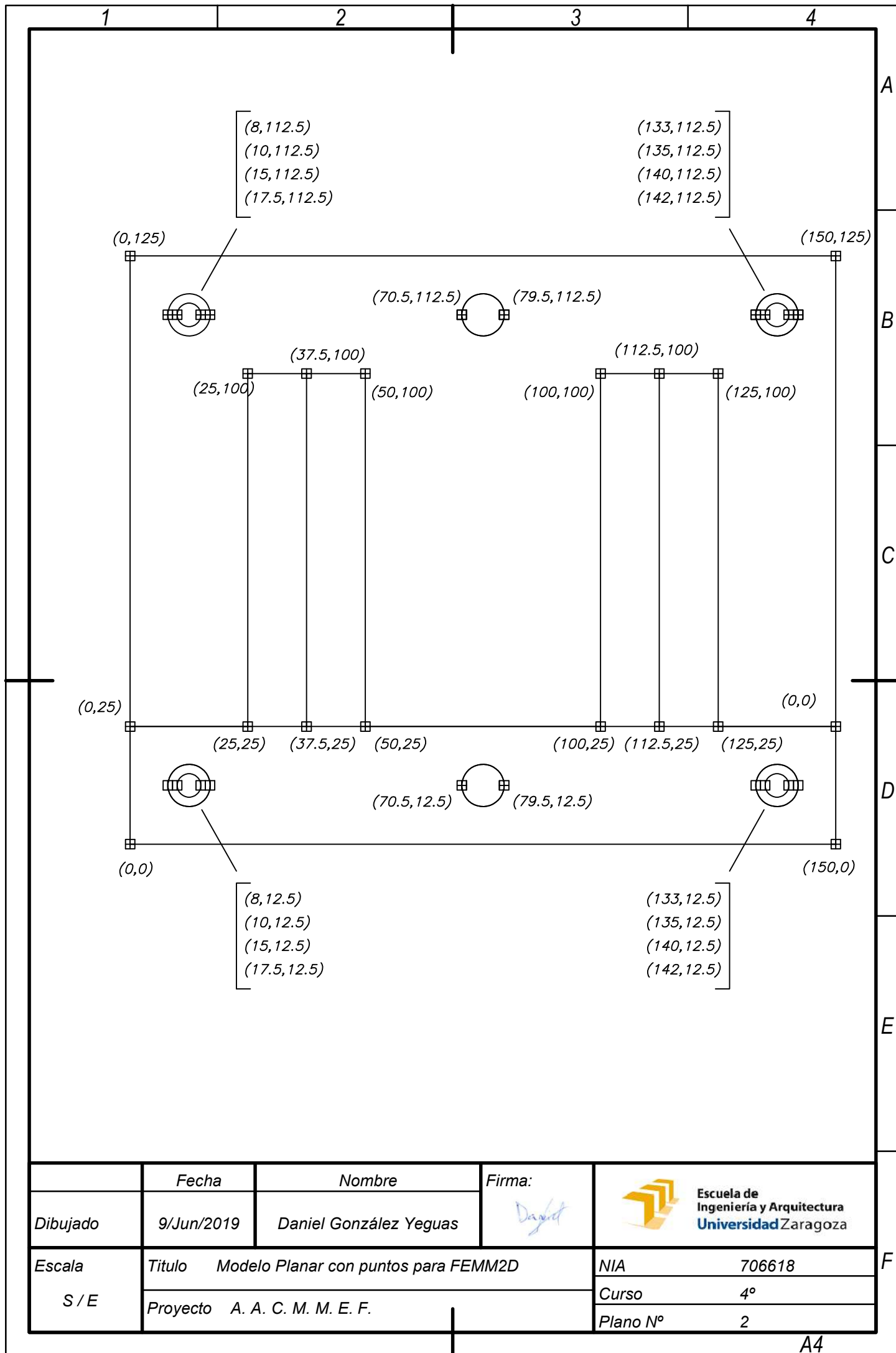
#### 4.2 VALORES MEDIDOS EN EL ENSAYO DE VACÍO PARA DETERMINAR CURVA B-H



V <sub>1</sub> [V]	A <sub>1</sub> [A]	W <sub>1</sub> [W]	V <sub>2</sub> [V]
4,78	0,0068	0,005	2,51
10,64	0,0116	0,036	5,85
15,65	0,0148	0,09	8,72
20,2	0,0171	0,15	11,3
25,38	0,0194	0,24	14,24
30,38	0,0214	0,33	17,1
35,08	0,0231	0,44	19,84
40,96	0,025	0,59	23,14
45,25	0,0263	0,72	25,6
50,5	0,028	0,87	28,5
55,44	0,0294	1,04	31,4
60,44	0,0309	1,21	34,2
65,05	0,0323	1,38	36,8
71	0,034	1,59	40,24
75,1	0,0352	1,79	42,6
81	0,037	2,04	46
85,8	0,0383	2,24	48,6
90	0,0395	2,44	51
95,3	0,0414	2,7	54,1
100	0,0429	2,94	56,75
105	0,0446	3,18	59,5
110,9	0,0467	3,49	63
115,1	0,0484	3,77	62,38
120,2	0,0504	4,06	68,3
125,5	0,0527	4,37	71,2
130,1	0,0549	4,66	74
135,7	0,0578	5,03	77,1
141	0,0608	5,37	80,1
145,4	0,0635	5,7	82,7
150,9	0,0676	6,06	85,73
155,1	0,071	6,35	88,2
160,9	0,0763	6,77	91,4
165	0,0808	7,1	93,6
170,1	0,0872	7,5	96,7
175,3	0,0944	7,9	99,6
180,3	0,1021	8,3	102,4
185,6	0,1106	8,7	105,1
190,8	0,1205	9,2	108,35

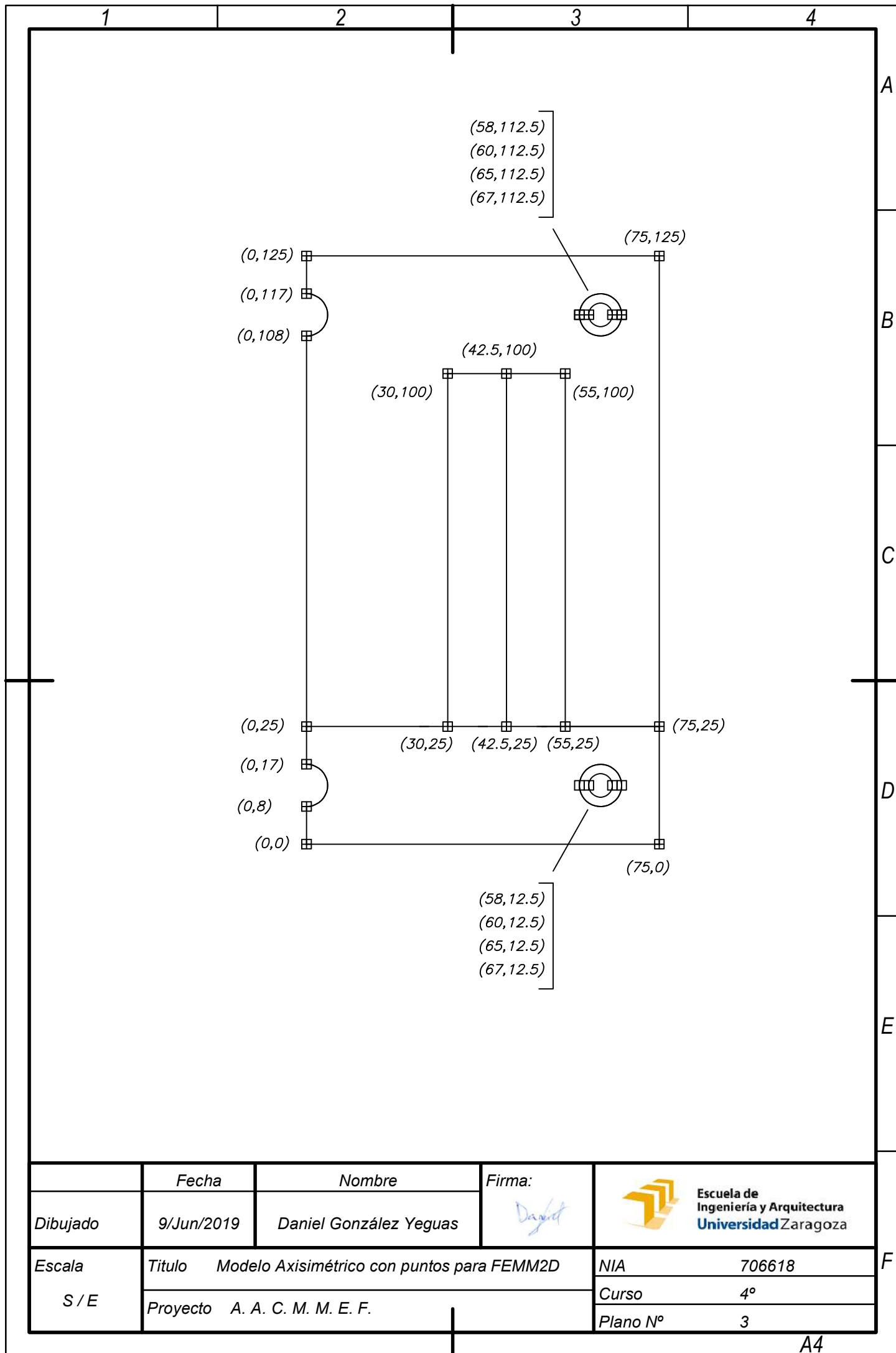
V <sub>1</sub> [V]	A <sub>1</sub> [A]	W <sub>1</sub> [W]	V <sub>2</sub> [V]
195,1	0,1294	9,6	110,9
200,7	0,141	10,1	114
205,2	0,1516	10,6	116,5
210	0,1636	11,1	119,4
215,5	0,1786	11,7	122,5
220	0,191	12,2	125,1
226	0,2102	12,8	128,6
230,2	0,224	13,4	131
235	0,2407	13,9	133,6
240,2	0,2612	14,6	136,5
245,5	0,2834	15,4	139,8
250,6	0,3082	16,1	142,5
255,3	0,3312	16,8	145
260,7	0,361	17,6	148
266	0,3965	18,6	151
270	0,4243	19,3	153,4
274	0,4595	20	156
280	0,5092	21,2	159
285	0,564	22,2	162
291,3	0,6422	23,7	165,5
295	0,6975	24,7	168
301,5	0,811	26,3	171,6
305,8	0,9	27,6	173,8
310	1	28,7	176
315,1	1,143	30,2	179
320,3	1,307	32	182
325,1	1,482	33,7	185
330	1,66	35	187
335,1	1,91	37,6	190,5
340,1	2,15	39,5	193,4
345,7	2,45	42,4	196,5
350,5	2,7	44,4	199,4
361,1	3,36	51	204
370,5	4,1	58	210
380	4,86	67	215
390,5	5,89	79	221
400,1	7,1	98	227,5





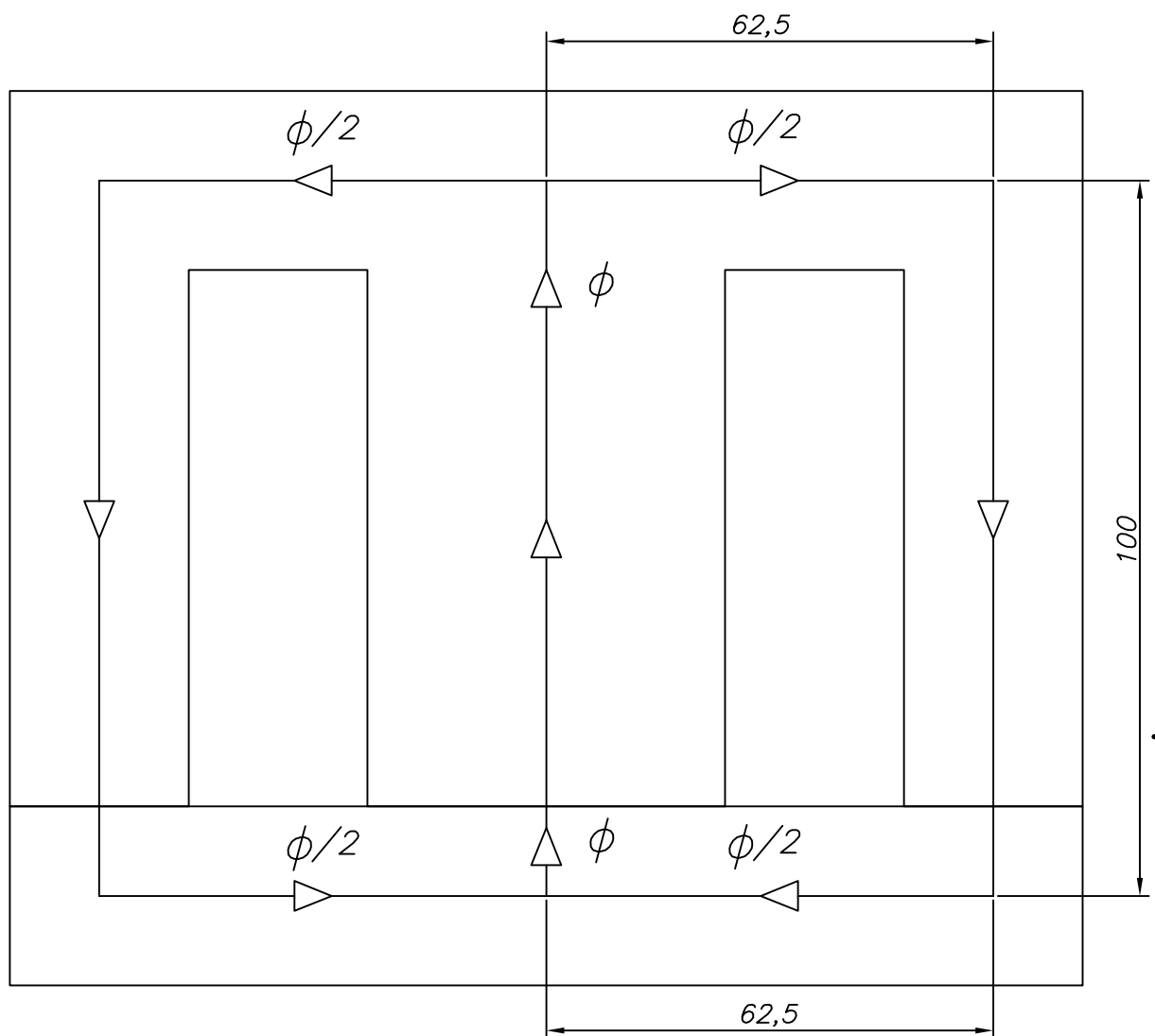




	Fecha	Nombre	Firma:	 <b>Escuela de Ingeniería y Arquitectura</b> <b>Universidad Zaragoza</b>
Dibujado	9/Jun/2019	Daniel González Yeguas		
Escala	Título Modelo Planar con puntos para FEMM2D			NIA 706618
S / E	Proyecto A. A. C. M. M. E. F.			Curso 4º
				Plano Nº 2



	Fecha	Nombre	Firma:	 Escuela de Ingeniería y Arquitectura Universidad Zaragoza
Dibujado	9/Jun/2019	Daniel González Yeguas		
Escala	Título Modelo Axisimétrico con puntos para FEMM2D			NIA 706618
S / E	Proyecto A. A. C. M. M. E. F.			Curso 4º
				Plano Nº 3



*Circuito Magnético del Autotransformador*

	Fecha	Nombre	Firma:	 Escuela de Ingeniería y Arquitectura Universidad Zaragoza
Dibujado	9/Jun/2019	Daniel González Yeguas	<i>Daniel</i>	
Escala	Título	Longitud del Circuito Magnético		NIA 706618
S / E	Proyecto	A. A. C. M. M. E. F.		Curso 4º
				Plano Nº 4