



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Transformador de media frecuencia y alta tensión: Simulación paramétrica en Ansys y determinación de parámetros eléctricos

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Autor: Martínez Fernández, José Luis
Director: Fuentes Moreno, Juan Álvaro

Cartagena, 14/07/2019

Índice de contenido

Índice de tablas	6
Resumen y objetivos	7
1 Historia del arte	7
1.1 Pérdidas en el cobre.....	7
1.2 Inductancias de magnetización y dispersión	9
1.3 Factor de llenado de ventana	11
2 Configuraciones del transformador	11
3 Parámetros geométricos.....	15
4 Materiales	18
5 Modelos parametrizados en Ansys	20
5.1 Elaboración de los modelos.....	20
6 Simulación de los modelos	25
6.1 Tipo de simulación	26
6.2 Condiciones de contorno.....	27
6.3 Devanados y excitaciones	29
6.4 Setup de la simulación.....	35
6.5 Variables de salida de la simulación	36
7 Resultados.....	39
7.1 Fr simulación vs método de Dowell.....	39
7.1.1 Split_1	40
7.1.2 Split_2.....	42
7.1.3 Concentric_1	44
7.1.4 Concentric_2.....	46
7.1.5 Conclusiones	47
7.2 Fr simulación vs método de Ferreira.....	48
7.2.1 Split_1	48
7.2.2 Split_2.....	50
7.2.3 Concentric_1	53
7.2.4 Concentric_2.....	55
7.2.5 Conclusiones	56



7.3	Inductancia de magnetización	56
7.4	Inductancias de dispersión	57
7.4.1	Core+Split_1	58
7.4.2	Shell+Split_1	59
7.4.3	Core+Split_2	61
7.4.4	Shell+Split_2	62
7.4.5	Core+Concentric_1	64
7.4.6	Shell+Concentric _1	65
7.4.7	Core+Concentric _2	67
7.4.8	Shell+Concentric _2	68
7.4.9	Conclusiones	68
7.5	Conclusiones generales	69
Bibliografía		70
Anexos		71
I.	Especificaciones de la aleación 2605SA1 proporcionadas por Metglas.....	71



Índice de figuras

Figura 1.1. Factor de porosidad de Dowell.....	8
Figura 1.2. Factor de penetración	9
Figura 1.3. Distribución de flujos en un transformador.....	10
Figura 1.4. Factor de llenado	11
Figura 2.1. Configuración tipo Shell.....	12
Figura 2.2. Configuración tipo core.....	12
Figura 2.3. Shell+Split_1	13
Figura 2.4. Shell+Split_2	13
Figura 2.5. Shell+Concentric_1	14
Figura 2.6. Shell+Concentric_2	14
Figura 3.1. Parámetros geométricos 1.....	15
Figura 3.2. Parámetros geométricos 2.....	16
Figura 3.3. Parámetros geométricos 3.....	17
Figura 5.1. Project variables	20
Figura 5.2. Definición de variables.....	21
Figura 5.3. Ventana de herramientas de dibujo de Ansys.....	21
Figura 5.4. Diseño de la seccion de una espira.	22
Figura 5.5. Parametrización de la conductividad del cobre en Ansys	23
Figura 5.6. Aleación de hierro 2605SA en Ansys	24
Figura 6.1. Tipos de simulaciones en Ansys.....	26
Figura 6.2. Incluir pérdidas en el cobre y en el núcleo	27
Figura 6.3. Región del transformador	27
Figura 6.4. Condiciones de contorno en Ansys	28
Figura 6.5. Distribución de campo magnético en el infinito.....	28
Figura 6.6. Asignación de condiciones de contorno	29
Figura 6.7. Campo magnético nulo en el exterior de la región.....	29
Figura 6.8. Definir cada espira como un sólido independiente.....	30
Figura 6.9. Ventana del modelo tras desfragmentar las espiras.....	30
Figura 6.10. Definición del primario	31



Figura 6.11. Sentido de la corriente en los devanados.....	32
Figura 6.12. Ventana emergente "Coil..."	32
Figura 6.13. Asignar cada punto de entrada a su devanado.....	33
Figura 6.14. Carga del primario	33
Figura 6.15. Carga del secundario	34
Figura 6.16. Matriz de devanados en Ansys 1	34
Figura 6.17. Matriz de devanados en Ansys 2	35
Figura 6.18. Condición de convergencia establecida.....	35
Figura 6.19. Acceso a variables de salida de Ansys	36
Figura 6.20. Ventana "Fields Calculator"	38
Figura 6.21. Listas de Ansys.....	39
Figura 7.1. Configuración Shell+Concentric_1 10X5 ("SIM 10X5").....	40
Figura 7.2. Fr simulación vs método de Dowell (Split_1).....	40
Figura 7.3. Fr simulación vs método de Dowell (Split_1 1X-)	41
Figura 7.4. Fr simulación vs método de Dowell (Split_1 3X-)	41
Figura 7.5. Fr simulación vs método de Dowell (Split_1 6X-)	42
Figura 7.6. Fr simulación vs método de Dowell (Split_2).....	42
Figura 7.7. Fr simulación vs método de Dowell (Split_2 2X-)	43
Figura 7.8. Fr simulación vs método de Dowell (Split_2 4X-)	43
Figura 7.9. Fr simulación vs método de Dowell (Split_2 6X-)	44
Figura 7.10. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric_1).....	44
Figura 7.11. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric_1 -X1).....	45
Figura 7.12. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric_1 -X3).....	45
Figura 7.13. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric_1 -X5).....	46
Figura 7.14. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric_2).....	46
Figura 7.15. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric_2 -X2).....	47
Figura 7.16. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric_2 -X4).....	47
Figura 7.17. Fr simulación vs método de Dowell (Split_1).....	49
Figura 7.18. Fr simulación vs método de Dowell (Split_1 1X-)	49
Figura 7.19. Fr simulación vs método de Dowell (Split_1 3X-)	50
Figura 7.20. Fr simulación vs método de Dowell (Split_1 6X-)	50
Figura 7.21. Fr simulación vs método de Dowell (Split_2).....	51



Figura 7.22. Fr simulación vs método de Dowell (Split_2 2X-)	51
Figura 7.23. Fr simulación vs método de Dowell (Split_2 4X-)	52
Figura 7.24. Fr simulación vs método de Dowell (Split_2 6X-)	52
Figura 7.25. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric_1)	53
Figura 7.26. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric_1 -X1)	53
Figura 7.27. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric_1 -X3)	54
Figura 7.28. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric_1 -X5)	54
Figura 7.29. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric_2)	55
Figura 7.30. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric_2 -X2)	55
Figura 7.31. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric_2 -X4)	56
Figura 7.32. Inductancia de magnetización	57
Figura 7.33. Inductancia de dispersión Core+Split_1 1x-	58
Figura 7.34. Inductancia de dispersión Core+Split_1 3x-	58
Figura 7.35. Inductancia de dispersión Core+Split_1 5x-	59
Figura 7.36. Inductancia de dispersión Shell+Split_1 1x-	59
Figura 7.37. Inductancia de dispersión Shell+Split_1 3x-	60
Figura 7.38. Inductancia de dispersión Shell+Split_1 5x-	60
Figura 7.39. Inductancia de dispersión Core+Split_2 2x-	61
Figura 7.40. Inductancia de dispersión Core+Split_2 4x-	61
Figura 7.41. Inductancia de dispersión Core+Split_2 6x-	62
Figura 7.42. Inductancia de dispersión Shell+Split_2 2x-	62
Figura 7.43. Inductancia de dispersión Shell+Split_2 4x-	63
Figura 7.44. Inductancia de dispersión Shell+Split_2 6x-	63
Figura 7.45. Inductancia de dispersión Core+Concentric_1 -x1	64
Figura 7.46. Inductancia de dispersión Core+Concentric_1 -x3	64
Figura 7.47. Inductancia de dispersión Core+Concentric_1 -x5	65
Figura 7.48. Inductancia de dispersión Shell+Concentric_1 -x1	65
Figura 7.49. Inductancia de dispersión Shell+Concentric_1 -x3	66
Figura 7.50. Inductancia de dispersión Shell+Concentric_1 -x5	66
Figura 7.51. Inductancia de dispersión Core+Concentric_2 -x2	67
Figura 7.52. Inductancia de dispersión Core+Concentric_2 -x4	67
Figura 7.53. Inductancia de dispersión Shell+Concentric_2 -x2	68



Figura 7.54. Inductancia de dispersión Shell+Concentric_2-x468

Índice de tablas

Tabla 3.1. Parámetros geométricos propuestos.....	18
Tabla 4.1. Geometrías AMCC disponibles	19
Tabla 6.1. Variables de salida en Ansys	36
Tabla 6.2. Longitud media devanados	37

Resumen y objetivos

En este proyecto se recoge el proceso de diseño paramétrico de un transformador monofásico de media frecuencia y alta tensión, mediante el software computacional Ansys Maxwell Electronics, con el fin de realizar simulaciones y determinar cuantitativamente cómo influyen las principales configuraciones y parámetros de diseño en el comportamiento del mismo, y comparar los resultados (en concreto, las pérdidas en los devanados y las inductancias de magnetización y dispersión) de las simulaciones con los resultados obtenidos mediante métodos analíticos.

Existen dos aproximaciones analíticas para el cálculo de las pérdidas en el cobre, la basada en las pérdidas de una lámina rectangular (Dowell) y la basada en las pérdidas de un conductor cilíndrico (Ferreira). Ambas se pueden utilizar tanto en secciones rectangulares como cilíndricas.

Para el cálculo analítico de la inductancia de dispersión solo se considera la aproximación analítica de Dowell.

1 Historia del arte

Existen numerosas formas constructivas de diseñar un transformador, las cuales generalmente buscan minimizar pérdidas. Por ello, es importante disponer de métodos analíticos que puedan ser útiles a la hora de determinar variables con las que cuantificar esas pérdidas.

1.1 Pérdidas en el cobre

Para el cálculo de las pérdidas en el cobre es común recurrir a modelos analíticos con los cuales se determina la resistencia eléctrica de los mismos para una frecuencia dada.

De ahí surge una variable adimensional denominada comúnmente como factor de resistencia, que equivale a la relación entre la resistencia de un devanado para una frecuencia dada y la resistencia para frecuencia nula.

$$F_r(f) = \frac{R_{ac}(f)}{R_{dc}} \quad 1-1$$

A partir de la variable adimensional F_r , se pueden calcular las pérdidas para cualquier forma de onda, gracias a la descomposición de Fourier, de la forma:

$$\frac{R_{eff}}{R_{dc}} = \frac{I_{dc}^2 * \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 * F_r(f)}{I_{rms}^2} \quad 1-2$$

En este proyecto se compararán los resultados de F_r de las simulaciones con los valores obtenidos por dos métodos analíticos.

El primer método analítico se basa en las pérdidas de una lámina rectangular, propuesto por **Dowell**.

El método de Dowell incorpora un factor de porosidad el cual convierte el problema bidimensional de pérdidas en un problema unidimensional.

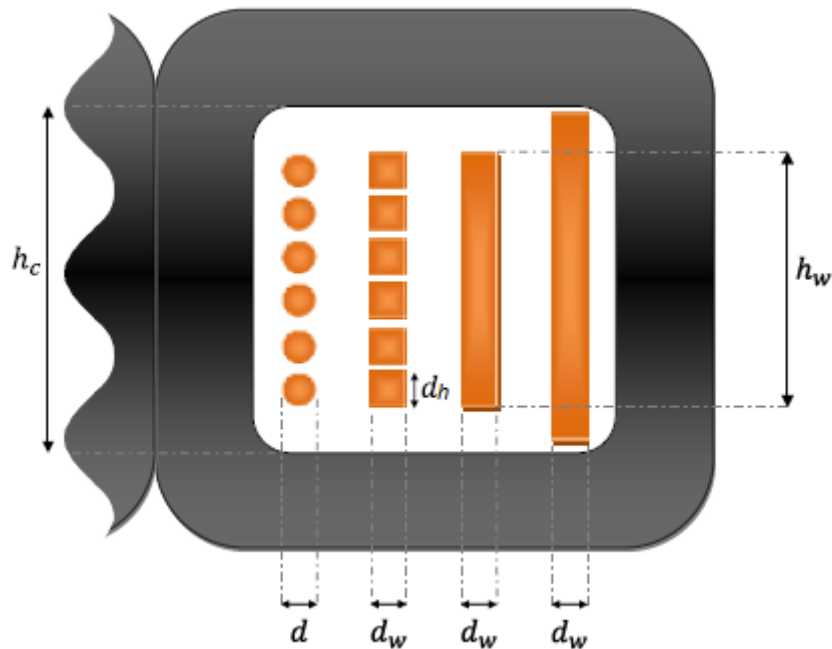


Figura 1.1. Factor de porosidad de Dowell

Como se puede observar en la imagen anterior, este factor se puede calcular tanto para conductores cilíndricos como para rectangulares. En el caso de partir de un conductor cilíndrico, habría que calcular el lado de la espira equivalente cuadrada, de la forma:

$$d_w = d_h = \sqrt{\frac{\pi}{4}} d \quad 1-3$$

A partir de ahí, se calcula el factor de porosidad como

$$\eta_h = \frac{N_h * d_h}{h_c} \quad 1-4$$

Siendo N_h el número de espiras de cada capa.

El parámetro característico de este método analítico se define como

$$\Delta' = \Delta * \eta_h \quad 1-5$$

Siendo Δ el factor de penetración.

$$\Delta = \frac{d_w}{\delta}$$

δ es la profundidad de penetración (skin depth) del conductor a una determinada frecuencia.

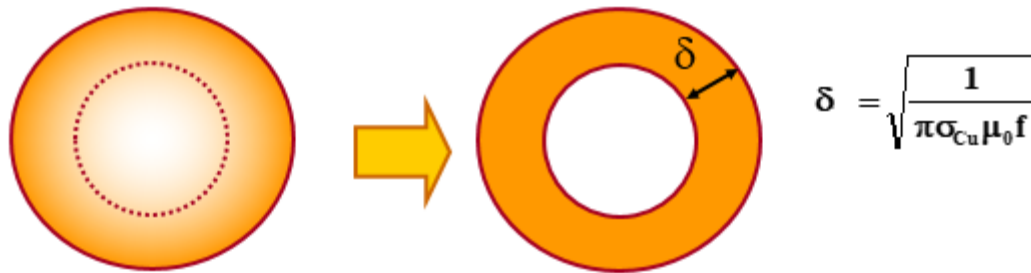


Figura 1.2. Factor de penetración

A partir de Δ' y del número de capas que forman el devanado se calcula F_r .

Para el cálculo de F_r a partir de este método, se ha utilizado como referencia la tesis de Irma Villar que se indica en la bibliografía.

El segundo método analítico se basa en las pérdidas en un conductor cilíndrico, propuesto por **Ferreira**.

En este método no se tiene en cuenta ningún factor de porosidad como el modelo anterior, con lo cual, se puede intuir que va a ser un método más impreciso.

Al contrario del método anterior, en este caso, el punto de partida es un conductor cilíndrico, por lo que es necesario calcular un diámetro equivalente en caso de disponer de espiras de otra geometría, manteniendo un área equivalente.

El parámetro característico de este método se define como

$$\gamma = \frac{d}{\delta\sqrt{2}} = \frac{\Delta}{\sqrt{2}} \quad 1-7$$

Al igual que antes, a partir de γ y del número de capas que forman el devanado se calcula F_r .

Para el cálculo de F_r a partir de este método, se ha utilizado como referencia el artículo de F. Tourkhani que se indica en la bibliografía.

1.2 Inductancias de magnetización y dispersión

La matriz de inductancias de un transformador es del tipo:

$$L = \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{pmatrix}$$

Las inductancias L_{11} y L_{22} cuantifican el flujo generado por el primario y por el secundario respectivamente.

Las inductancias L_{12} y L_{21} cuantifican el flujo total que atraviesa el núcleo, generado por el primario y por el secundario respectivamente.

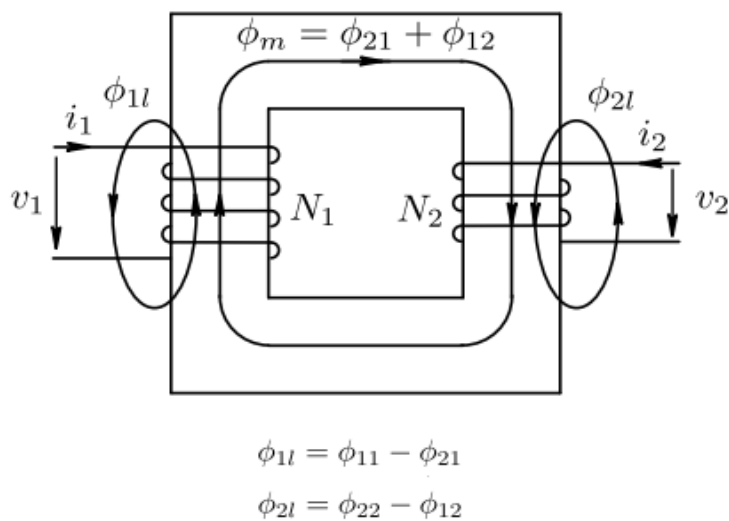


Figura 1.3. Distribución de flujos en un transformador

A partir de la matriz de inductancias, se puede cuantificar el flujo de dispersión de los devanados, calculando sus inductancias de dispersión, de la forma:

$$L_{1l} = L_{11} - \frac{N_1}{N_2} L_{12} = L_{11} - M$$

1-8

$$L_{2l} = L_{22} - \frac{N_2}{N_1} L_{21} = L_{22} - \frac{1}{Rt^2} M$$

Denominándose M la inductancia de magnetización del transformador.

La inductancia de dispersión total vista desde el primario resulta ser:

$$L_d = L_{1l} + Rt^2 L_{2l}$$

1-9



1.3 Factor de llenado de ventana

Existe un parámetro muy importante en este ámbito denominado factor de llenado de ventana Fr .

El factor de llenado de ventana no es más que la relación entre el área de cobre y la superficie total disponible en la ventana del núcleo del transformador (Sección naranja entre sección marrón).

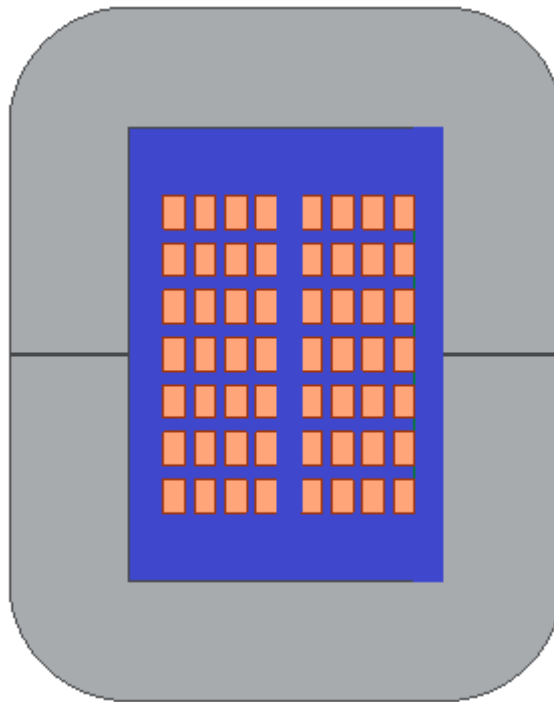


Figura 1.4. Factor de llenado

2 Configuraciones del transformador

Se van a estudiar ocho configuraciones distintas, combinando la disposición del núcleo y de los bobinados.

Las configuraciones del **núcleo** pueden ser de tipo Shell (doble ventana) o tipo Core (una sola ventana).



Figura 2.1. Configuración tipo Shell

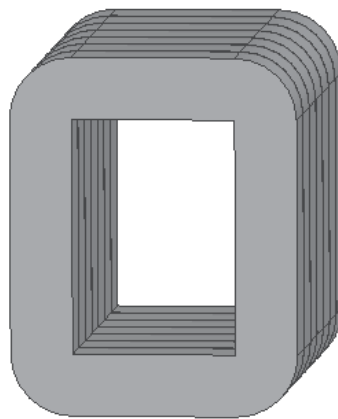


Figura 2.2. Configuración tipo core

Como puede observarse, el espesor requerido se alcanza normalmente añadiendo núcleos con dimensiones estándar en paralelo, ya que es una solución más económica, y, además, el comportamiento del transformador mejora dejando una pequeña distancia entre cada núcleo del entrehierro.

La configuración de los **bobinados** puede ser de tipo Split o tipo Concentric, con una o dos secciones magnéticas.

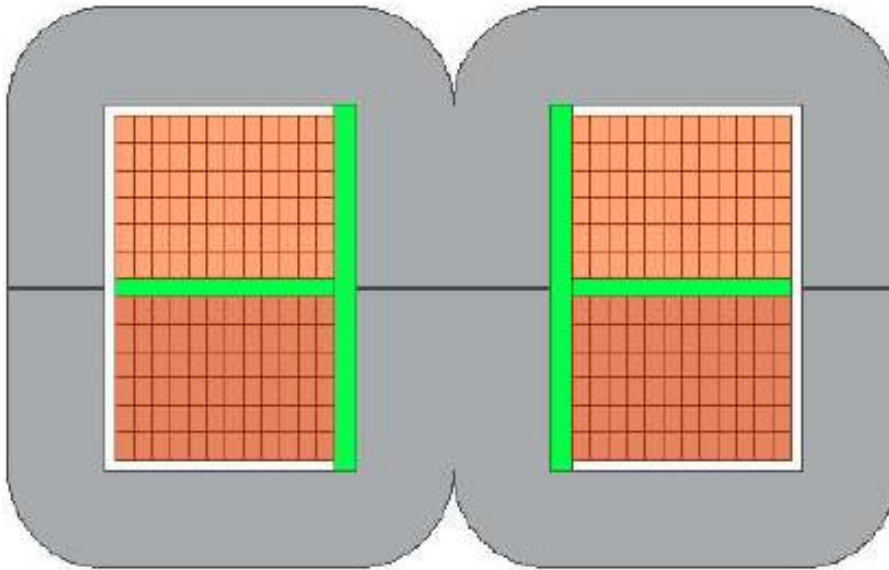


Figura 2.3. Shell+Split_1

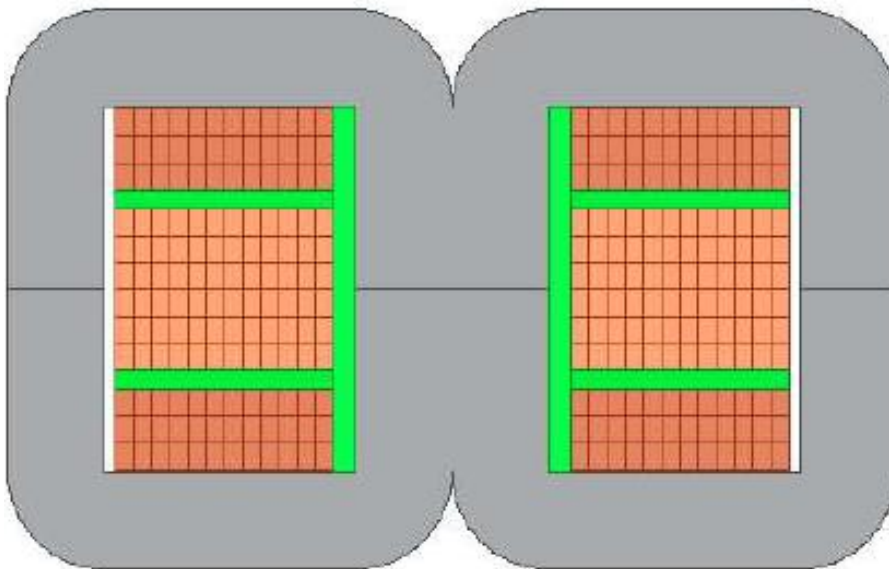


Figura 2.4. Shell+Split_2

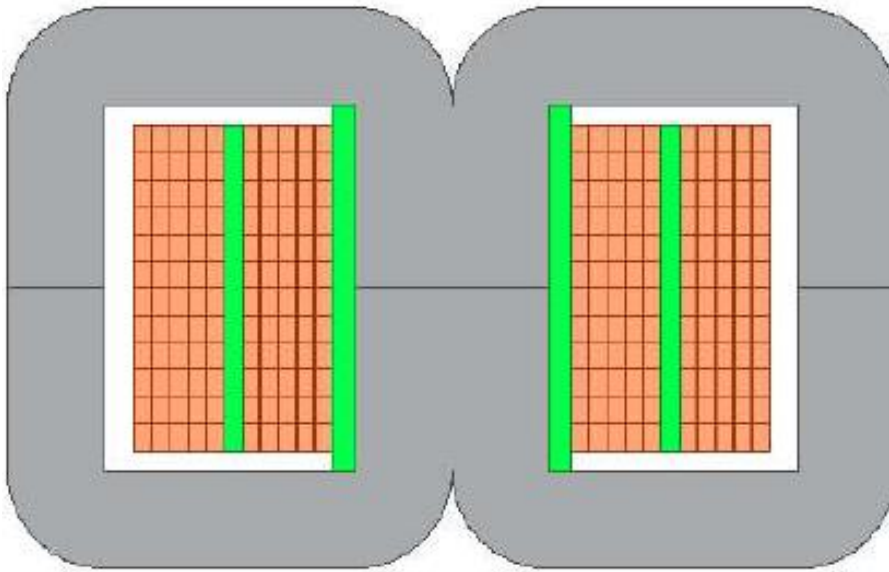


Figura 2.5. Shell+Concentric_1

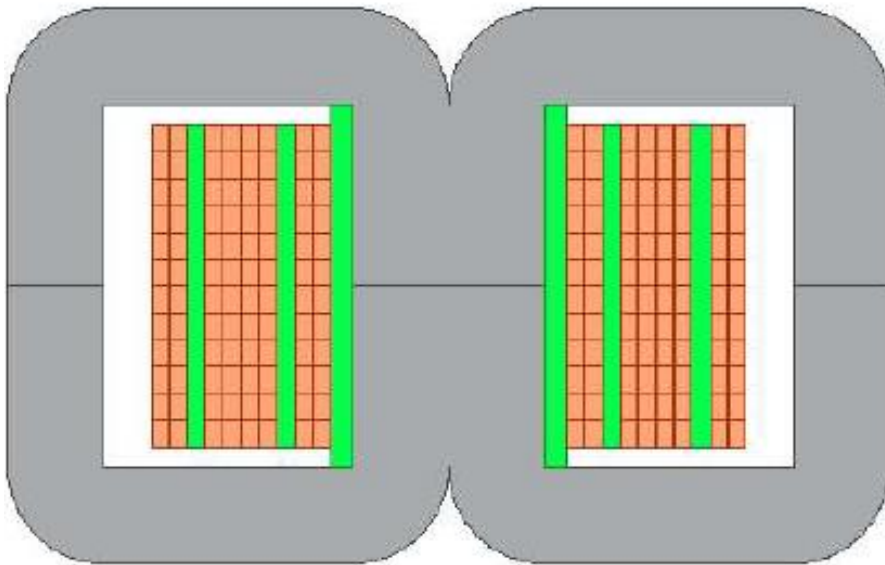


Figura 2.6. Shell+Concentric_2



3 Parámetros geométricos

A continuación, se muestran cada uno de los parámetros que definen la geometría del transformador, para la configuración Shell+Split-1 (para las demás configuraciones, los parámetros son equivalentes):

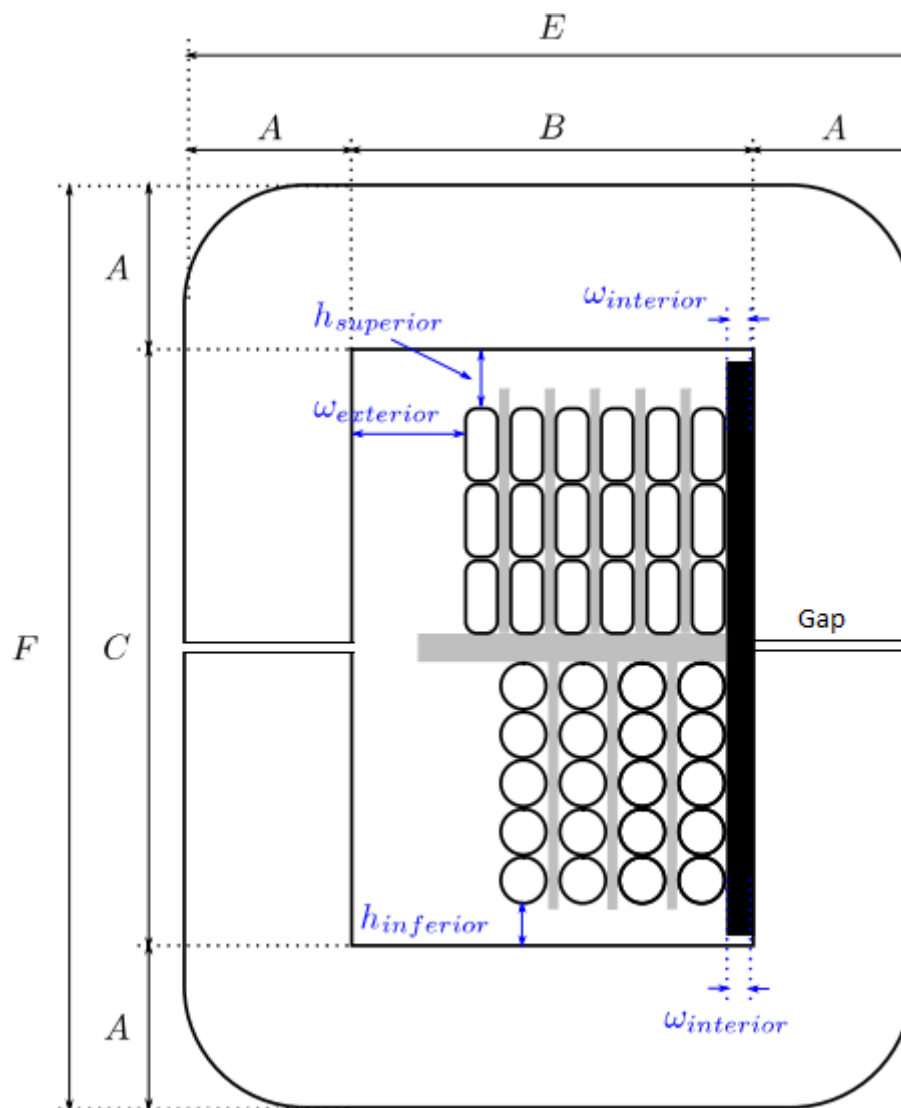


Figura 3.1. Parámetros geométricos 1

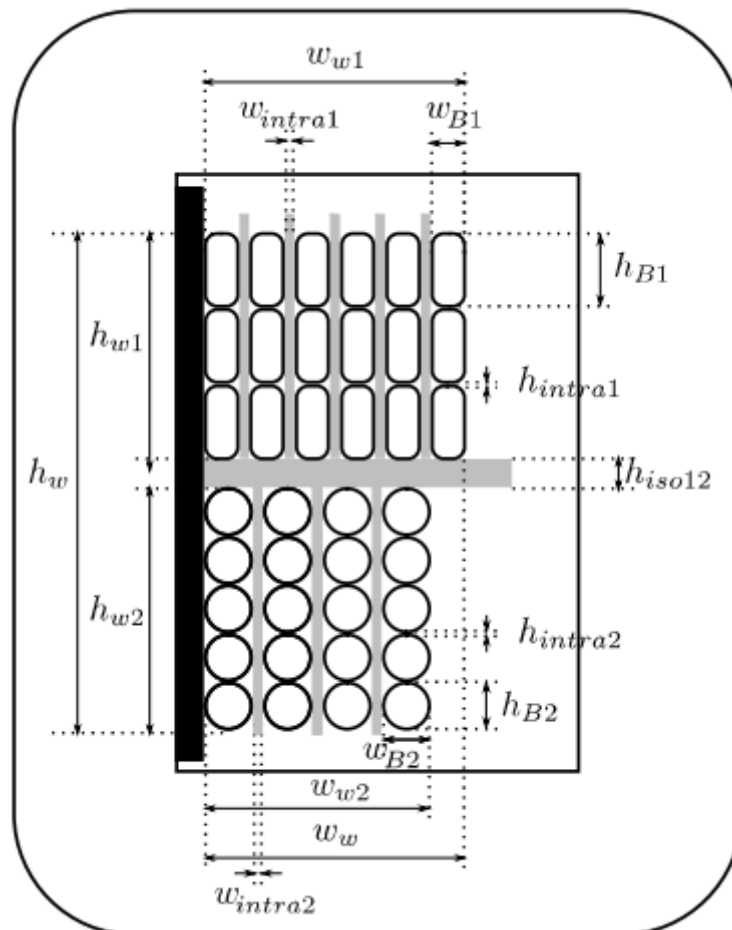


Figura 3.2. Parámetros geométricos 2

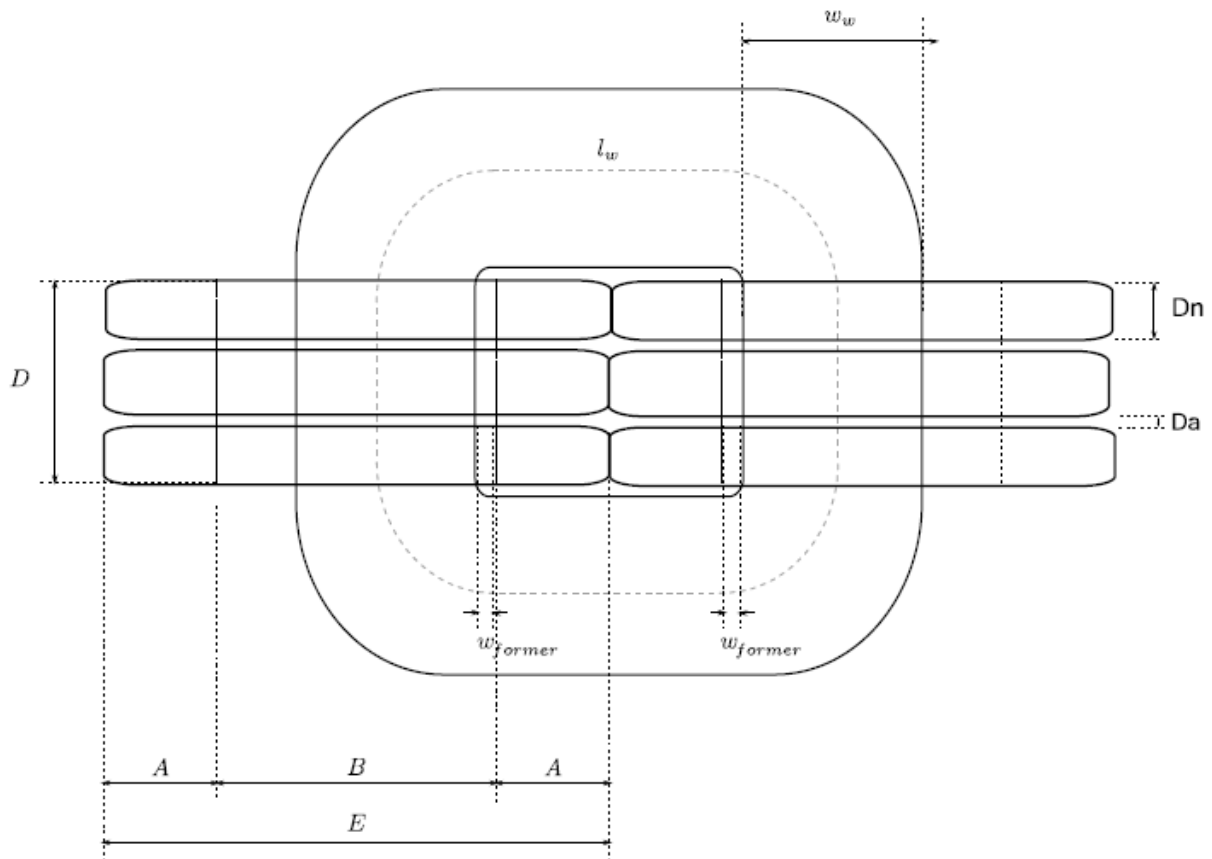


Figura 3.3. Parámetros geométricos 3

En este proyecto, el modelo del transformador es bidimensional, por lo que no se considera espacio entre núcleos ($Da=0$).

En este informe, las simulaciones se realizan para los siguientes parámetros geométricos:

Tabla 3.1. Parámetros geométricos propuestos

Núcleo	
A	25,8 mm
B	67,8 mm
C	97,8 mm
GAP	0,25 mm
D	25*7=175 mm
Bobinados	
Nh1 = Nh2	Variable
Nw1 = Nw2	Variable
N1 = N2	Variable
Hintra1 = Hintra2	0 mm
Wintra1 = Wintra2	0,26 mm
Aislamiento	
Winterior = Wformer	6 mm
Hiso12	5 mm
Sección de cable	
Rectangular	4,6x7,2 mm

4 Materiales

El **núcleo** está compuesto de una combinación de 7 núcleos tipo AMCC 367 proporcionados por Metglas (www.metglas.com), cuyo material es una aleación de hierro 2605SA (especificaciones del material anexadas).

Tabla 4.1. Geometrías AMCC disponibles

Designación	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)	E (mm)	F (mm)
AMCC 4	9,0	10,0	32,8	15,0	28,0	50,8
AMCC 6.3	10,0	11,0	33,0	20,0	31,0	53,0
AMCC 8	11,0	13,0	30,0	20,0	35,0	52,0
AMCC 10	11,0	13,0	40,0	20,0	35,0	62,0
AMCC 16A	11,0	13,0	40,0	25,0	35,0	62,0
AMCC 16B	11,0	13,0	50,0	25,0	35,0	72,0
AMCC 20	11,0	13,0	50,0	30,0	35,0	72,0
AMCC 25	13,0	15,0	56,0	25,0	41,0	82,0
AMCC 32	13,0	15,0	56,0	30,0	41,0	82,0
AMCC 40	13,0	15,0	56,0	35,0	41,0	82,0
AMCC 50	16,0	20,0	70,0	25,0	52,0	102,0
AMCC 63	16,0	20,0	70,0	30,0	52,0	102,0
AMCC 80	16,0	20,0	70,0	40,0	52,0	102,0
AMCC 100	16,0	20,0	70,0	45,0	52,0	102,0
AMCC 168S	20,4	30,0	154,2	20,0	70,5	195,0
AMCC 125	19,0	25,0	83,0	35,0	63,0	121,0
AMCC 160	19,0	25,0	83,0	40,0	63,0	121,0
AMCC 200	19,0	25,0	83,0	50,0	63,0	121,0
AMCC 367S	25,8	67,0	97,8	25,0	117,6	149,4
AMCC 250	19,0	25,0	90,0	60,0	63,0	128,0
AMCC 320	22,0	35,0	85,0	50,0	79,0	129,0
AMCC 400	22,0	35,0	85,0	65,0	79,0	129,0
AMCC 500	25,0	40,0	85,0	55,0	90,0	135,0
AMCC 630	25,0	40,0	85,0	70,0	90,0	135,0
AMCC 800A	25,0	40,0	85,0	85,0	90,0	135,0
AMCC 800B	30,0	40,0	95,0	85,0	100,0	155,0
AMCC 1000	33,0	40,0	105,0	85,0	106,0	171,0

Los **bobinados** están formados por cable macizo de cobre, ya que, de haber considerado otro tipo de sección, la potencia computacional necesaria para las simulaciones se excedería de la disponible para este proyecto.

Todo el **aislamiento** se considera aire.

5 Modelos parametrizados en Ansys

Como se ha dicho anteriormente, en este proyecto se han desarrollado modelos parametrizados del transformador, los cuales permiten construir cualquier configuración que se desee.

Los modelos que se han desarrollado son los siguientes:

- **Split 1**: Estructura Shell/Core con devanados Split y una sección magnética.
- **Split 2**: Estructura Shell/Core con devanados Split y dos secciones magnéticas.
- **Concentric 1**: Estructura Shell/Core con devanados Concentric y una sección magnética.
- **Concentric 2**: Estructura Shell/Core con devanados Concentric y dos secciones magnéticas.

5.1 Elaboración de los modelos

En primer lugar, se definen las variables geométricas que sean necesarias. Como se puede observar en la figura 5.2, una variable geométrica puede ser función de otras ya definidas.

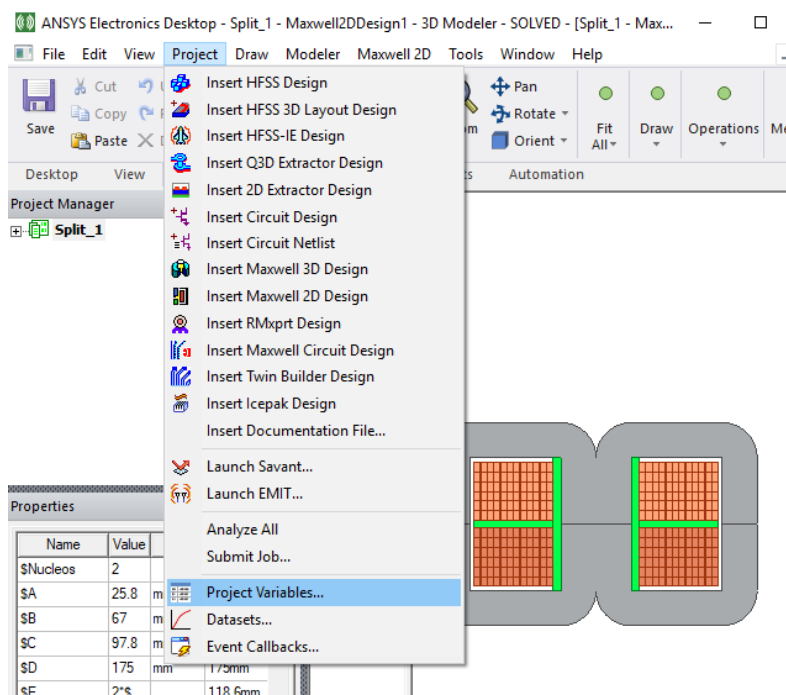


Figura 5.1. Project variables

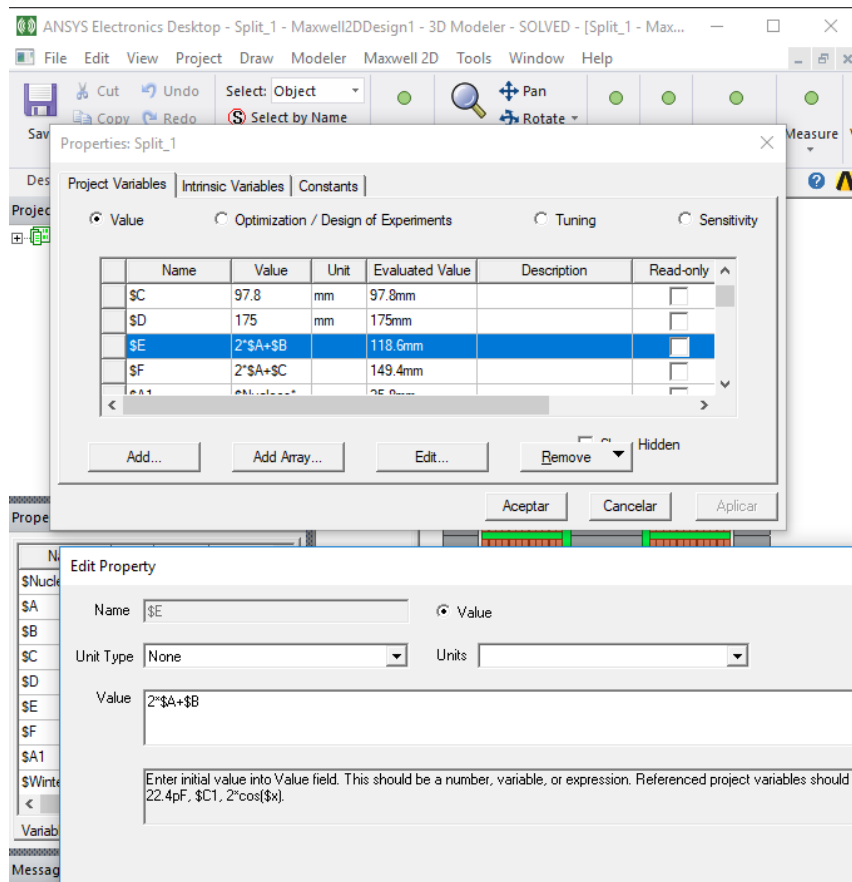


Figura 5.2. Definición de variables

En segundo lugar, se comienzan a **construir cada una de las partes del transformador**, haciendo uso de las herramientas de dibujo que más convengan. La ventana de herramientas de dibujo se muestra en la siguiente captura.

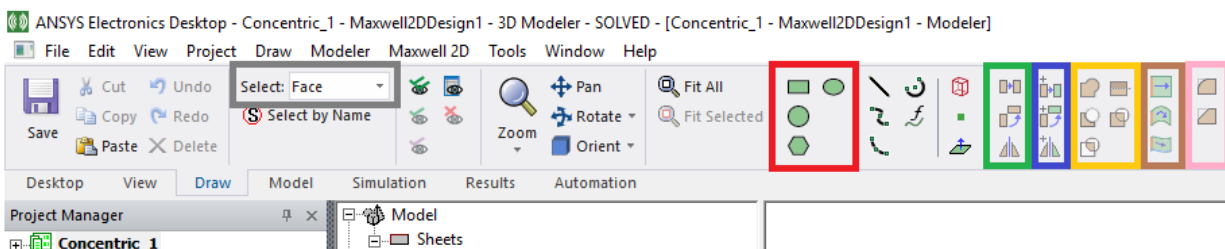


Figura 5.3. Ventana de herramientas de dibujo de Ansys

El comando marcado en gris sirve para seleccionar objetos, caras, aristas o vértices.

Los comandos marcados en rojo sirven para crear figuras geométricas simples (rectángulos, elipses, círculos o polígonos regulares).

Los comandos marcados en verde sirven para desplazar objetos, ya sea en forma lineal, angular, o simétrica.

Los comandos marcados en azul sirven para duplicar objetos, también de forma lineal, angular o simétrica. Al usar este comando, aparecen dos opciones:

1. Que el objeto y sus duplicados sigan formando un sólido (se puede parametrizar el número de duplicados).
2. Que el objeto y sus duplicados sean sólidos distintos (no se puede parametrizar el número de duplicados).

Los comandos marcados en naranja sirven para crear figuras a partir de varias formas simples, ya sea por unión, intersección, corte, etc.

Los comandos marcados en marrón sirven hacer un barrido de una figura para crear otra, a través de una guía.

Los comandos marcados en rosa sirven para realizar chaflán o redondeo.

Por ejemplo: para el diseño de las espiras, se ha partido de una espira simple rectangular, a la que se le ha añadido redondeo en los cuatro vértices:

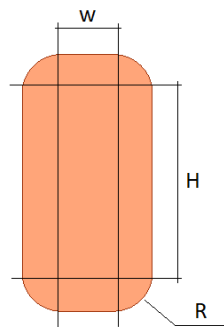


Figura 5.4. Diseño de la sección de una espira.

De esta forma, se puede conseguir tanto una espira de sección rectangular como una espira de sección circular, variando los parámetros geométricos. Una vez realizada una espira, se generan las demás a través de los comandos de duplicidad en horizontal y en vertical, y simetrías.

Tras finalizar el diseño geométrico, hay que **asignar un material** a cada uno de los objetos del modelo. Este material puede ser cualquiera de los que se dispone en la librería de Ansys, o de nueva creación.

En este caso, como ya se ha dicho anteriormente, el núcleo es de una aleación de hierro 2605SA, los devanados son de cobre macizo, y el aislamiento se considera aire.

Tanto el aire como el cobre se encuentran en la librería de Ansys. No obstante, la conductividad del cobre se ha parametrizado.

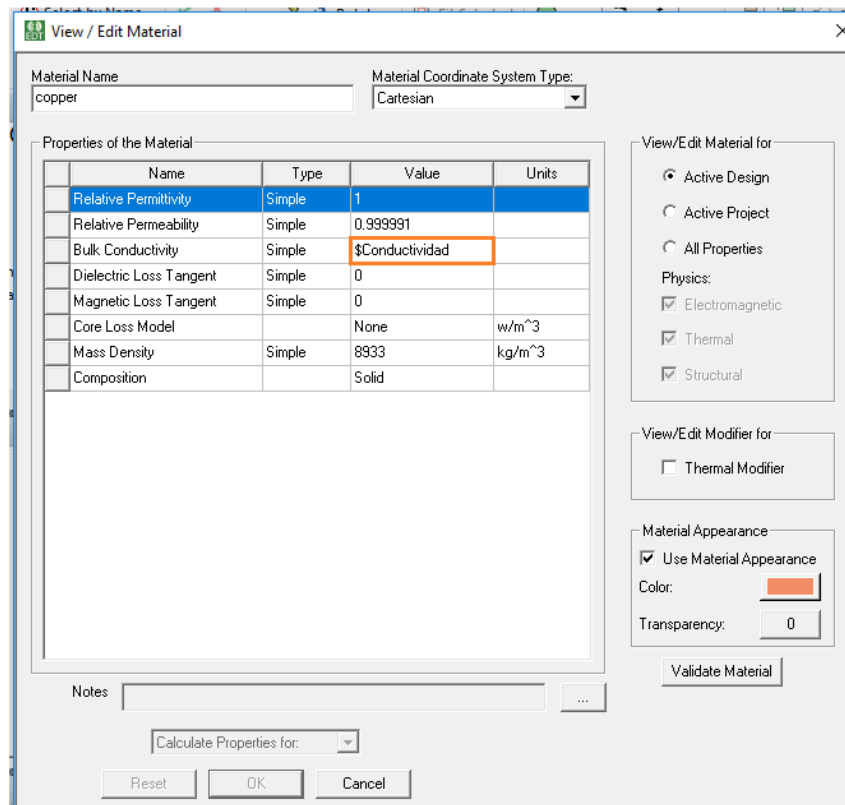


Figura 5.5. Parametrización de la conductividad del cobre en Ansys

La aleación de hierro 2605SA se ha añadido a la librería, según las especificaciones dadas por Metglas.

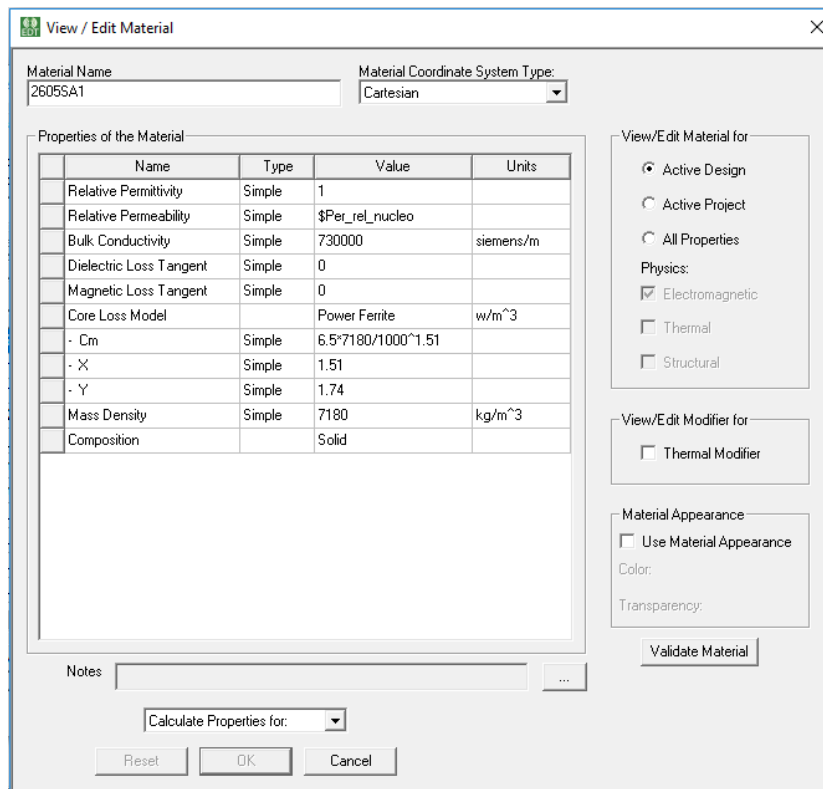


Figura 5.6. Aleación de hierro 2605SA en Ansys

Como se puede observar, se ha parametrizado la permeabilidad relativa del material, y se han tenido en cuenta las pérdidas en el núcleo según la ecuación de Steinmetz, cuyos parámetros los aporta Metglas, teniendo en cuenta que las pérdidas se contabilizan en W/m^3 y la frecuencia en Hz.

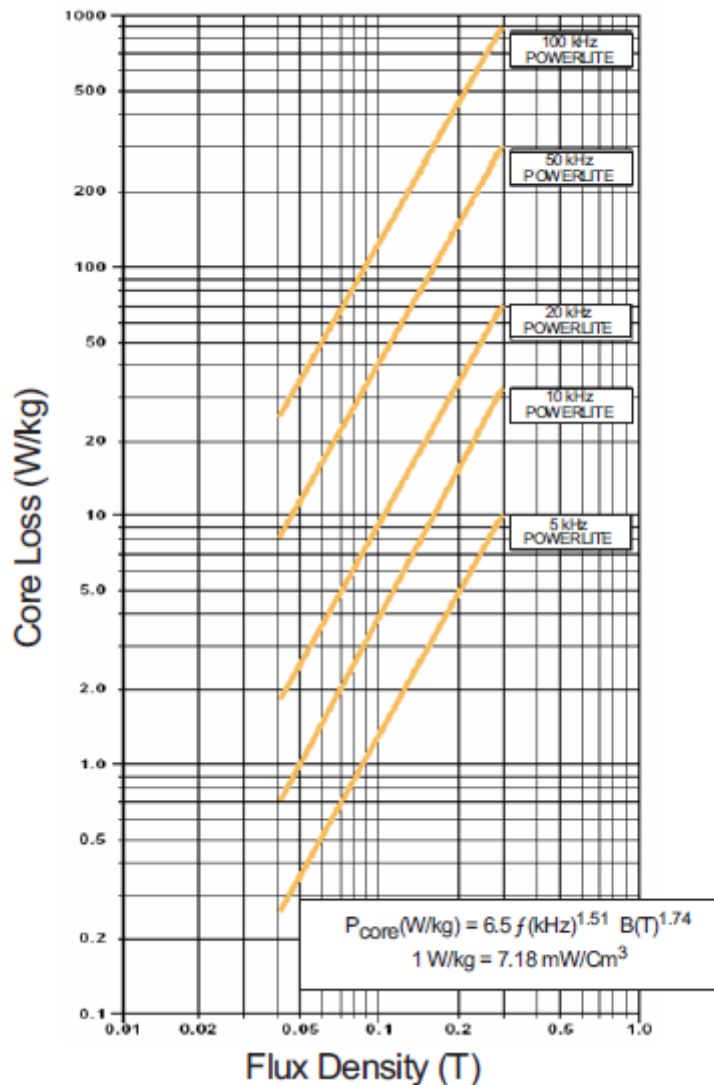
$$P \left(\frac{W}{kg} \right) = 6,5 * f(kHz)^{1,51} * B(T)^{1,71}$$

↓

$$P \left(\frac{W}{m^3} \right) = \frac{6,5 * 7180}{1000^{1,51}} * f(Hz)^{1,51} * B(T)^{1,71}$$



Core Loss vs. Flux Density* @ 25°C



6 Simulación de los modelos

Una vez definida la geometría y los materiales del modelo, es necesario seguir una serie de pasos para realizar las simulaciones pertinentes.

6.1 Tipo de simulación

Hay tres tipos de simulaciones:

1. Magnetostatic: Simulación del modelo para una excitación continua.
2. Eddy Current: Simulación del modelo para una excitación senoidal (régimen permanente).
3. Transient: Simulación del modelo para cualquier excitación (régimen transitorio y permanente).

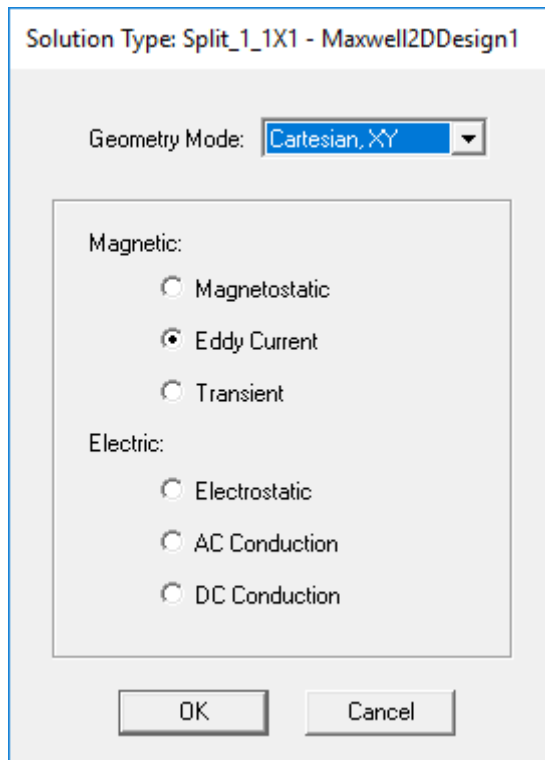


Figura 6.1. Tipos de simulaciones en Ansys

En este caso, se van a realizar simulaciones para excitaciones senoidales (Eddy Current).

Es necesario indicar que tanto las pérdidas en el cobre como en el núcleo se quieren tener en cuenta.

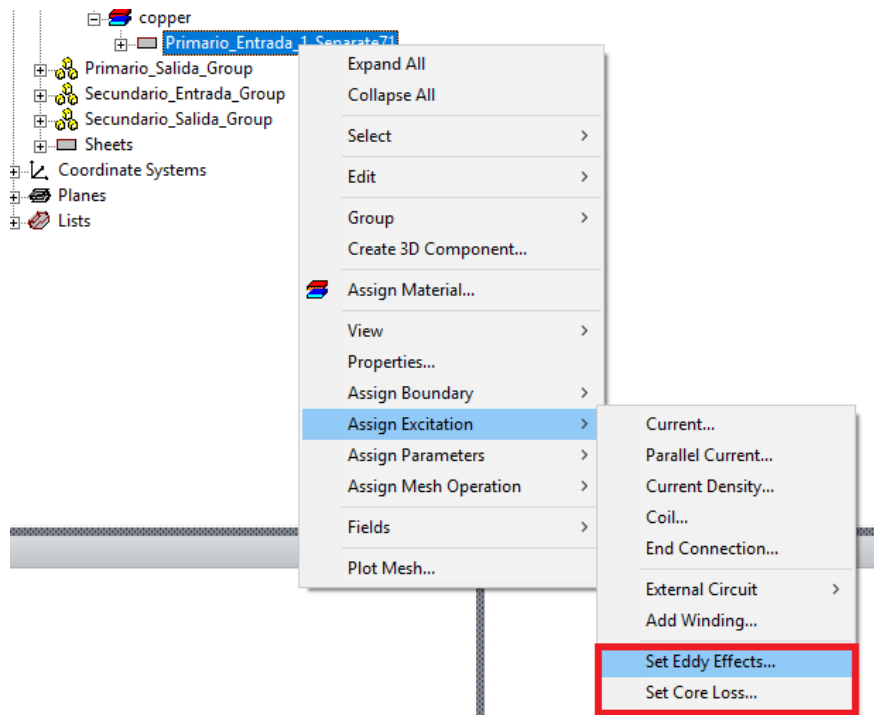


Figura 6.2. Incluir pérdidas en el cobre y en el núcleo

6.2 Condiciones de contorno

Para establecer las condiciones de contorno del problema, hay que crear una región alrededor del transformador y asignarle el medio en el que se encuentra (en este caso, aire).

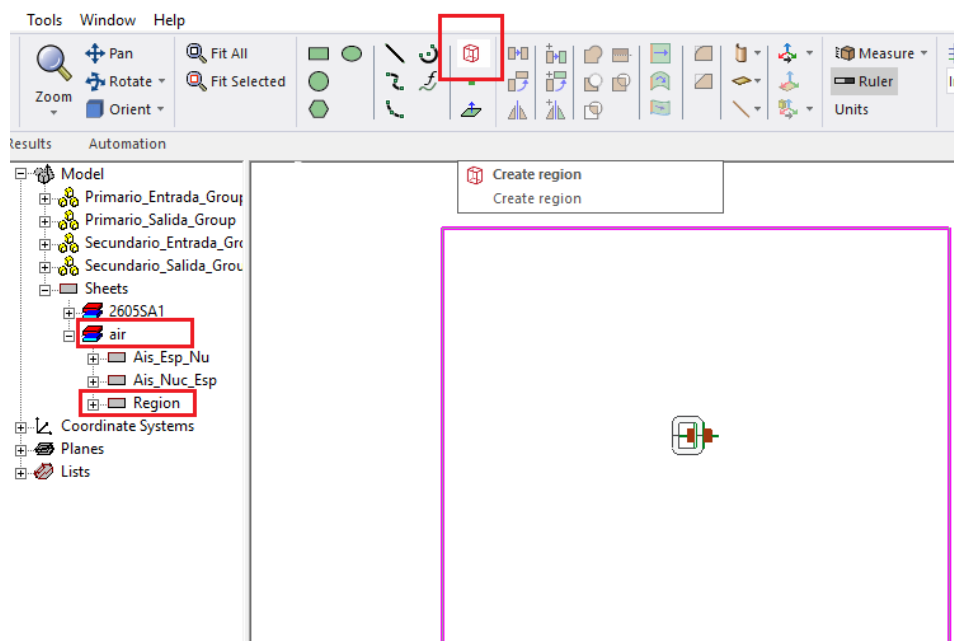


Figura 6.3. Región del transformador

Una vez creada la región, se seleccionen sus cuatro lados, y se establece la condición de contorno necesaria.

Principalmente hay dos opciones:

- **Ballon:** Se genera una condición de contorno de campo magnético nulo en el infinito.
- **Vector Potential:** Se asigna un determinado vector de campo magnético a lo largo de la región.

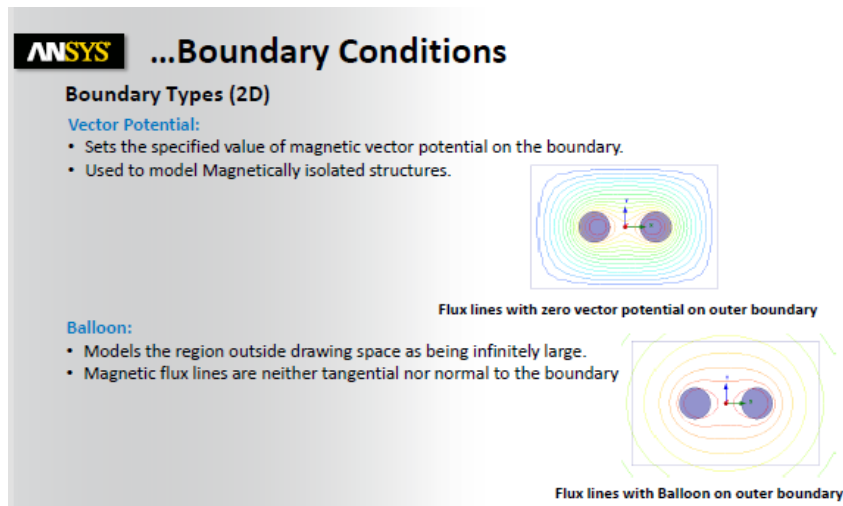


Figura 6.4. Condiciones de contorno en Ansys

En este caso se ha optado por la segunda opción, estableciendo un campo magnético nulo alrededor de la región, que es suficientemente amplia en relación al transformador como para considerar que se trata de una condición de contorno en el infinito.

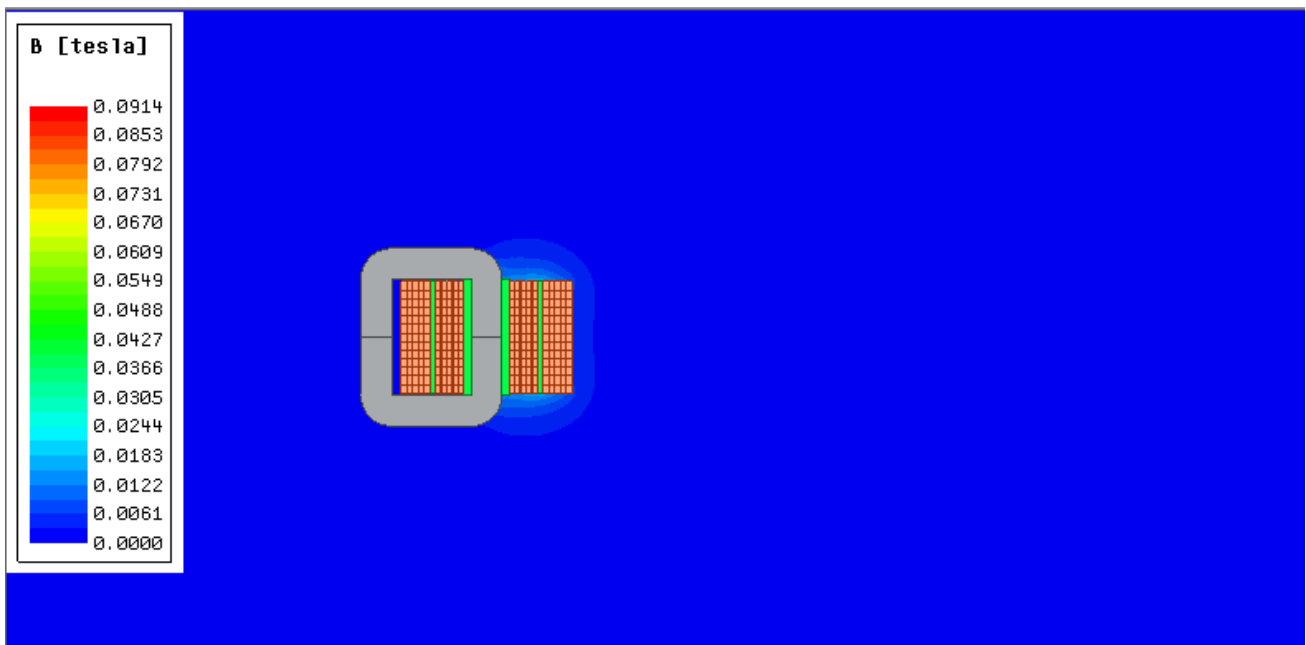


Figura 6.5. Distribución de campo magnético en el infinito

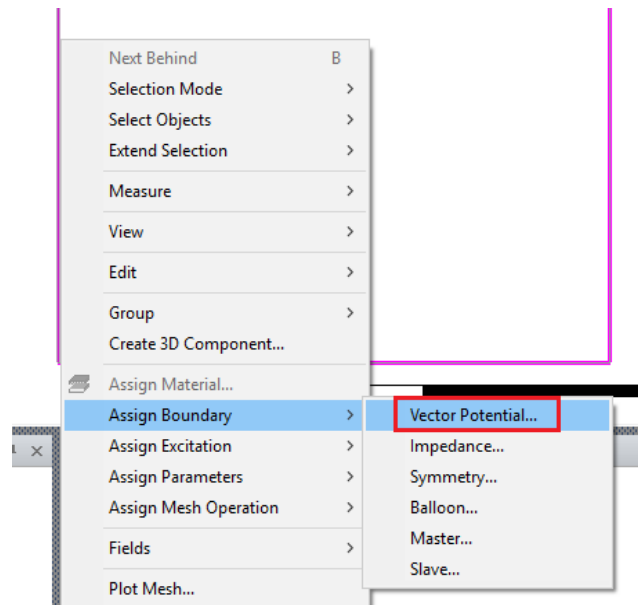


Figura 6.6. Asignación de condiciones de contorno

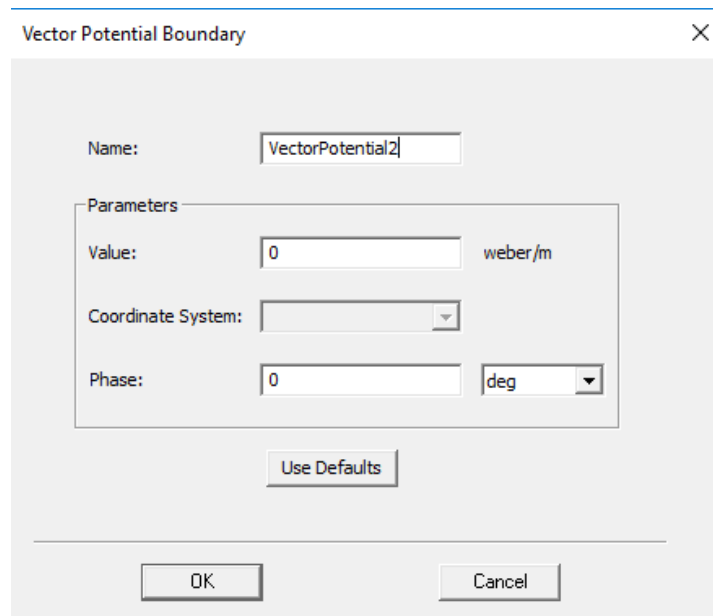


Figura 6.7. Campo magnético nulo en el exterior de la región

6.3 Devanados y excitaciones

Se trata de una de las partes más importantes, ya que Ansys ofrece numerosas formas de definir esta parte.

En primer lugar, hay que definir cada espira como un sólido independiente, ya que, como se ha comentado en la página 12, para que el número de espiras sea configurable, las duplicidades que se forman siguen perteneciendo al mismo sólido que el objeto de referencia “*Que el objeto y sus duplicados sigan formando un sólido*”.

Para ello, se selecciona el sólido a desagrupar, y se sigue la ruta ‘Edit’/’Boolean’/’Separate Bodies’.

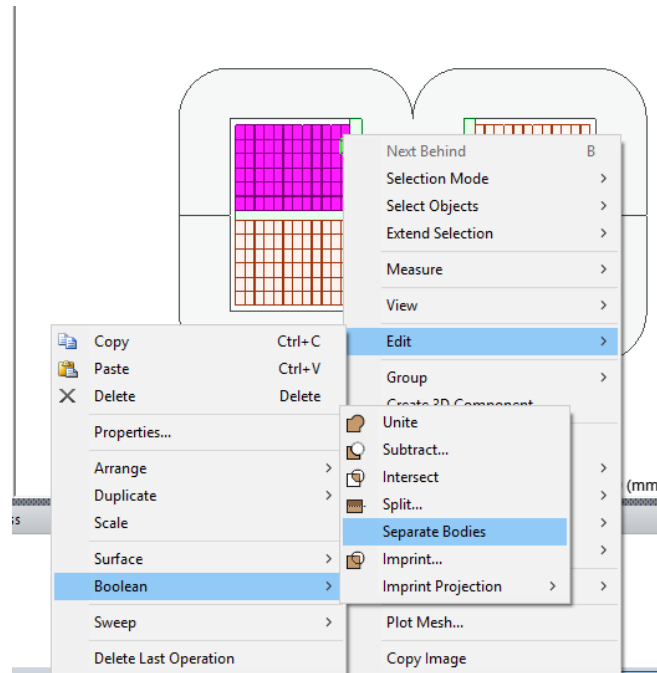


Figura 6.8. Definir cada espira como un sólido independiente

La ventana del modelo queda como en la siguiente imagen, siendo el primer sólido la espira de referencia.

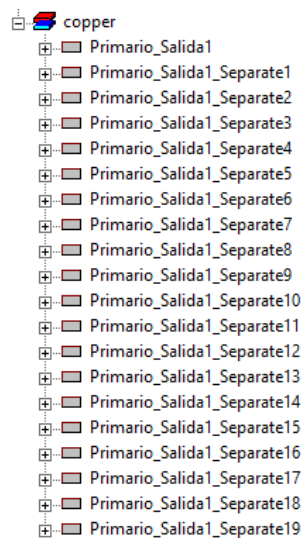


Figura 6.9. Ventana del modelo tras desfragmentar las espiras

Saltar este paso conllevaría a que, en la simulación, la distribución de corriente se calcularía como un devanado macizo.

Una vez hecho esto, se definen los devanados. Para definir el primario, se seleccionan las espiras pertenecientes al mismo (tanto de entrada como de salida), y se sigue la ruta ‘Assign Excitation’/’Add Winding’. Igual para el secundario.

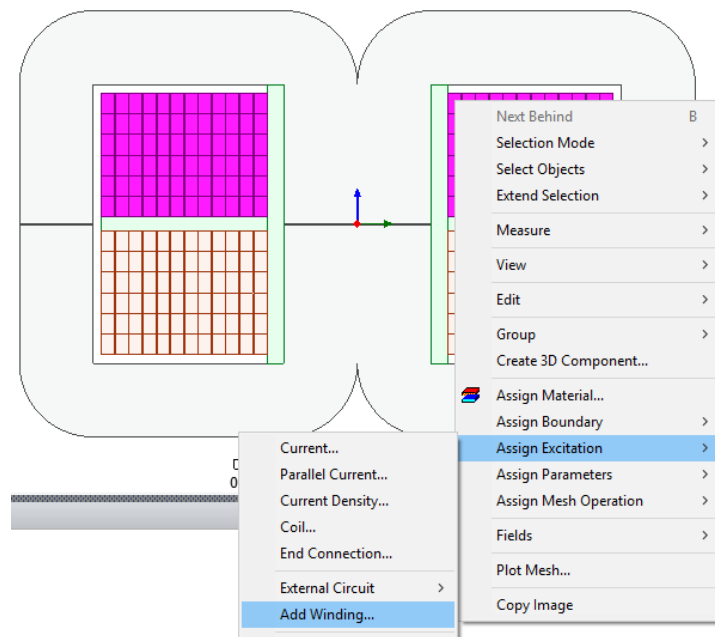


Figura 6.10. Definición del primario

Una vez hecho esto saldrá una ventana a la que luego se volverá para definir las excitaciones.

Ahora hay que definir los puntos de entrada y de salida de los devanados. En este caso se ha considerado la entrada (sentido negativo del eje X para Ansys) en el lado derecho.

Para ello, seleccionamos las espiras del lado derecho (tanto las del primario como las del secundario) y se sigue la ruta ‘Add Excitation’/’Coil...’.

En ventana emergente resultante se nombran los puntos de entrada de los devanados, se establece una espira por cada sólido, y el sentido (en este caso, sentido negativo).

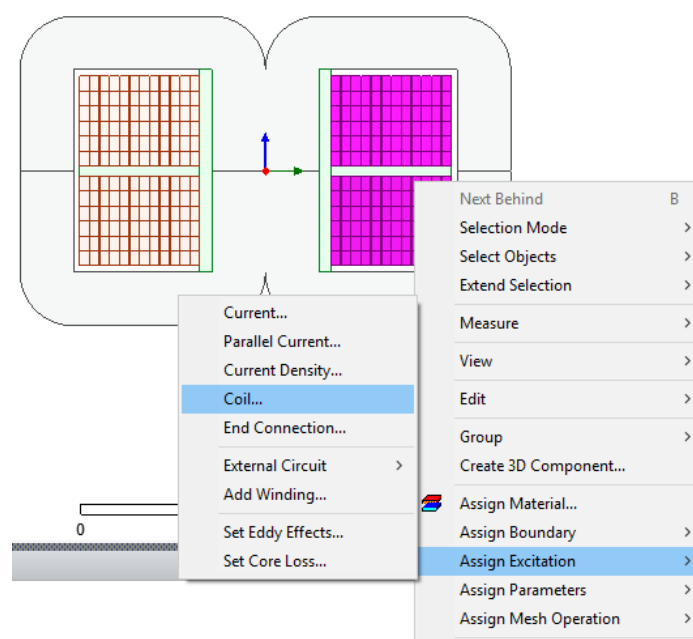


Figura 6.11. Sentido de la corriente en los devanados

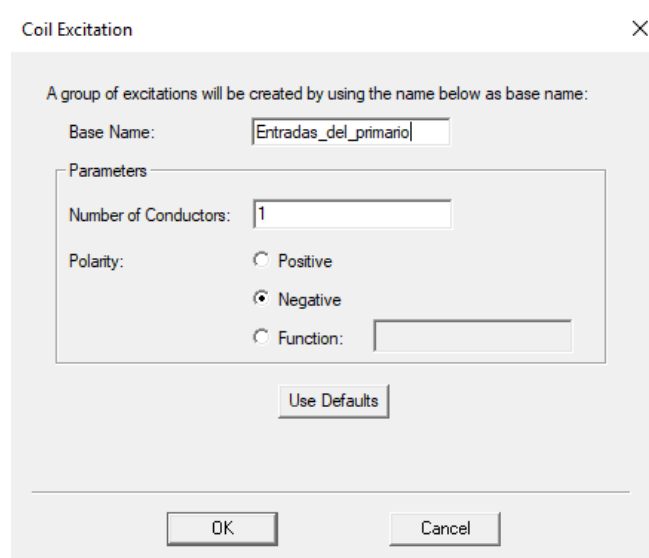


Figura 6.12. Ventana emergente "Coil..."

Una vez definidos los puntos de entrada y de salida, hay que asignar estos puntos a su devanado correspondiente.

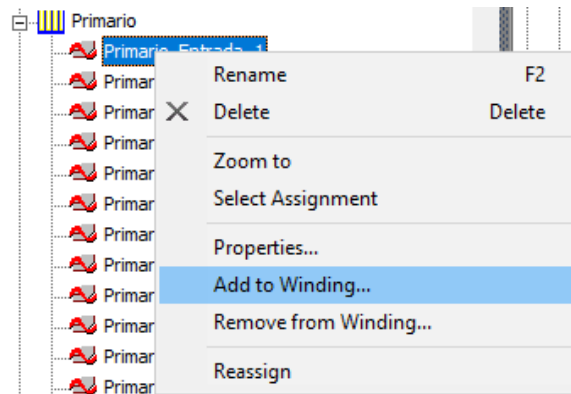


Figura 6.13. Asignar cada punto de entrada a su devanado

Volviendo a la ventana emergente que se ha comentado anteriormente, se trata de una ventana donde se determina qué hay conectado a ese devanado, y puede ser una carga tanto activa como pasiva.

En este caso, lo que se pretende es simular un cortocircuito, para determinar las pérdidas en el cobre, por lo que el primario estará sometido a una entrada de corriente nominal, la cual se ha denominado “ I_{ef} ” (valor eficaz). En cambio, en el secundario hay que provocar un corto. Esto se realiza definiendo una excitación de tensión nula, y una resistencia prácticamente nula ($R=0,1\mu\text{Ohm}$), ya que no es posible realizar un vacío o un corto puramente teórico.

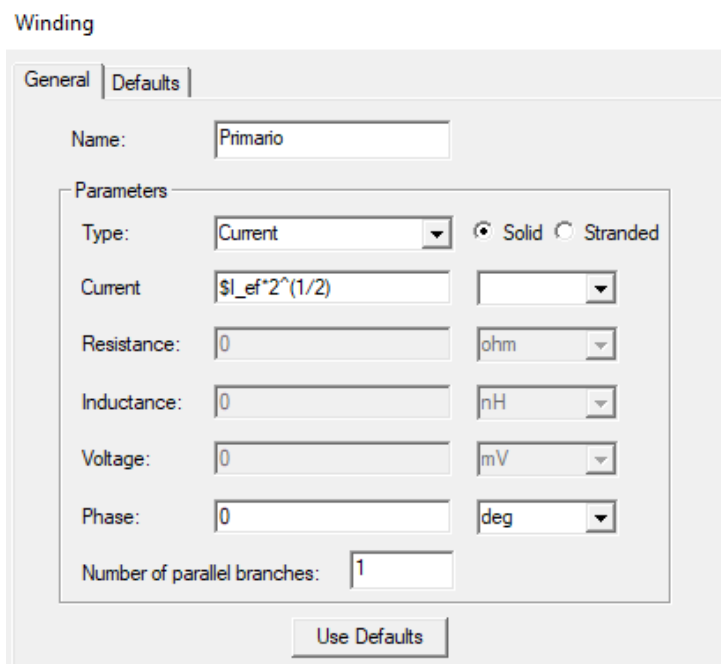


Figura 6.14. Carga del primario

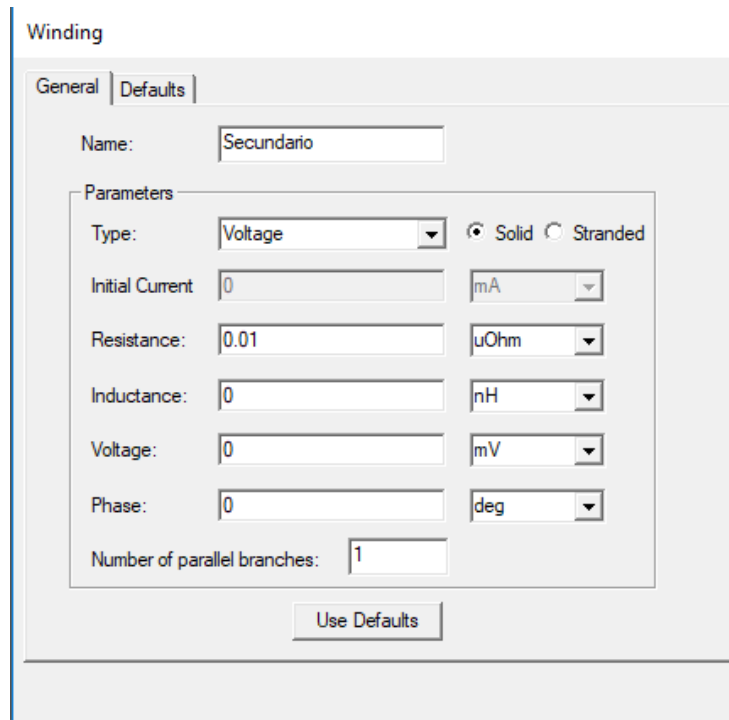


Figura 6.15. Carga del secundario

Tras realizar esta serie de pasos, por último, se define la matriz de devanados que Ansys internamente usará para calcular los parámetros de salida del transformador (matriz de inductancias, etc). Para ello hay que seguir la ruta 'Assign'/'Matrix' y seleccionar ambos devanados.

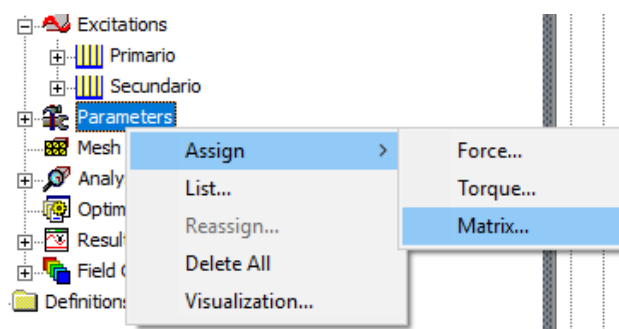


Figura 6.16. Matriz de devanados en Ansys 1

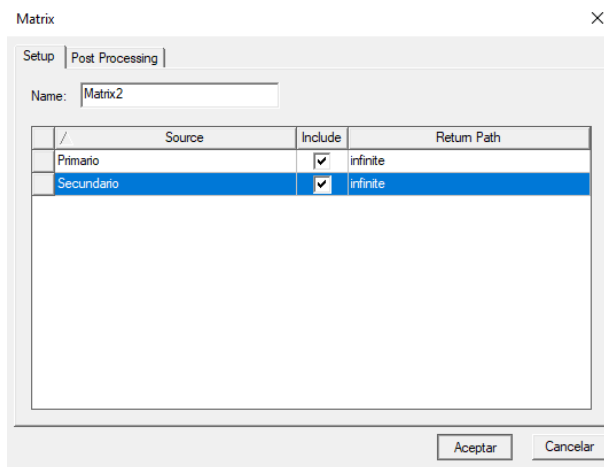


Figura 6.17. Matriz de devanados en Ansys 2

6.4 Setup de la simulación

Esta parte consta de definir los parámetros internos de simulación (convergencia, pasadas, error, frecuencias a simular, etc). No se va a entrar en detalle, ya que los parámetros que se han utilizado son los que vienen por defecto, excepto dos puntualizaciones:

1. Se ha definido la validez de convergencia cuando la diferencia de la componente L11 de la matriz de inductancias entre pasadas sea en porcentaje menor al 5%.

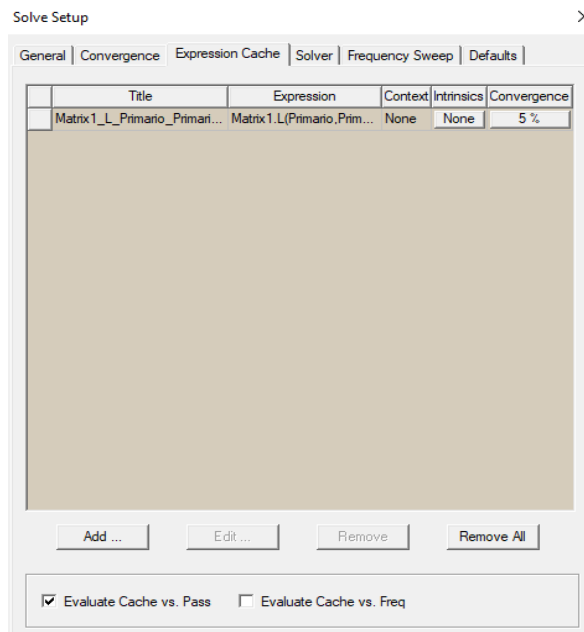


Figura 6.18. Condición de convergencia establecida

2. La escala de frecuencias que se ha definido a simular es logarítmica, entre 1Hz y 40kHz, en tres particiones (1, 3, 6, 10, 33, 66, ...).

6.5 Variables de salida de la simulación

Este apartado trata sobre definir variables de salida internamente, las cuales son función de los parámetros que se han definido previamente, del rango de frecuencias establecido para la simulación y de las propias variables que Ansys calcula tras la simulación.

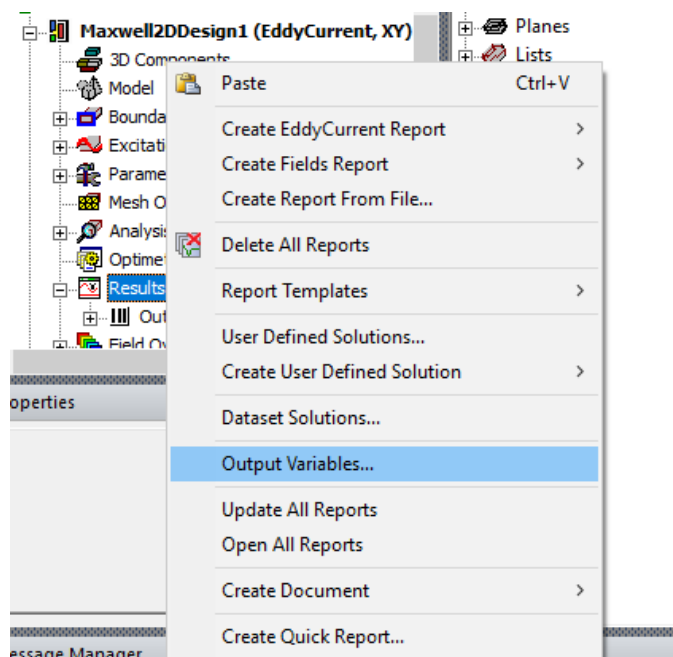


Figura 6.19. Acceso a variables de salida de Ansys

A continuación, se van a mostrar algunas de las variables de salida que se han tenido en cuenta para el cálculo tanto de las pérdidas en el cobre como de las inductancias de dispersión y magnetización.

Tabla 6.1. Variables de salida en Ansys

SECCION_CABLE_MM2	SECCION*10 ⁶
LONGITUD_MEDIA_PRIMARIO_MM	2*\$Nucleos*\$A+4*\$Winterior+2*\$D+pi*\$Ww_R
LONGITUD_MEDIA_SECUNDARIO_MM	2*\$Nucleos*\$A+4*\$Winterior+2*\$D+pi*\$Ww_R
PERDIDAS_SECUNDARIO_DC_W	LONGITUD_MEDIA_SECUNDARIO_MM/(SECCION_CABLE_MM2*\$CONDUCTIVIDAD_COBRE)*\$N_R*\$I_ef^2*10 ⁶
PERDIDAS_SECUNDARIO_AC_W	PERDIDAS_SECUNDARIO_AC*LONGITUD_MEDIA_SECUNDARIO_MM/2
PERDIDAS_PRIMARIO_DC_W	LONGITUD_MEDIA_PRIMARIO_MM/(SECCION_CABLE_MM2*\$CONDUCTIVIDAD_COBRE)*\$N_R*\$I_ef^2*10 ⁶
PERDIDAS_PRIMARIO_AC_W	PERDIDAS_PRIMARIO_AC*LONGITUD_MEDIA_PRIMARIO_MM/2
FR_SIMULACION	(PERDIDAS_PRIMARIO_AC_W+PERDIDAS_SECUNDARIO_AC_W)/(PERDIDAS_PRIMARIO_DC_W+PERDIDAS_SECUNDARIO_DC_W)
LD1_uH	LONGITUD_MEDIA_PRIMARIO_MM/2*(Matrix1.L(Primario,Primario)-Matrix1.L(Secundario,Primario))*10 ⁶
LD2_uH	LONGITUD_MEDIA_SECUNDARIO_MM/2*(Matrix1.L(Secundario,Secundario)-Matrix1.L(Primario,Secundario))*10 ⁶
LD_uH	LD1_uH+LD2_uH
LM_mH	Matrix1.L(Secundario,Primario)*\$D*10 ³



Se puede ver en la tabla anterior como se ha calculado la longitud media del primario y del secundario, las cuales intervienen en el cálculo de las pérdidas en el cobre y de las inductancias de dispersión, ya que, al trabajar en 2D, los resultados que ofrece Ansys están definidos por unidad de longitud (devanados)/profundidad (núcleo).

Al tratar los resultados en un modelo 2D, en un principio se tomó solamente la profundidad del núcleo para calcular los parámetros eléctricos equivalentes al transformador en 3D, lo que se tradujo en valores de inductancias de dispersión muy bajos en referencia con la tesis de Irma Villar. Tras buscar el foco del problema, se llegó a la conclusión de que tanto los resultados de inductancia de dispersión como los de las pérdidas en el cobre debían ser tomados por unidad de longitud del devanado, por lo que se tomó la longitud media de cada devanado para realizar el cálculo.

A continuación, se muestra una tabla donde se indica cómo se ha calculado la longitud media de los devanados en cada configuración.

Tabla 6.2. Longitud media devanados

SPLIT (PRIMARIO Y SECUNDARIO)	$2 * Nucleos * A + 4 * W_{interior} + 2 * D + \pi * W_w$
CONCENTRIC_1 (PRIMARIO)	$2 * Nucleos * A + 4 * W_{interior} + 2 * D + \pi * W_w$
CONCENTRIC_1 (SECUNDARIO)	$2 * Nucleos * A + 4 * W_{interior} + 2 * D + 2\pi * \left[\frac{3}{2} * W_w + Hiso12 \right]$
CONCENTRIC_2 (PRIMARIO)	$2 * Nucleos * A + 4 * W_{interior} + 2 * D + 2\pi * [W_w + Hiso12]$
CONCENTRIC_2 (SECUNDARIO 1)	$2 * Nucleos * A + 4 * W_{interior} + 2 * D + \pi * \frac{W_w}{2}$
CONCENTRIC_2 (SECUNDARIO 2)	$2 * Nucleos * A + 4 * W_{interior} + 2 * D + 2\pi * \left[\left(1 + \frac{3}{4} \right) * W_w + 2 * Hiso12 \right]$

En cuanto a la tabla anterior, hay que especificar que los cálculos se han realizado para una relación de transformación 1, donde $W_{w1} = W_{w2} = W_w$ y la variable “Nucleos” equivale a 1 para la configuración Core y 2 para la configuración Shell.

La matriz de inductancias es calculada por Ansys automáticamente. Como se puede ver en la figura 6.15, los devanados se han denominado “Primario” y “Secundario”, cuya matriz adquiere un nombre tipo “MatrixX”. Por los tanto, Ansys devuelve la matriz de inductancias como:

$$\begin{pmatrix} MatrixX(Primario, Primario) & MatrixX(Primario, Secundario) \\ MatrixX(Secundario, Primario) & MatrixX(Secundario, Secundario) \end{pmatrix}$$

Cabe añadir una puntualización: tanto la sección del cable como las pérdidas en alterna del primario y del secundario se han calculado a través de las variables “SECCION”, “PERDIDAS_PRIMARIO_AC” y “PERDIDAS_SECUNDARIO_AC”, respectivamente (Ver tabla 6.1).

Estas variables se han definido en una opción que ofrece Ansys denominada “Fields Calculator”, la cual permite realizar cálculos a partir de los campos que se generan a través de la simulación (densidad de corriente, campo magnético, desplazamiento, pérdidas óhmicas, etc). A pesar de ser una interfaz poco intuitiva, ofrece un gran abanico de posibilidades.

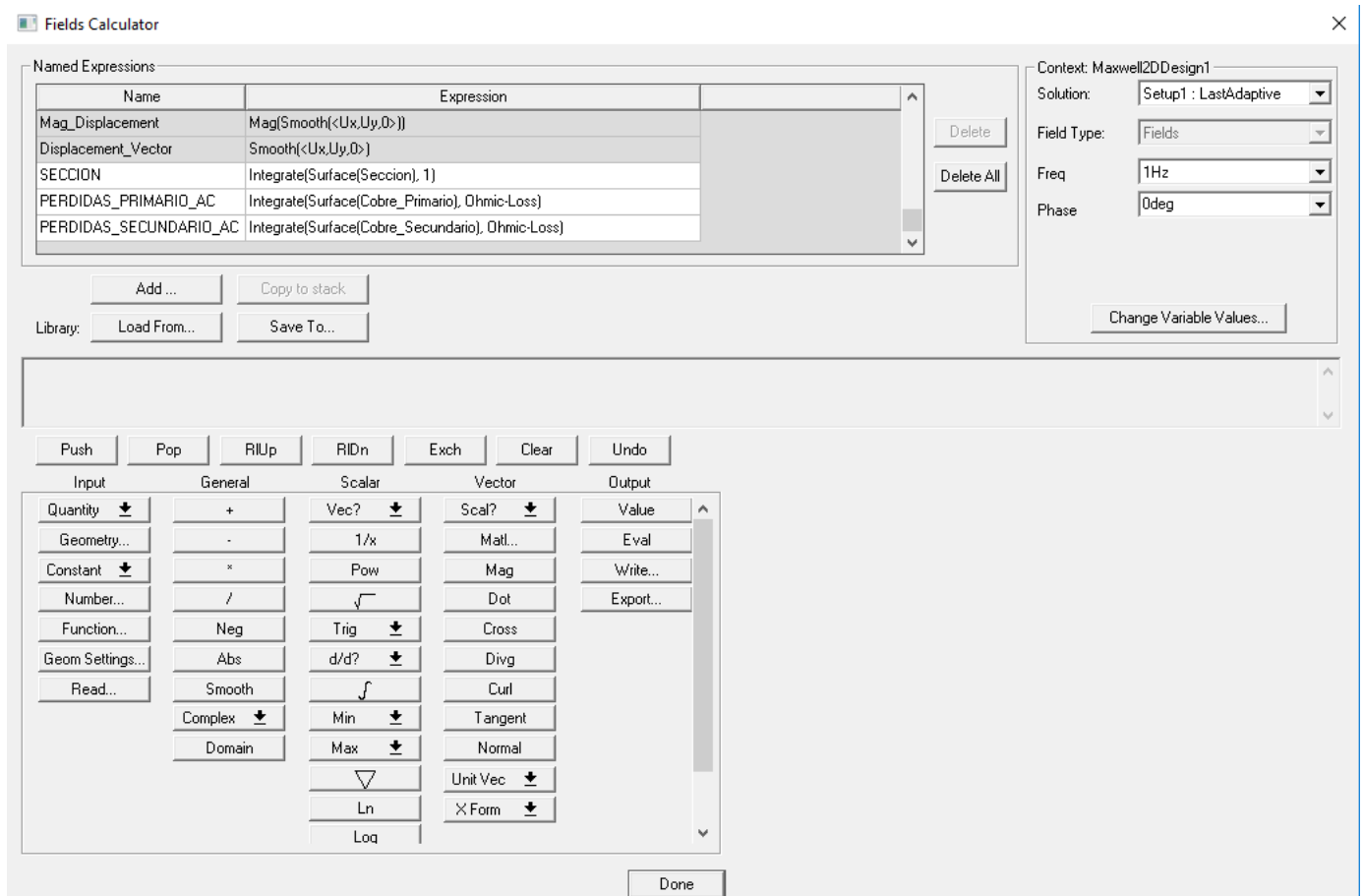


Figura 6.20. Ventana "Fields Calculator"

Como se puede observar, la sección de cable se ha calculado realizando una integral a través de la superficie “Seccion”, y las pérdidas en el primario y en el secundario mediante integración del campo “Ohmic-Loss” a través de las superficies “Cobre_Primario” y “Cobre_Secundario” respectivamente.

Estas superficies se han definido mediante la opción de listas que ofrece Ansys. Esta opción permite realizar agrupaciones de superficies, independientemente de si pertenecen o no al mismo sólido.

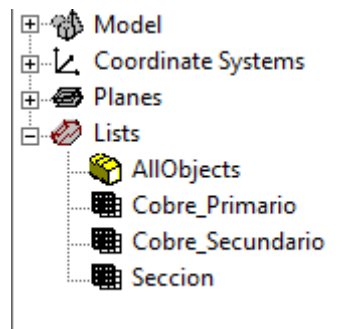


Figura 6.21. Listas de Ansys

7 Resultados

Con el objetivo de comparar los resultados de los métodos analíticos con los resultados de las simulaciones en Ansys, se han tomado una matriz de simulaciones para cada configuración del transformador, variando el número de espiras tanto horizontal como verticalmente y la frecuencia en un intervalo logarítmico entre 1Hz y 40kHz.

Además:

- Como se ha dicho anteriormente, la relación de transformación es 1.
- La conductividad del cobre tomada es de 58000000 S/m.
- La intensidad eficaz es de 31,11A.
- La permeabilidad relativa del núcleo es de 1000.

7.1 Fr simulación vs método de Dowell

Los resultados se exponen en función del factor de penetración corregido Δ' , pudiéndose comparar las curvas obtenidas por el método analítico con las curvas obtenidas en la simulación.

En el caso analítico, se han obtenido distintas curvas en función del número de capas del devanado, variando la porosidad y la frecuencia (modelo 1D). El número de capas se corresponde con el número de filas en las configuraciones tipo Split, y con el número de columnas en las configuraciones tipo Concentric.

Es por ello que las curvas adquieren la denominación de “DOWELL (Nº DE CAPAS)X–“ en las configuraciones Split y “DOWELL -X(Nº DE CAPAS) “ en las configuraciones tipo Concentric, ya que el número de columnas (en configuración Split) y el número de filas (en configuración Concentric) varían a lo largo de la curva.

En cuanto a los resultados obtenidos mediante las simulación, las denominaciones de las curvas se corresponden con “SIM (Nº DE FILAS)X(Nº DE COLUMNAS)”.

Cada curva obtenida mediante simulación se compara con la curva analítica con el mismo número de capas.

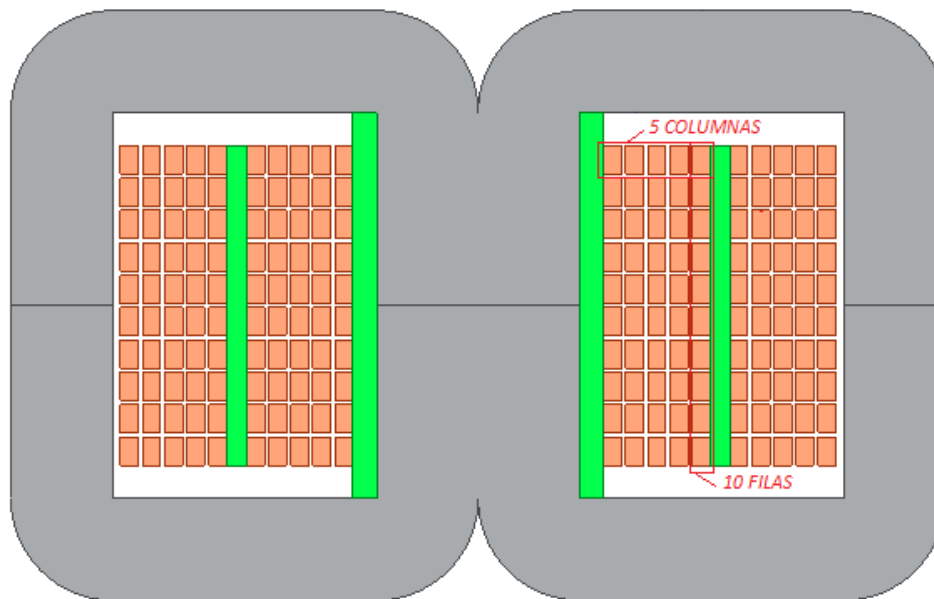


Figura 7.1. Configuración Shell+Concentric_1 10X5 (“SIM 10X5”)

7.1.1 Split_1

A continuación, se representan los resultados para un transformador de devanados tipo Split y una sección magnética, con 1, 3 y 6 capas, para 1, 3, 6, 9 y 12 espiras por capa.

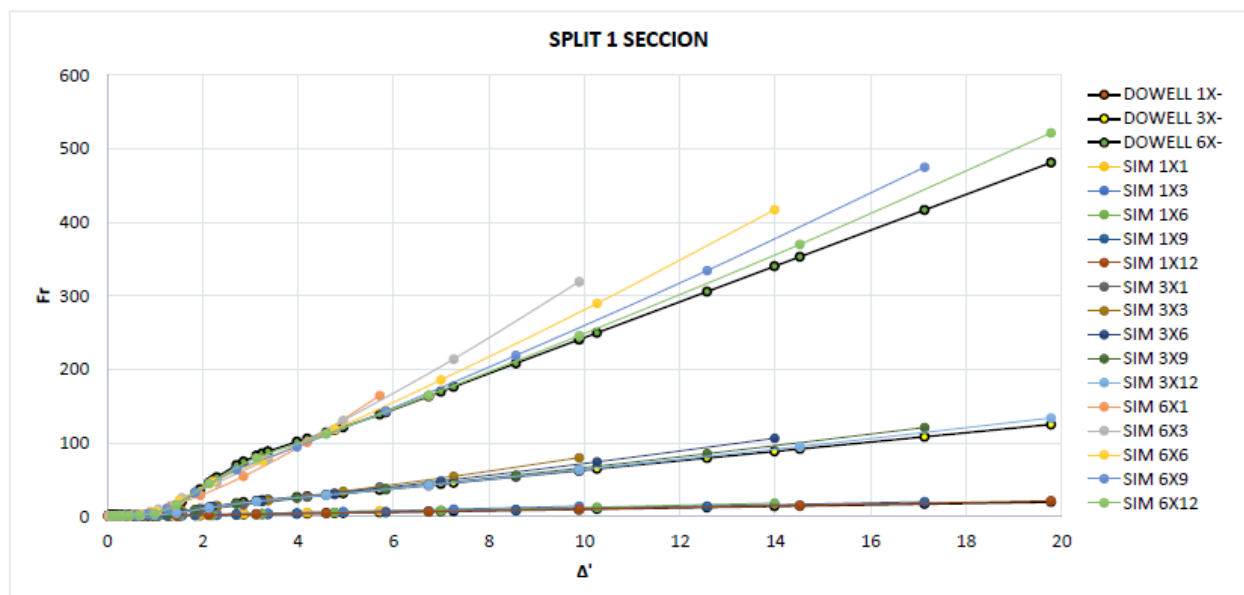


Figura 7.2. Fr simulación vs método de Dowell (Split_1)

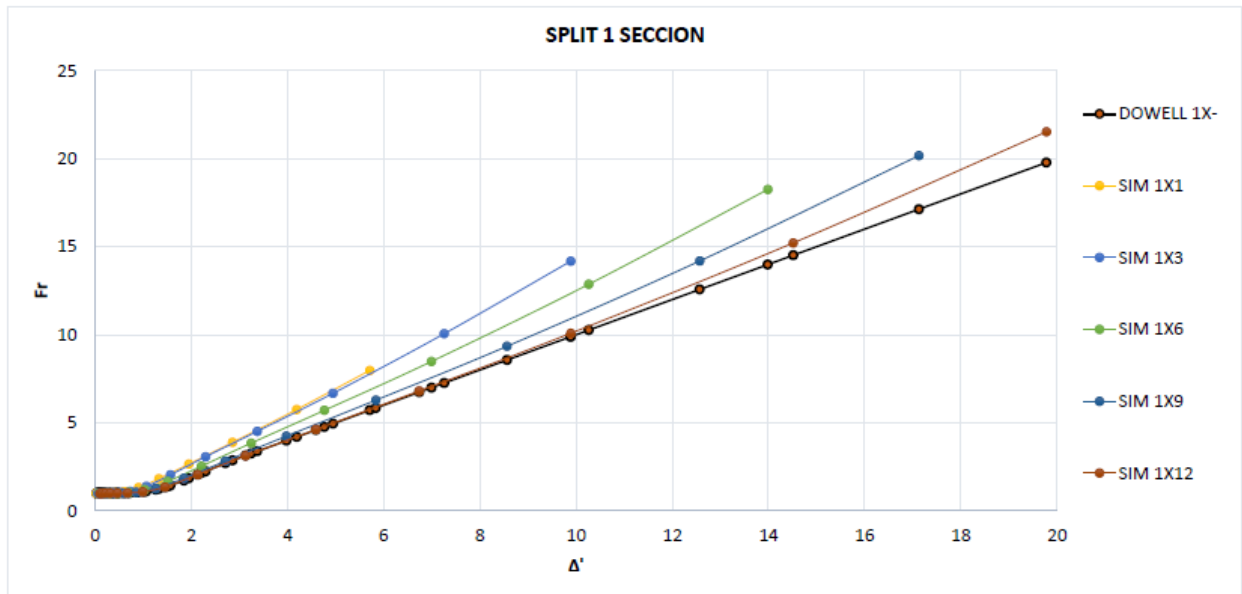


Figura 7.3. Fr simulación vs método de Dowell (Split_1 1X-)

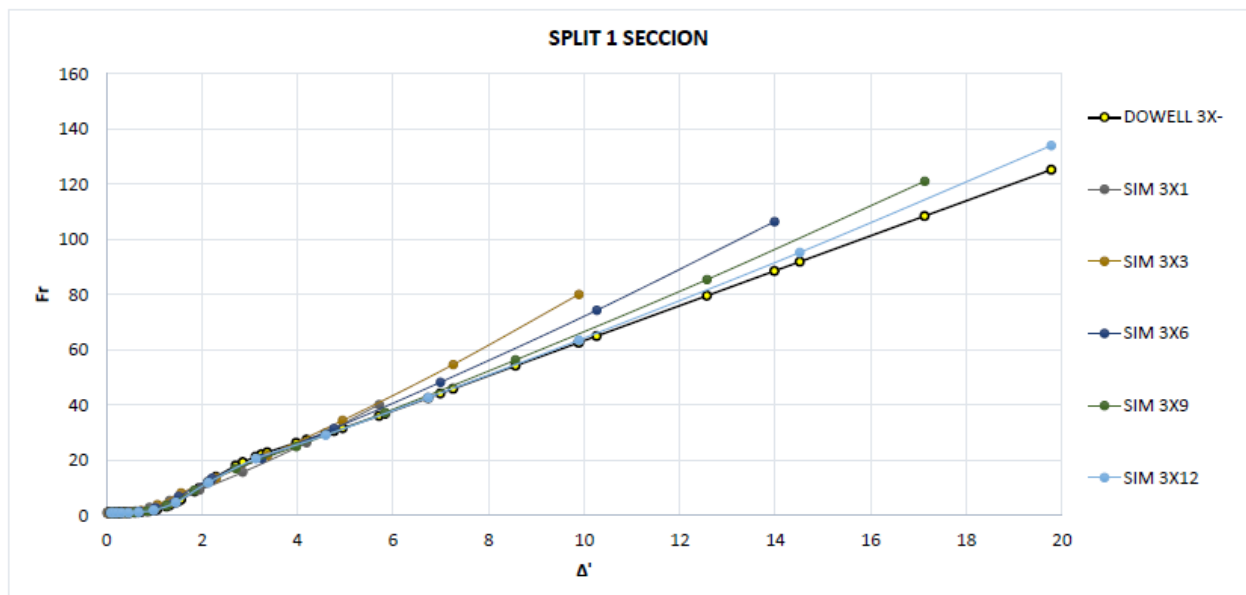


Figura 7.4. Fr simulación vs método de Dowell (Split_1 3X-)

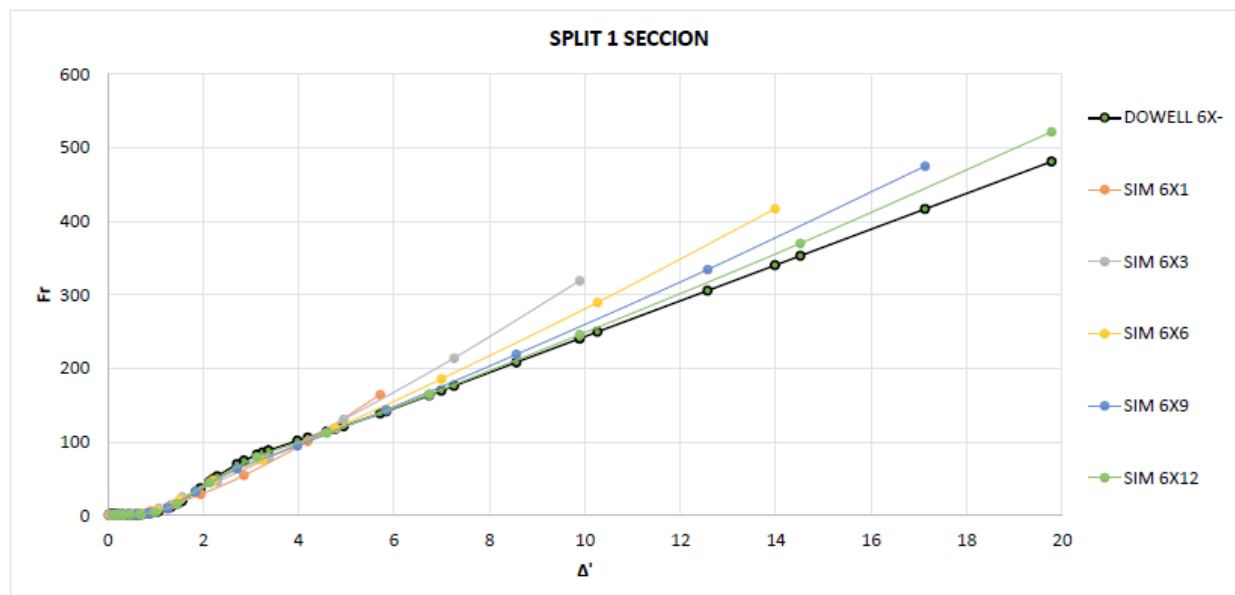


Figura 7.5. Fr simulación vs método de Dowell (Split_1 6X-)

Como se puede observar, los resultados son bastante precisos, con errores relativos en un rango del 40 al 5% aproximadamente conforme aumenta el factor de llenado de ventana.

7.1.2 Split_2

A continuación, se representan los resultados para un transformador de devanados tipo Split y dos secciones magnéticas, con 2, 4 y 6 capas, para 4, 8 y 12 espiras por capa.

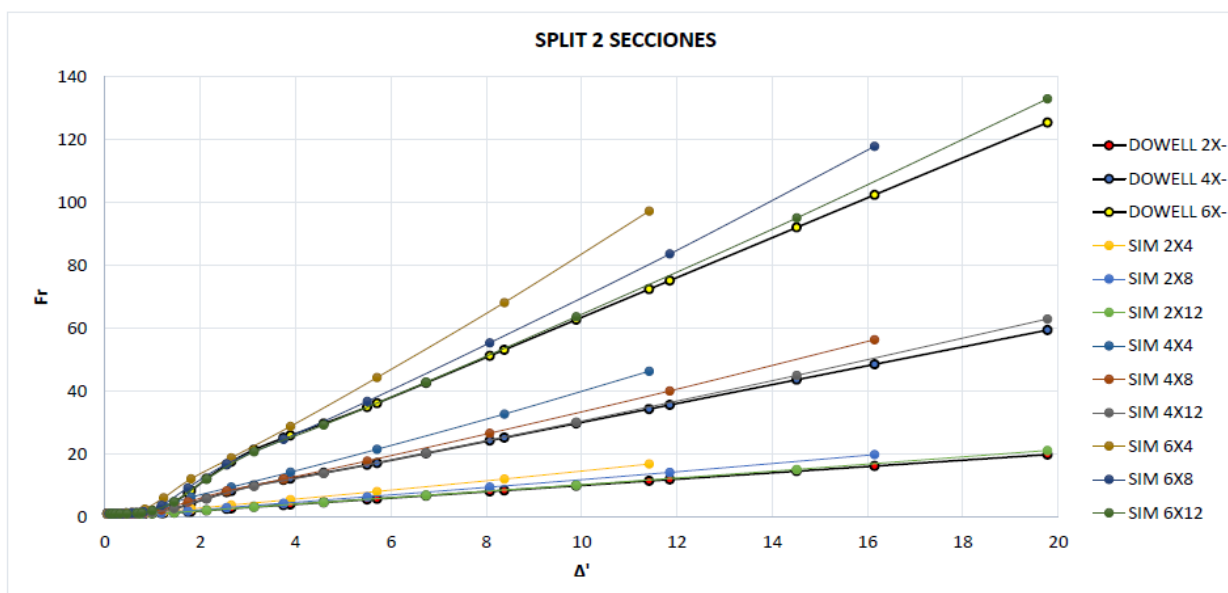


Figura 7.6. Fr simulación vs método de Dowell (Split_2)

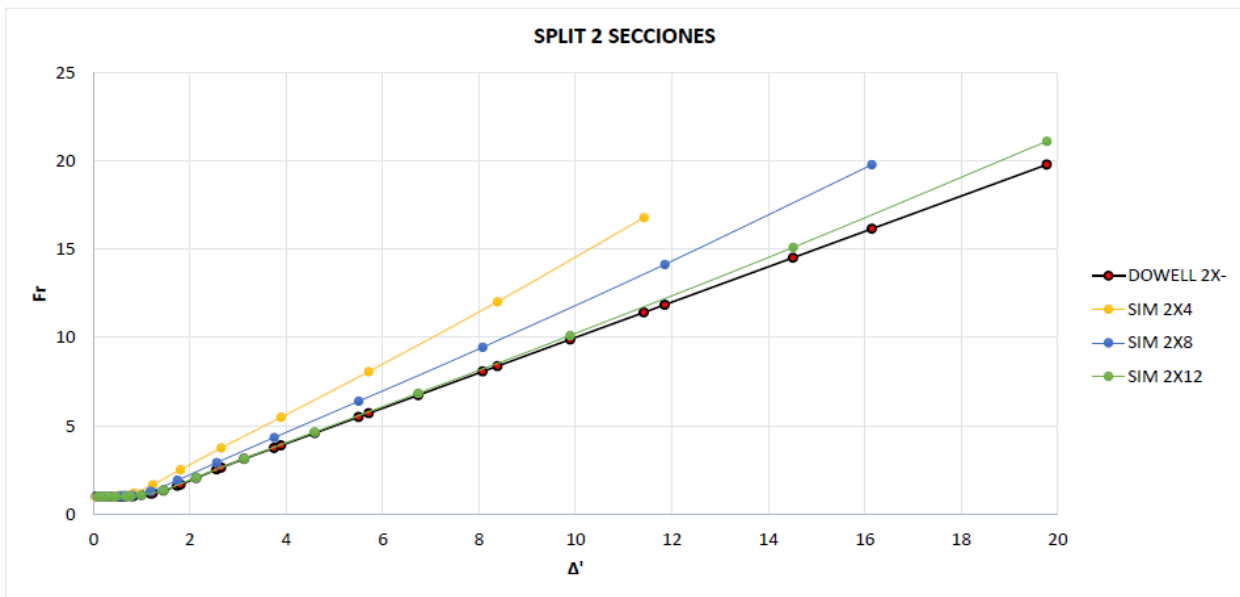


Figura 7.7. Fr simulación vs método de Dowell (Split_2 2X-)

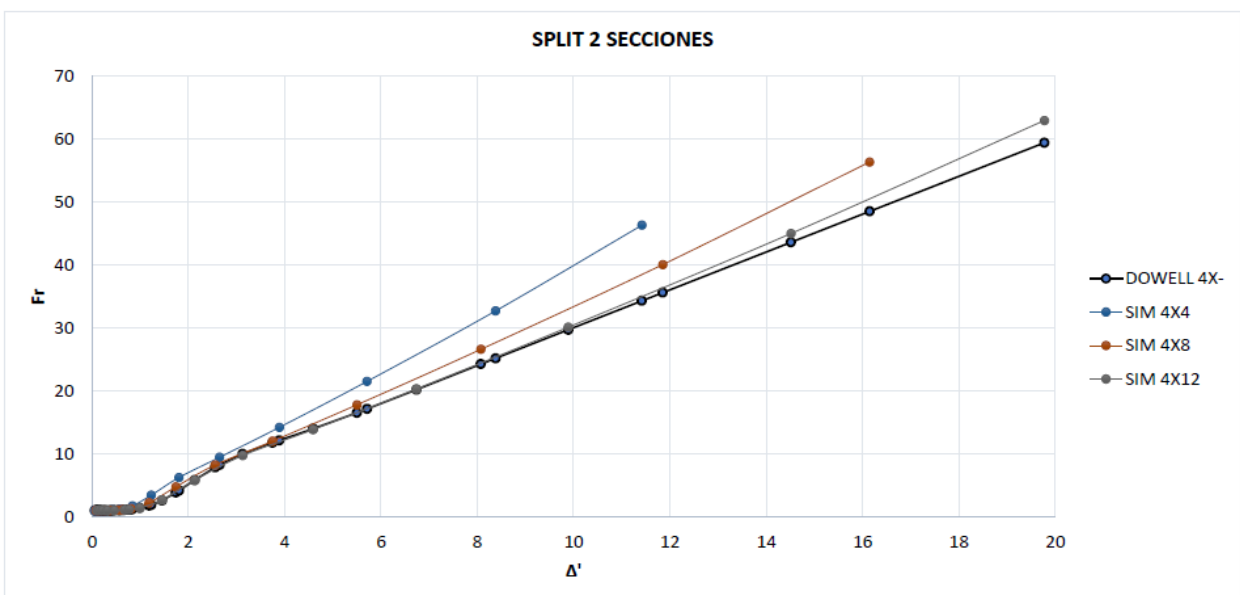


Figura 7.8. Fr simulación vs método de Dowell (Split_2 4X-)

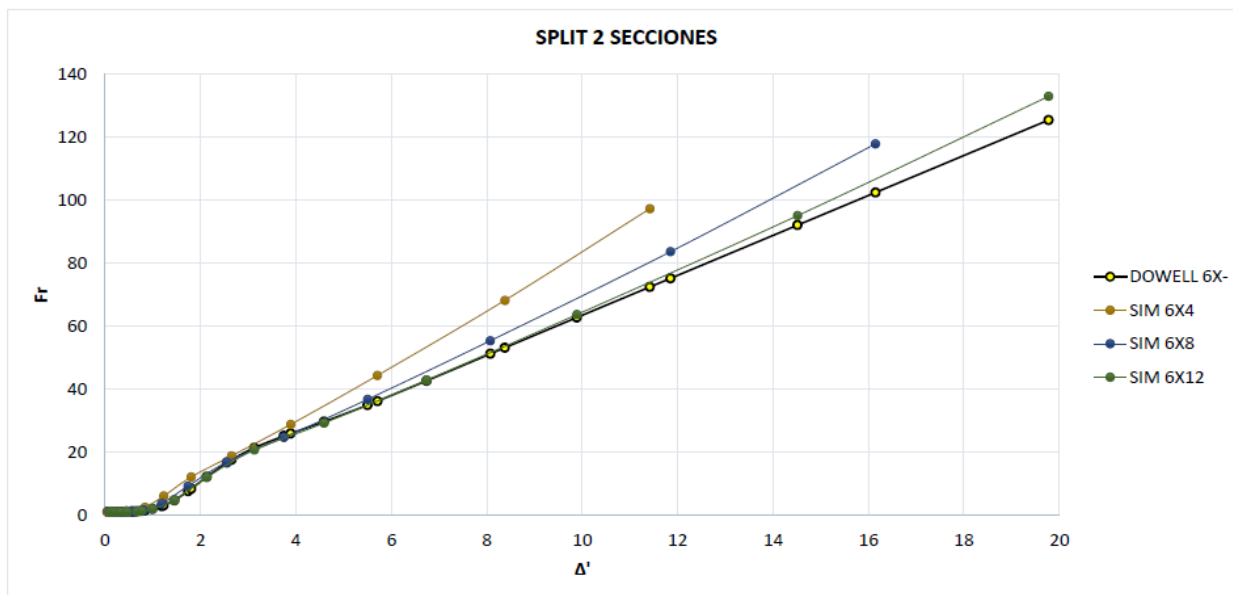


Figura 7.9. Fr simulación vs método de Dowell (Split_2 6X-)

Como se puede observar, los resultados son bastante precisos, con errores relativos algo mayores respecto a la configuración anterior, en un rango del 45 al 8% aproximadamente conforme aumenta el factor de llenado de ventana.

7.1.3 Concentric_1

A continuación, se representan los resultados para un transformador de devanados tipo Concentric y una sección magnética, con 1, 3 y 5 capas, para 1, 5, 9 y 13 espiras por capa.

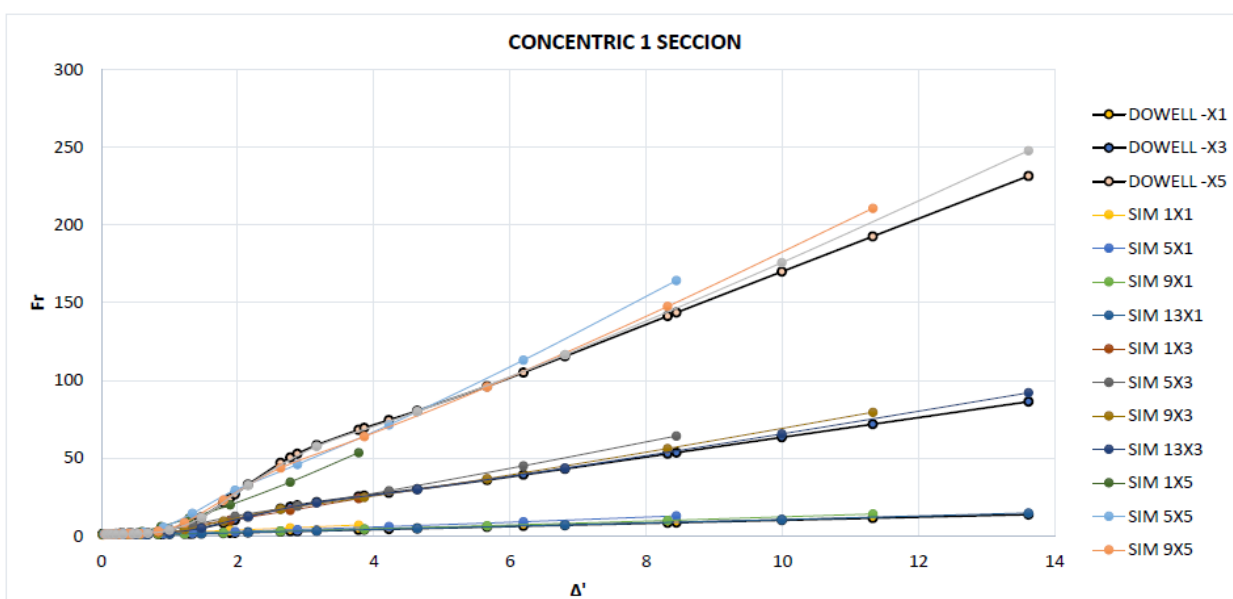


Figura 7.10. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric_1)

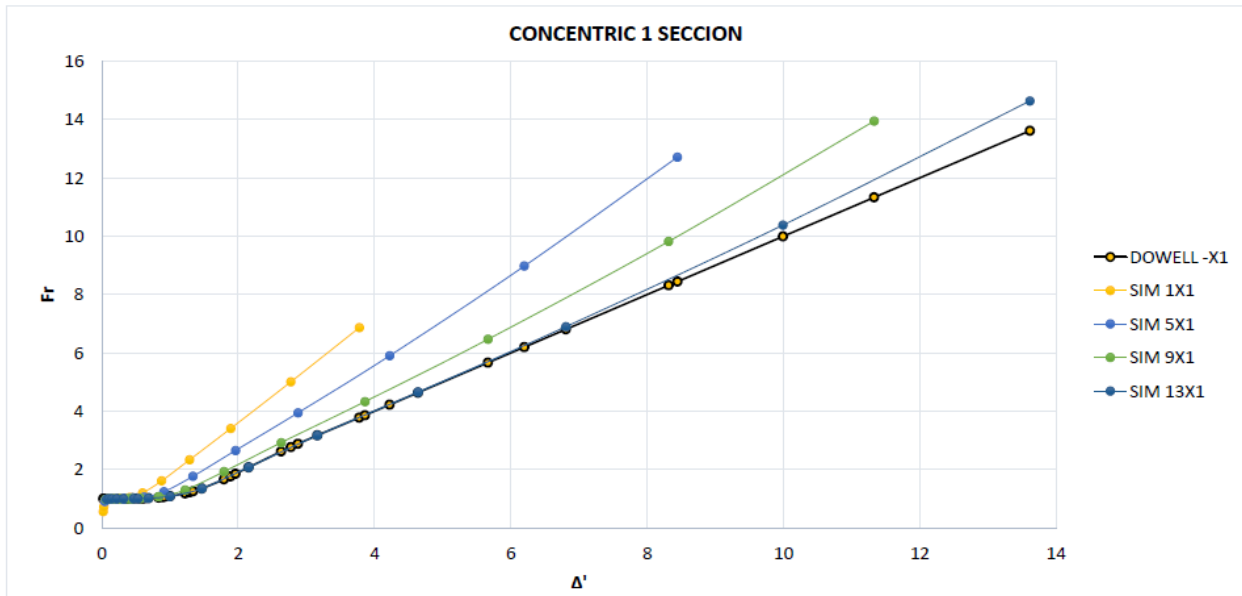


Figura 7.11. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric _1 -X1)

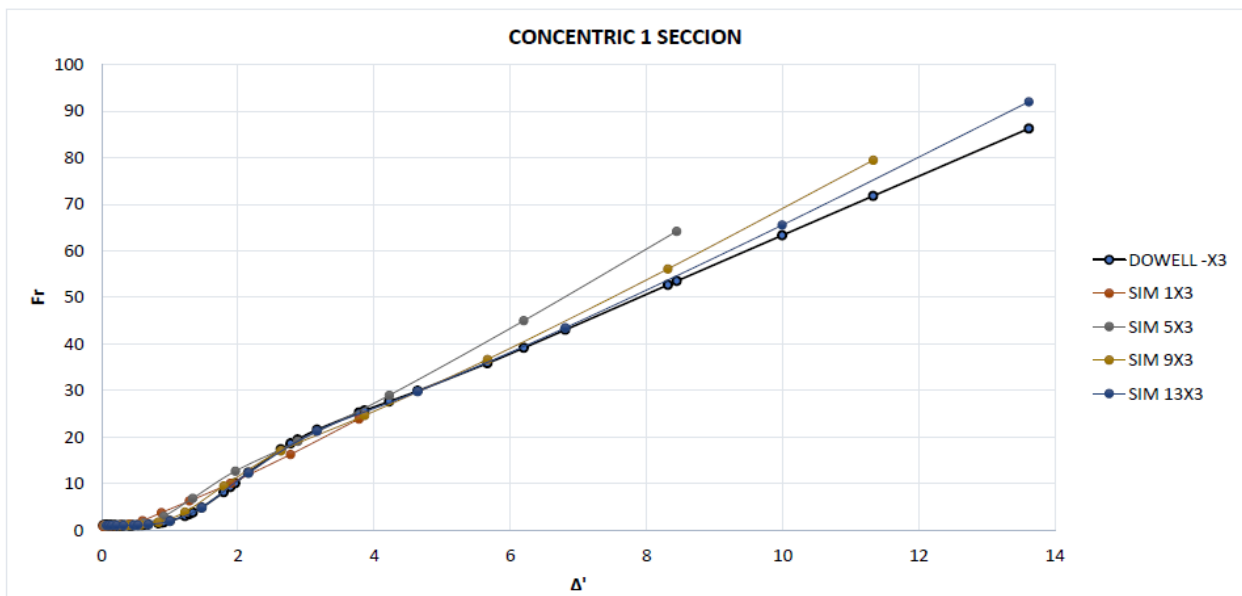


Figura 7.12. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric _1 -X3)

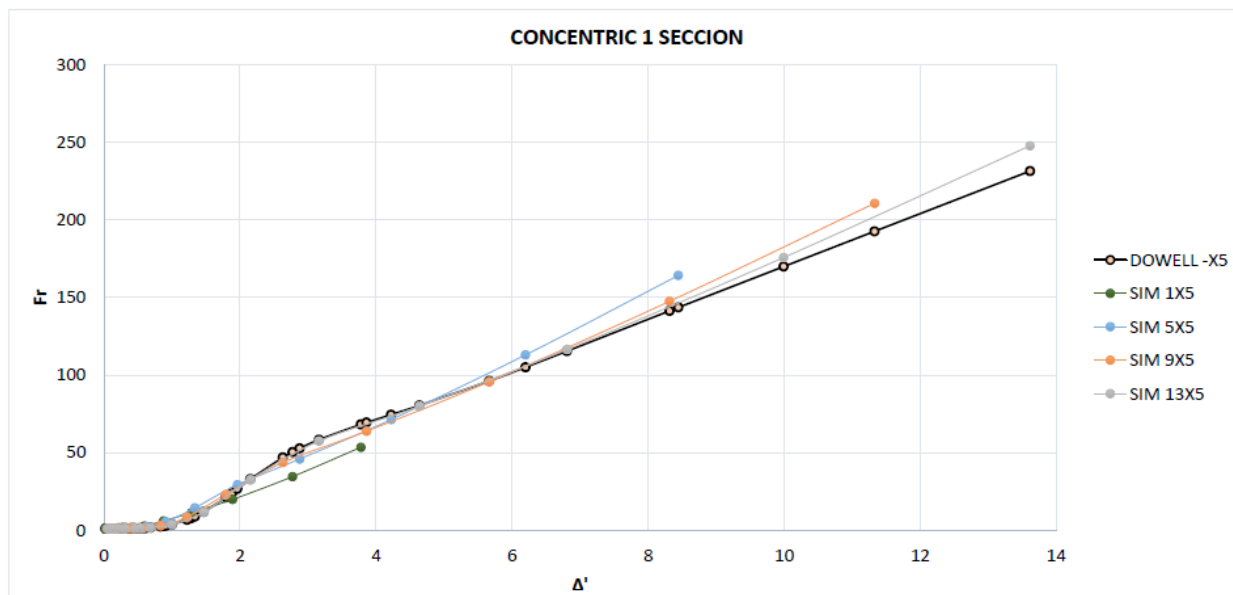


Figura 7.13. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric _1 -X5)

Como se puede observar, los resultados son bastante precisos, con errores relativos algo mayores respecto a la configuración Split, en un rango del 70 al 9% aproximadamente conforme aumenta el factor de llenado de ventana.

7.1.4 Concentric_2

A continuación, se representan los resultados para un transformador de devanados tipo Concentric y dos secciones magnéticas, con 2 y 4 capas, para 4, 8, 12 y 13 espiras por capa.

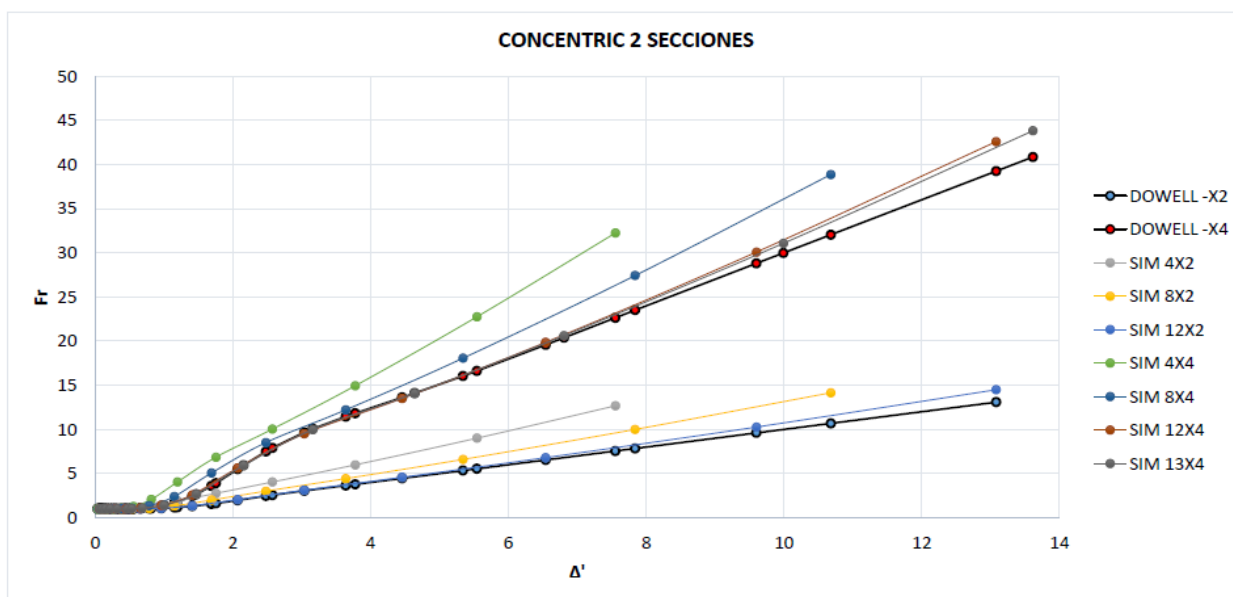


Figura 7.14. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric _2)

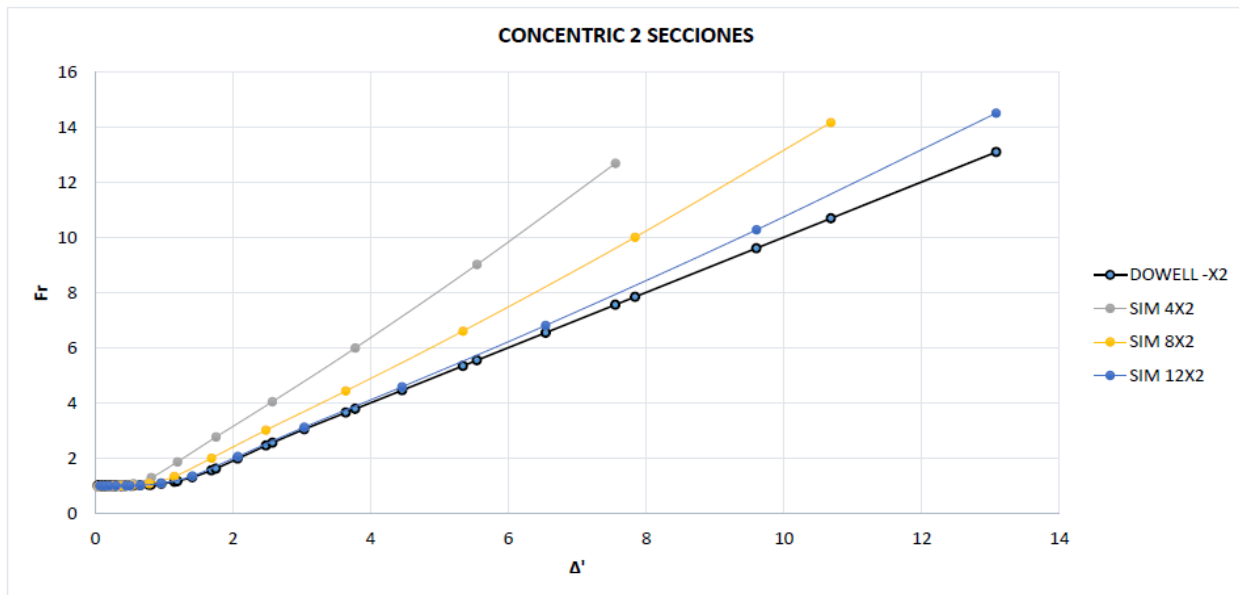


Figura 7.15. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric _2 -X2)

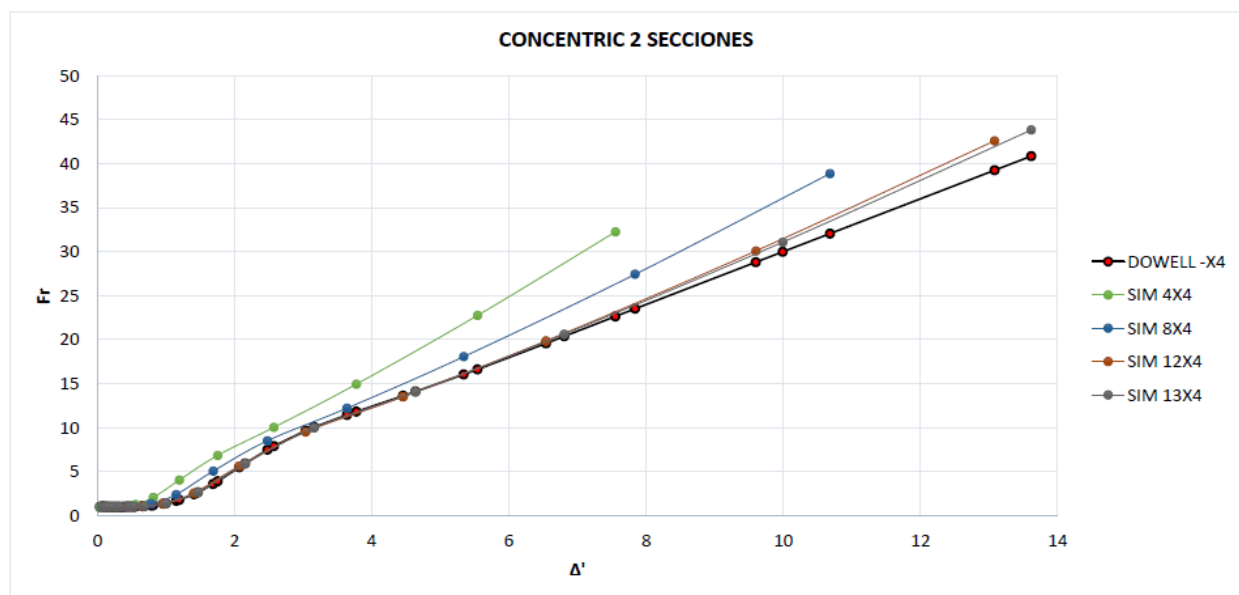


Figura 7.16. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric _2 -X4)

Como se puede observar, los resultados son bastante precisos, con errores relativos algo menores respecto a la configuración anterior, en un rango del 66 al 7% aproximadamente conforme aumenta el factor de llenado de ventana.

7.1.5 Conclusiones

En estas gráficas se aprecia bastante bien cómo el método analítico es más preciso cuanto más se acerca el devanado al punto de partida inicial del mismo, es decir, se pierde precisión cuando el factor de

porosidad disminuye, pasando de errores de entre un 5 y un 9% para factores de porosidad altos (mayores de 0,8) a errores de entre un 40 y un 70% para factores de porosidad bajos (menores de 0,2).

Para un devanado tipo Concentric el error es mayor (7-70%) en comparación con un devanado tipo Split (5-45%).

En definitiva, se trata de un método con el que se consiguen resultados bastante precisos, siempre y cuando el factor de llenado no sea bajo.

7.2 Fr simulación vs método de Ferreira

Los resultados se exponen en función del factor de γ , pudiéndose comparar las curvas obtenidas por el método analítico con las curvas obtenidas en la simulación.

En el caso analítico, se han obtenido distintas curvas en función del número de capas del devanado, variando la frecuencia. El número de capas se corresponde con el número de filas en las configuraciones tipo Split, y con el número de columnas en las configuraciones tipo Concentric.

Es por ello que las curvas adquieren la denominación de “FERREIRA (Nº DE CAPAS)X–“ en las configuraciones Split y “FERREIRA -X(Nº DE CAPAS) “ en las configuraciones tipo Concentric, ya que el número de columnas (en configuración Split) y el número de filas (en configuración Concentric) varían a lo largo de la curva.

En cuanto a los resultados obtenidos mediante la simulación, las denominaciones de las curvas se corresponden con “SIM (Nº DE FILAS)X(Nº DE COLUMNAS)”.

Cada curva obtenida mediante simulación se compara con la curva analítica con el mismo número de capas.

7.2.1 Split_1

A continuación, se representan los resultados para un transformador de devanados tipo Split y una sección magnética, con 1, 3 y 6 capas, para 1, 3, 6, 9 y 12 espiras por capa.

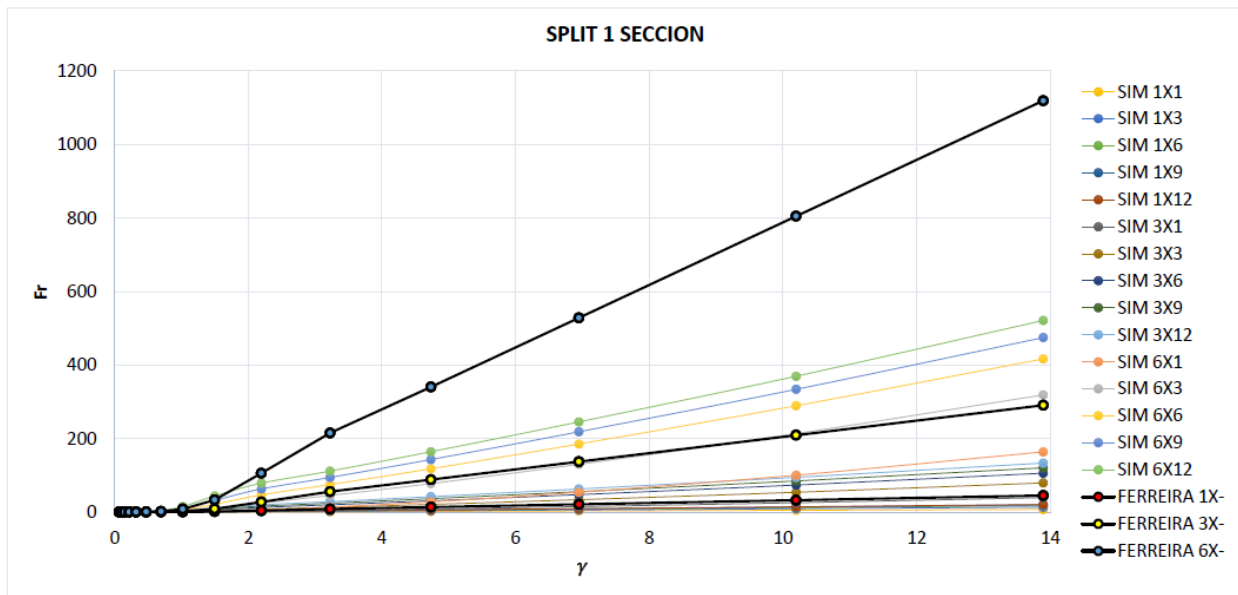


Figura 7.17. Fr simulación vs método de Dowell (Split_1)

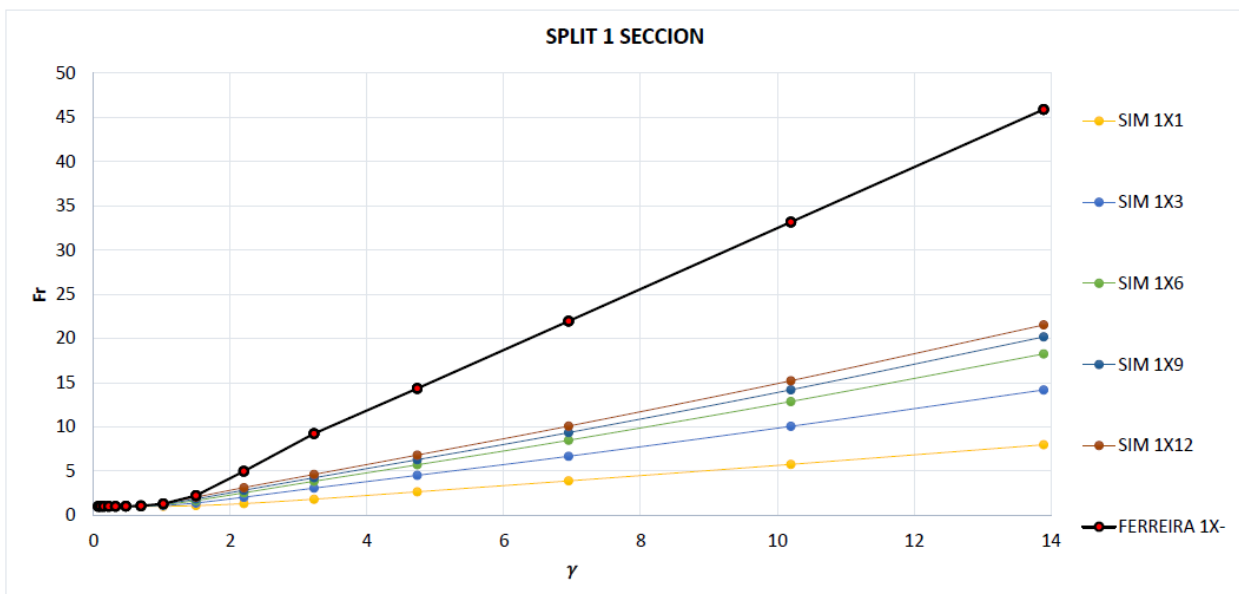


Figura 7.18. Fr simulación vs método de Dowell (Split_1 1X-)

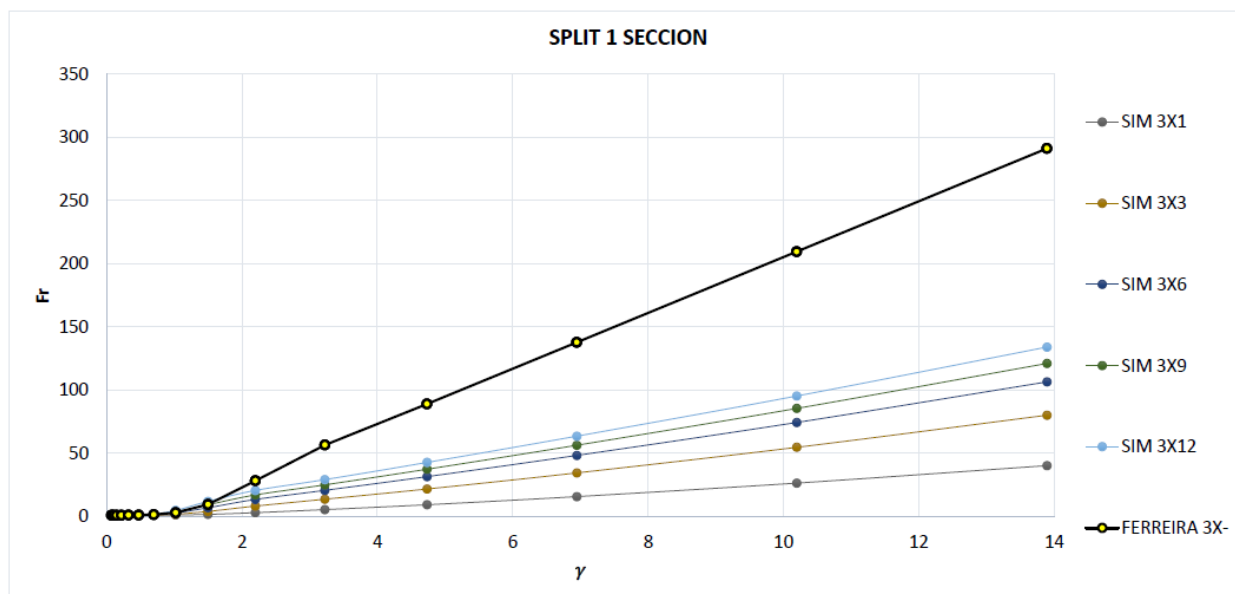


Figura 7.19. Fr simulación vs método de Dowell (Split_1 3X-)

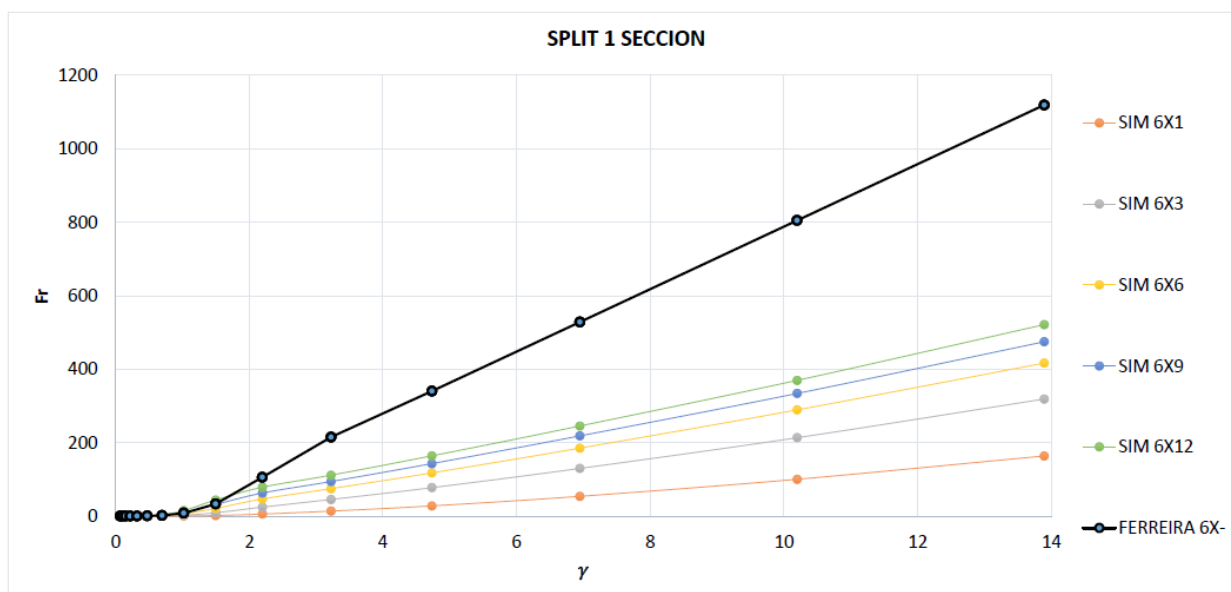


Figura 7.20. Fr simulación vs método de Dowell (Split_1 6X-)

Como se puede observar, los resultados son bastante imprecisos, con errores relativos en un rango del 450 al 100% aproximadamente conforme aumenta el factor de llenado de ventana.

7.2.2 Split_2

A continuación, se representan los resultados para un transformador de devanados tipo Split y dos secciones magnéticas, con 2, 4 y 6 capas, para 4, 8 y 12 espiras por capa.

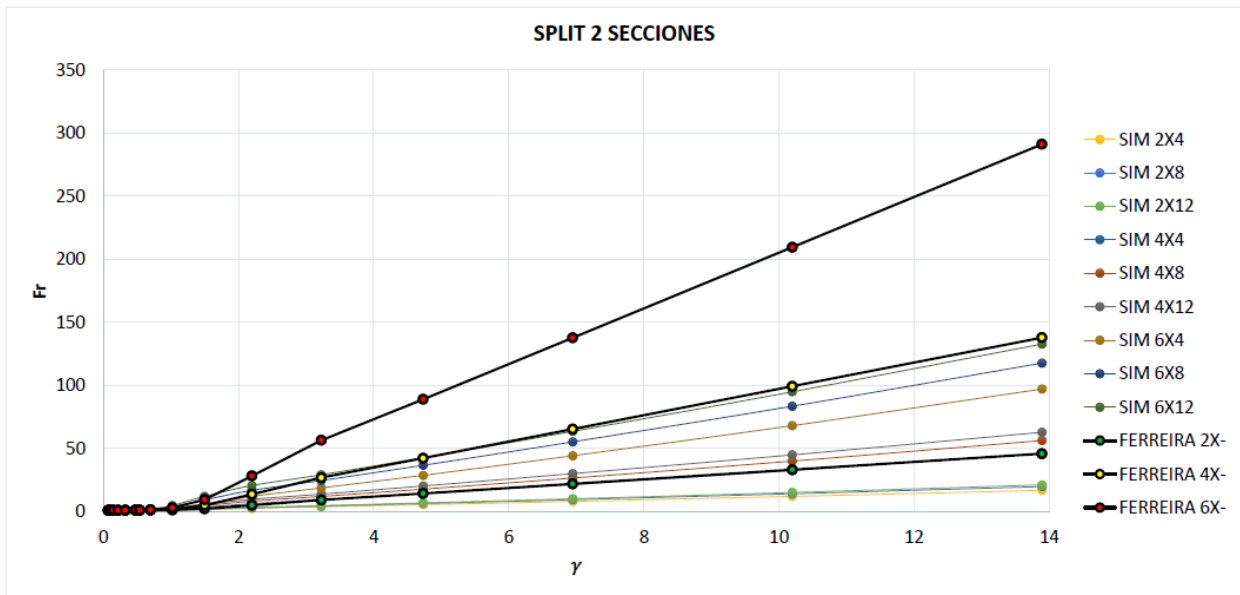


Figura 7.21. Fr simulación vs método de Dowell (Split_2)

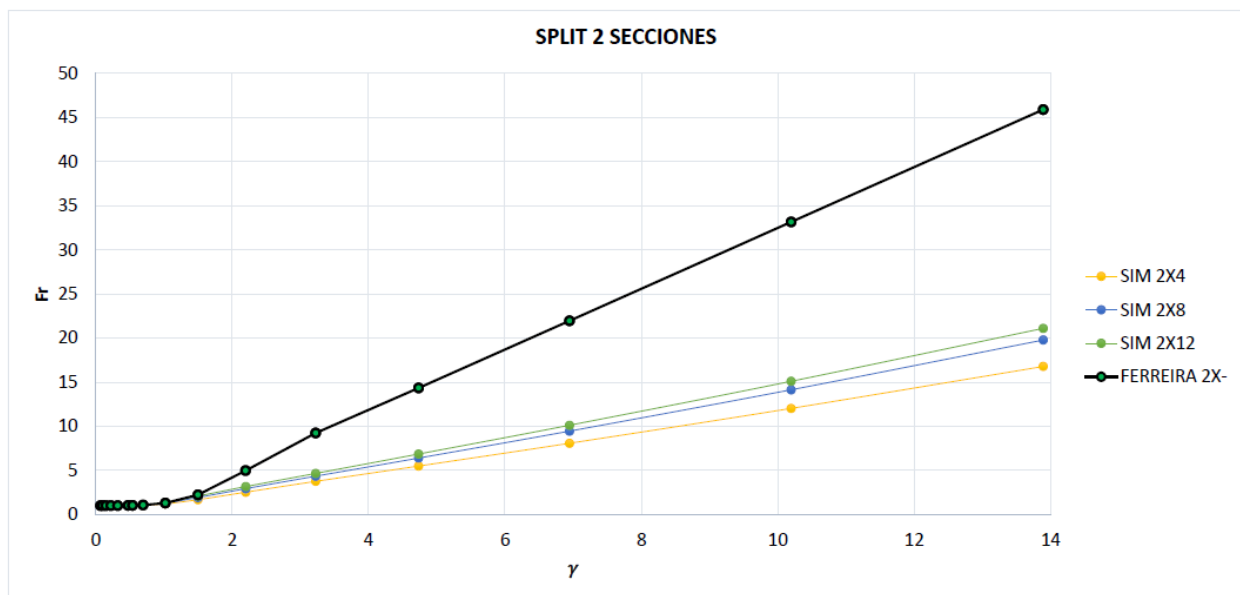


Figura 7.22. Fr simulación vs método de Dowell (Split_2 2X-)

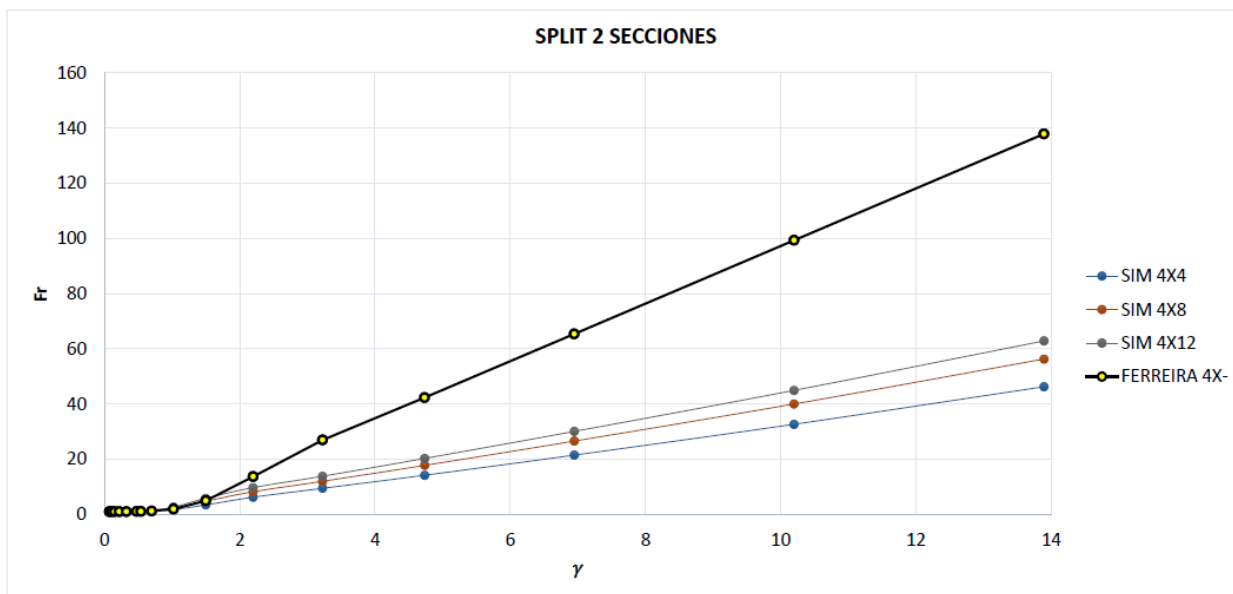


Figura 7.23. Fr simulación vs método de Dowell (Split_2 4X-)

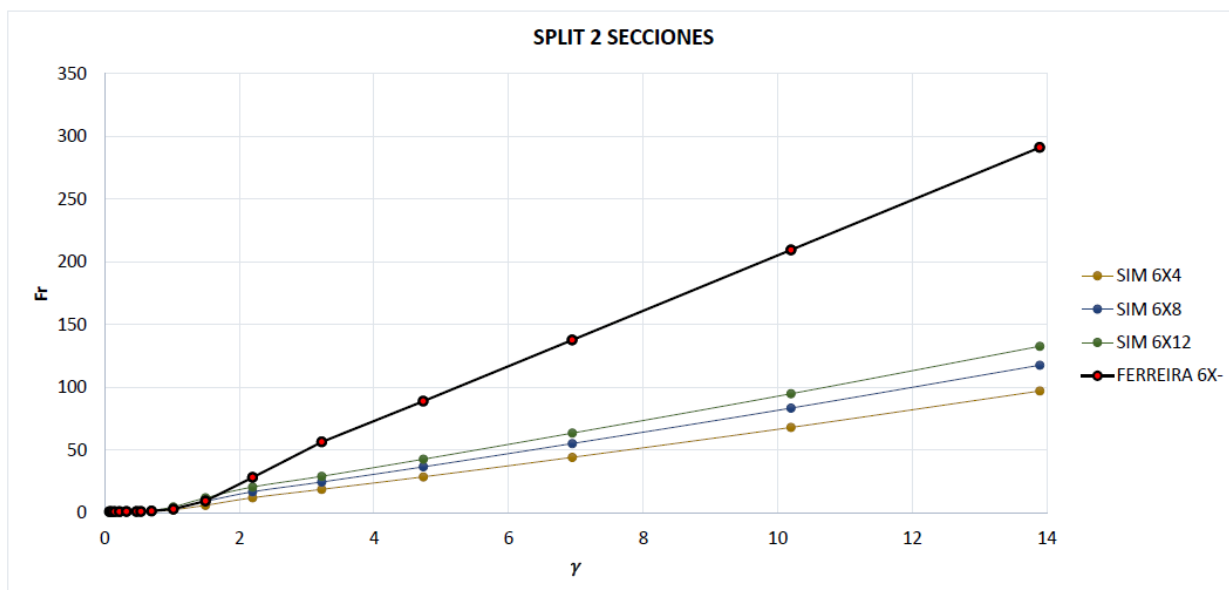


Figura 7.24. Fr simulación vs método de Dowell (Split_2 6X-)

Como se puede observar, los resultados son bastante imprecisos, con errores relativos algo menores respecto a la configuración anterior, en un rango del 200 al 107% aproximadamente conforme aumenta el factor de llenado de ventana.

7.2.3 Concentric_1

A continuación, se representan los resultados para un transformador de devanados tipo Concentric y una sección magnética, con 1, 3 y 5 capas, para 1, 5, 9 y 13 espiras por capa.

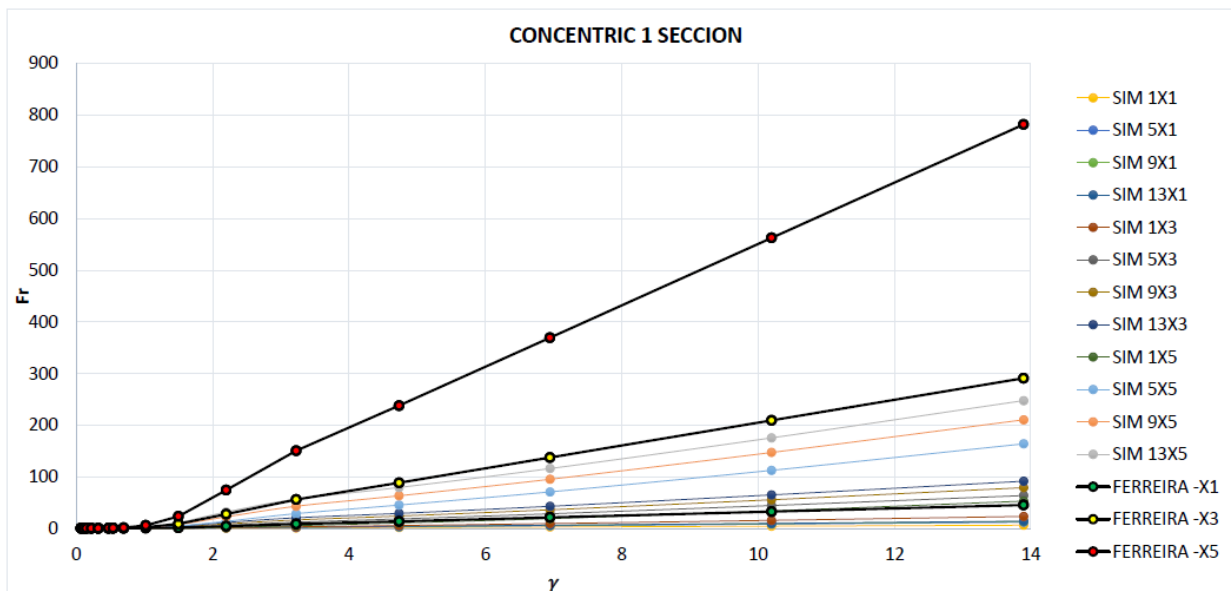


Figura 7.25. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric_1)

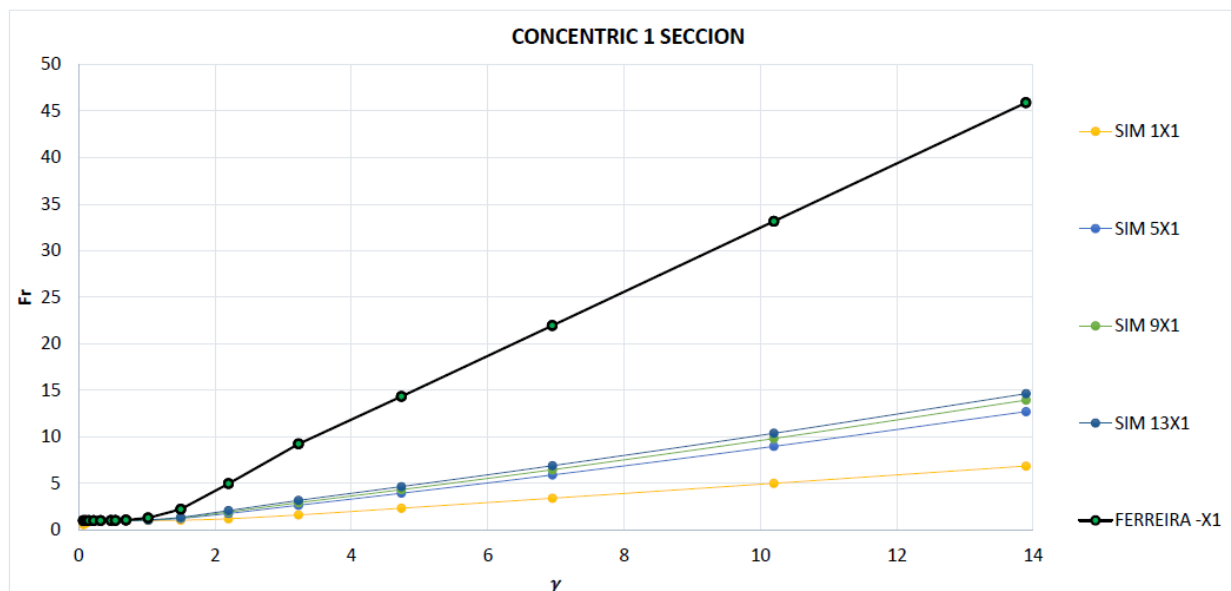


Figura 7.26. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric_1 -X1)

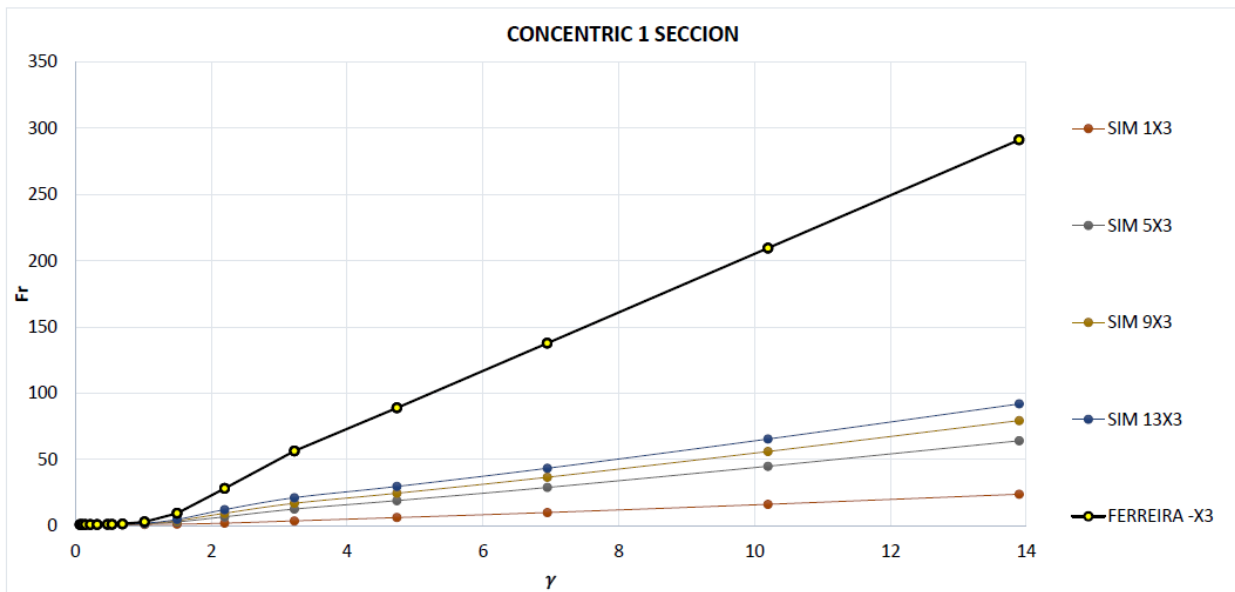


Figura 7.27. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric _1 -X3)

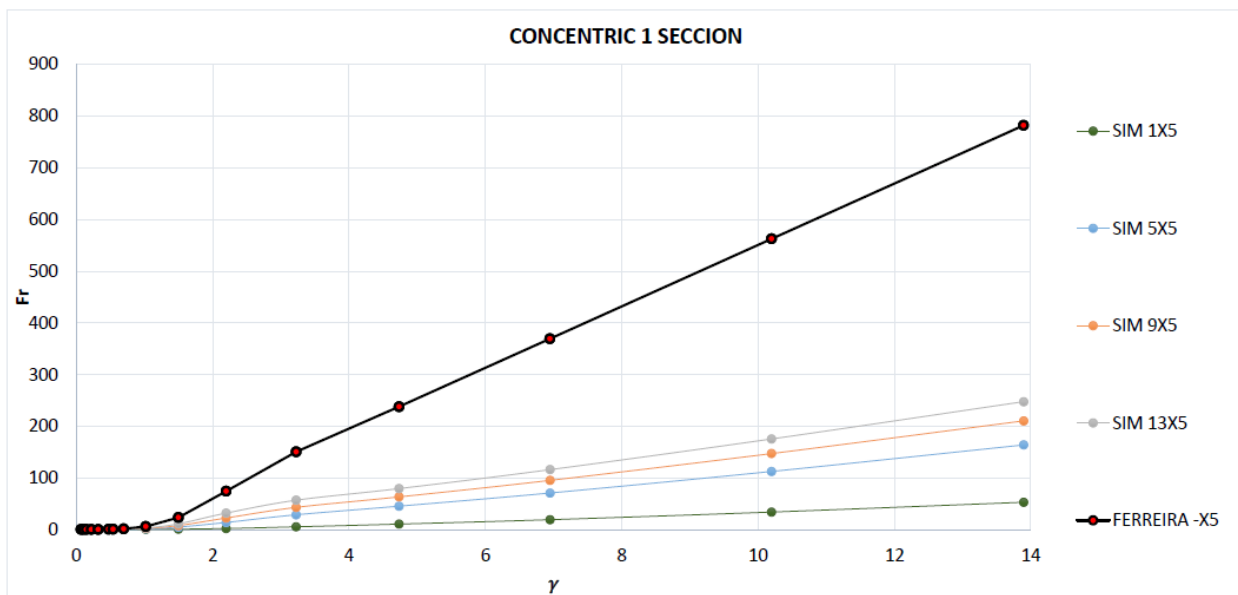


Figura 7.28. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric _1 -X5)

Como se puede observar, los resultados son bastante imprecisos, con errores relativos algo mayores respecto a la configuración Split, en un rango del 540 al 215% aproximadamente conforme aumenta el factor de llenado de ventana.

7.2.4 Concentric_2

A continuación, se representan los resultados un transformador de devanados tipo Concentric y dos secciones magnéticas, con 2 y 4 capas, para 4, 8, 12 y 13 espiras por capa.

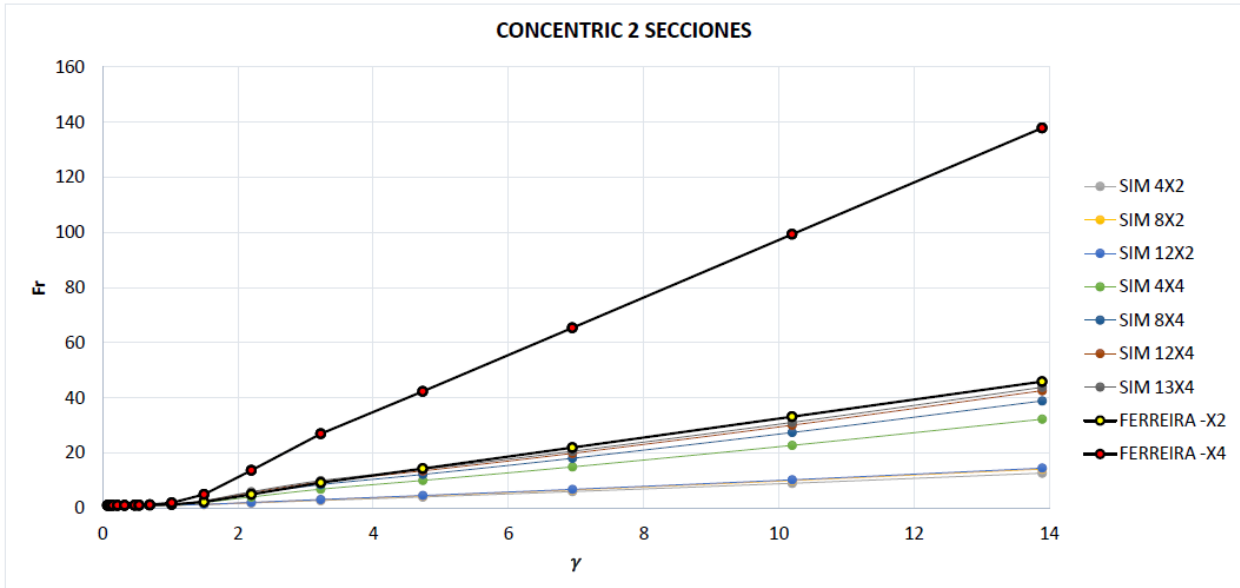


Figura 7.29. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric_2)

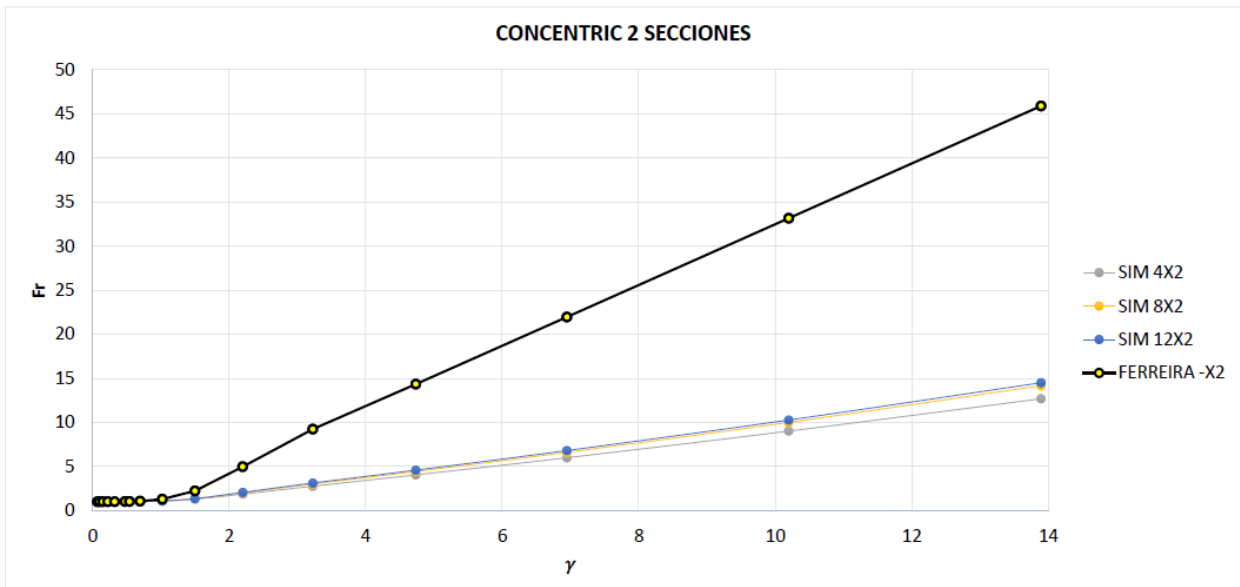


Figura 7.30. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric_2 -X2)

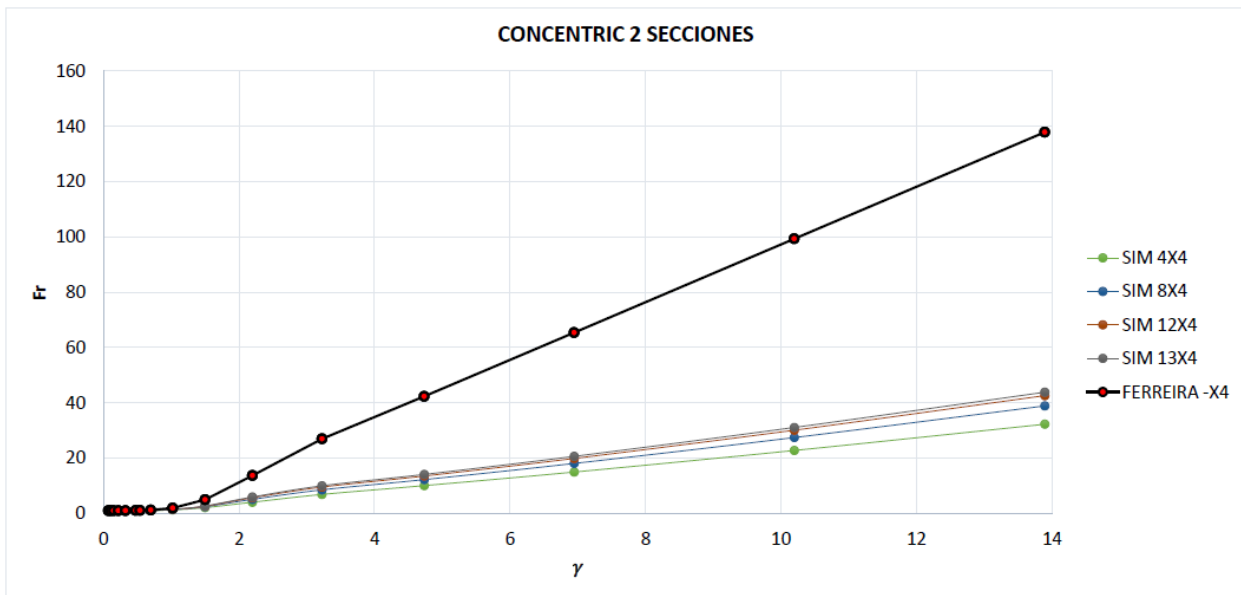


Figura 7.31. Fr simulación vs método de Dowell (Concentric _2 -X4)

Como se puede observar, los resultados son bastante imprecisos, con errores relativos algo menores respecto a la configuración anterior, en un rango del 250 al 190% aproximadamente conforme aumenta el factor de llenado de ventana.

7.2.5 Conclusiones

Este método ha resultado ser bastante impreciso, con errores del 200-540% al 100-215% aproximadamente según aumenta el factor de llenado.

Para un devanado tipo Concentric el error es mayor (215-540%) en comparación con un devanado tipo Split (100-450%).

En base a los resultados obtenidos, este método no se da por válido, al menos para devanados con sección rectangular.

7.3 Inductancia de magnetización

En este apartado se representan gráficamente los valores de inductancia de magnetización obtenidos tanto en simulación como analíticamente (solución del circuito magnético), tanto para la configuración Shell como para la configuración Core.

Las curvas obtenidas en simulación se nombran como "CORE/SHELL SIM", siendo las curvas obtenidas analíticamente "CORE/SHELL AM"

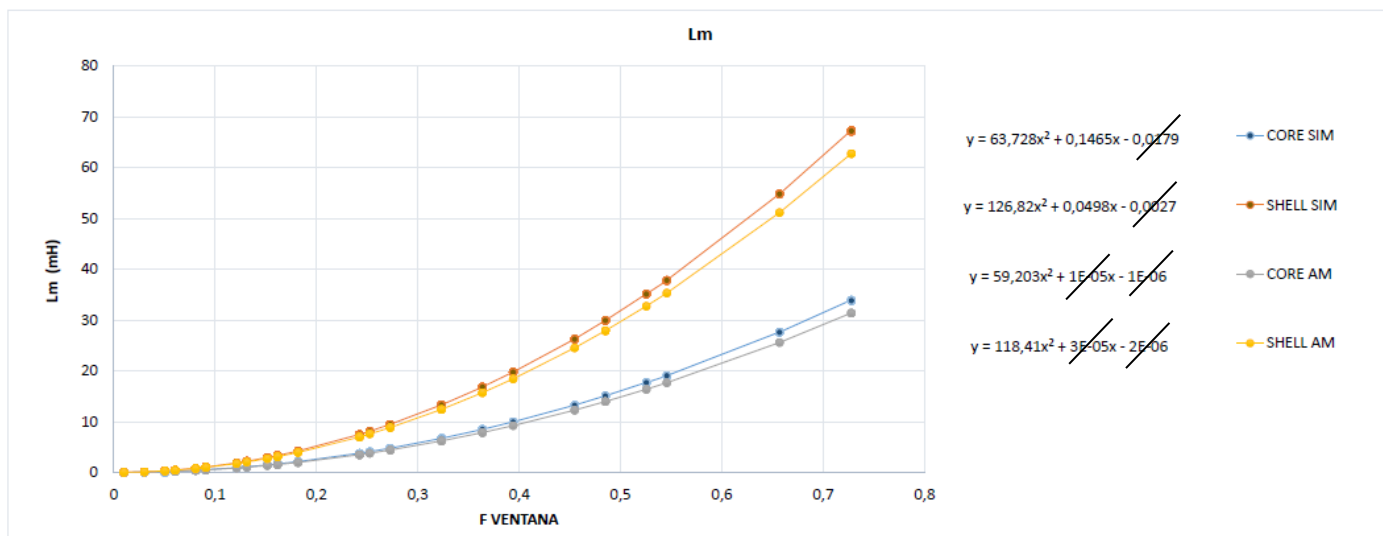


Figura 7.32. Inductancia de magnetización

Comparando los resultados de la simulación con los resultados analíticos, se puede decir que en las simulaciones se obtienen valores más altos, en torno a un 8-10% para la configuración Shell, y un 7-7,5% para la configuración Core, reduciéndose el error conforme el factor de llenado de ventana aumenta.

Como era de esperar, la inductancia de magnetización aumenta cuadráticamente con el factor de llenado de ventana. Como se puede observar en las funciones cuadráticas de tendencia, los términos independientes son despreciables, y los de primer orden se pueden despreciar para las curvas obtenidas analíticamente.

7.4 Inductancias de dispersión

A continuación, se representan gráficamente los valores de inductancia de dispersión obtenidos para las distintas configuraciones del transformador tanto en las simulaciones como analíticamente para 1Hz (curvas en negro) y 10 kHz (curvas en rojo), en función del factor de llenado de ventana.

Se ha definido una gráfica para cada configuración de Núcleo (Core o Shell), devanado (Core o Split, con una o dos secciones magnéticas) y número de capas, variando el factor de llenado.

Como en la gráfica anterior, las curvas obtenidas mediante simulación se denominan con el sufijo "SIM" (línea continua) y las obtenidas analíticamente con el sufijo "AM" (línea discontinua).

El modelo analítico ha sido elaborado por Juan Álvaro Fuentes Moreno, director de este proyecto, perteneciente al Departamento de Automática, Ingeniería Eléctrica y Tecnología Eléctrica de la Universidad Politécnica de Cartagena.



7.4.1 Core+Split_1

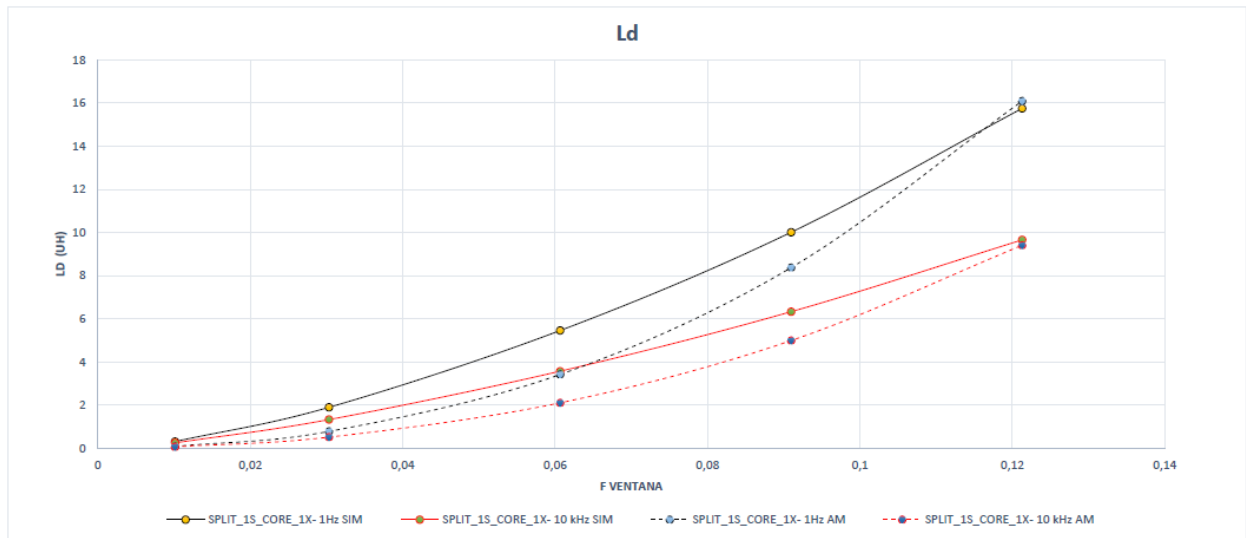


Figura 7.33. Inductancia de dispersión Core+Split_1 1x-

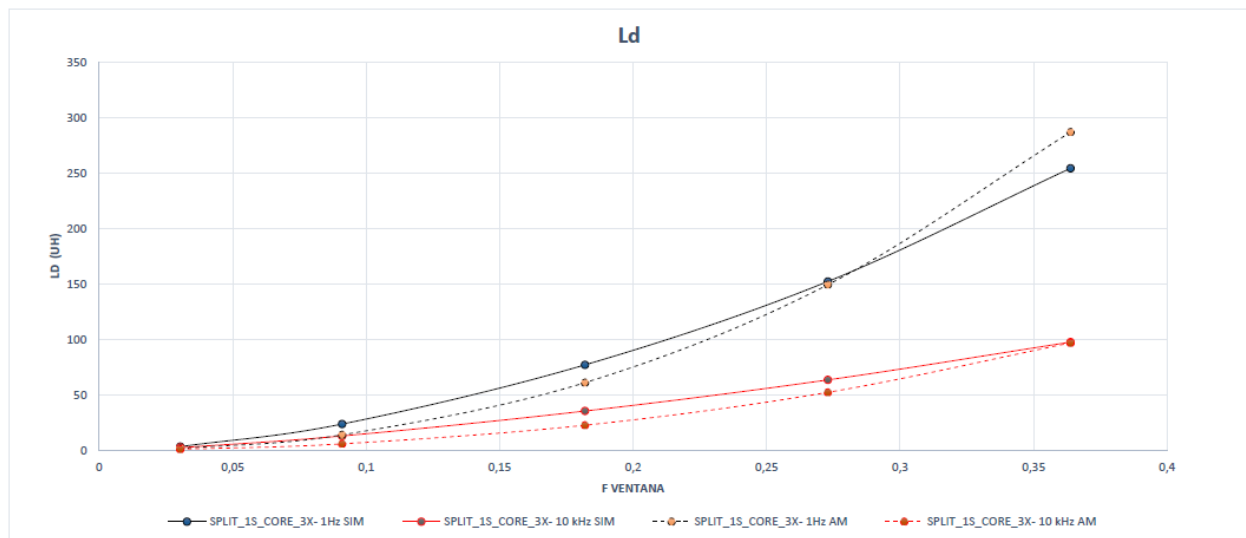


Figura 7.34. Inductancia de dispersión Core+Split_1 3x-

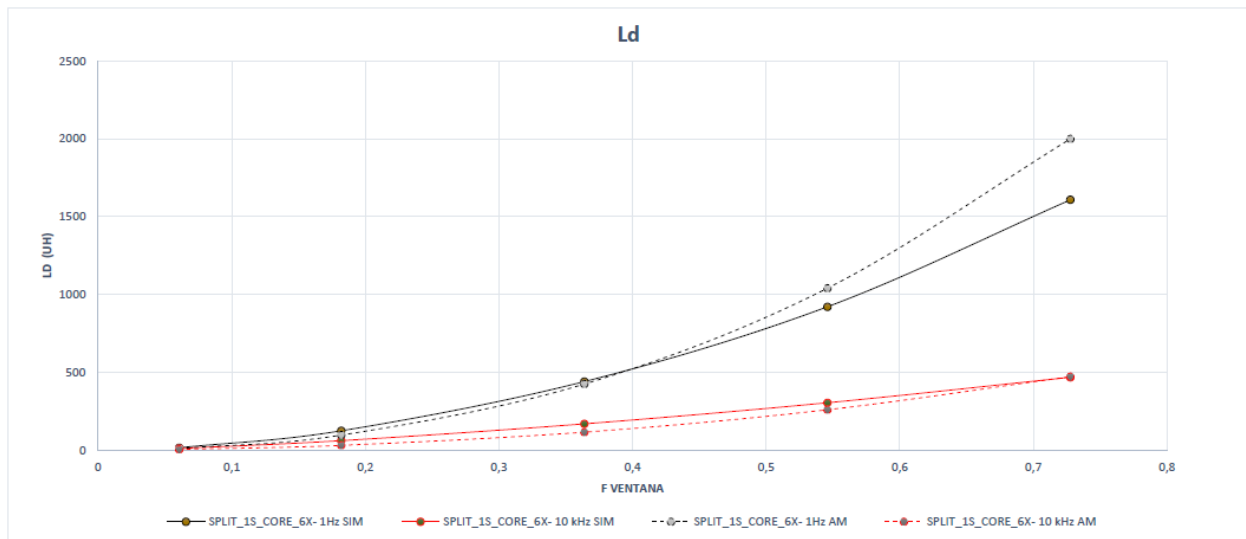


Figura 7.35. Inductancia de dispersión Core+Split_1 5x-

Como se puede observar, conforme aumenta el número de capas el error relativo disminuye debido a la reducción de la concavidad de las curvas analíticas. Se puede hablar de errores relativos máximos del 70% aproximadamente.

7.4.2 Shell+Split_1

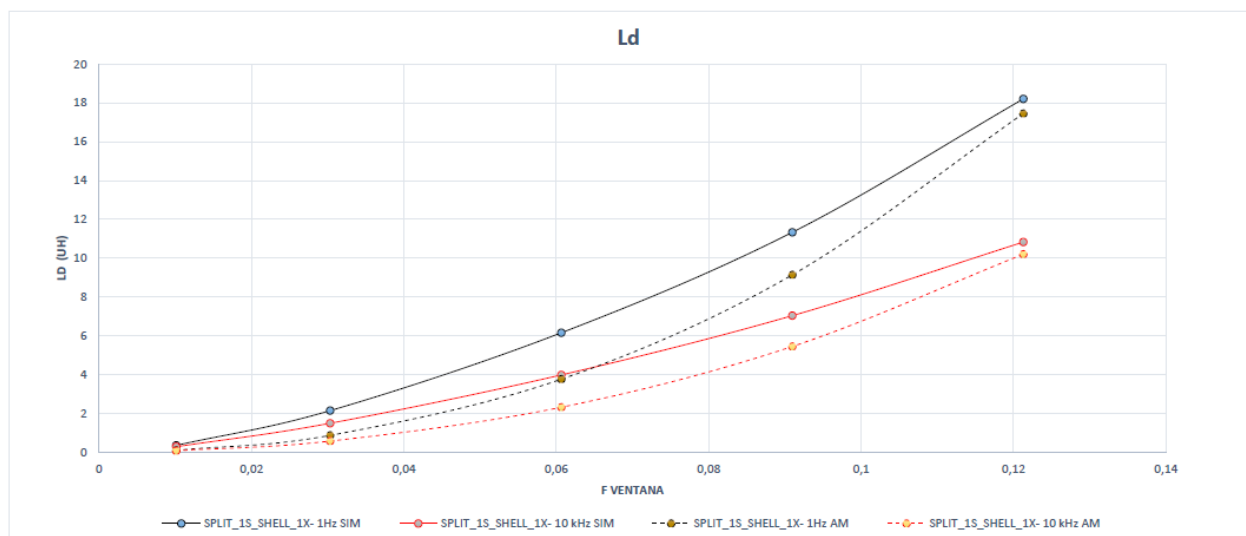


Figura 7.36. Inductancia de dispersión Shell+Split_1 1x-

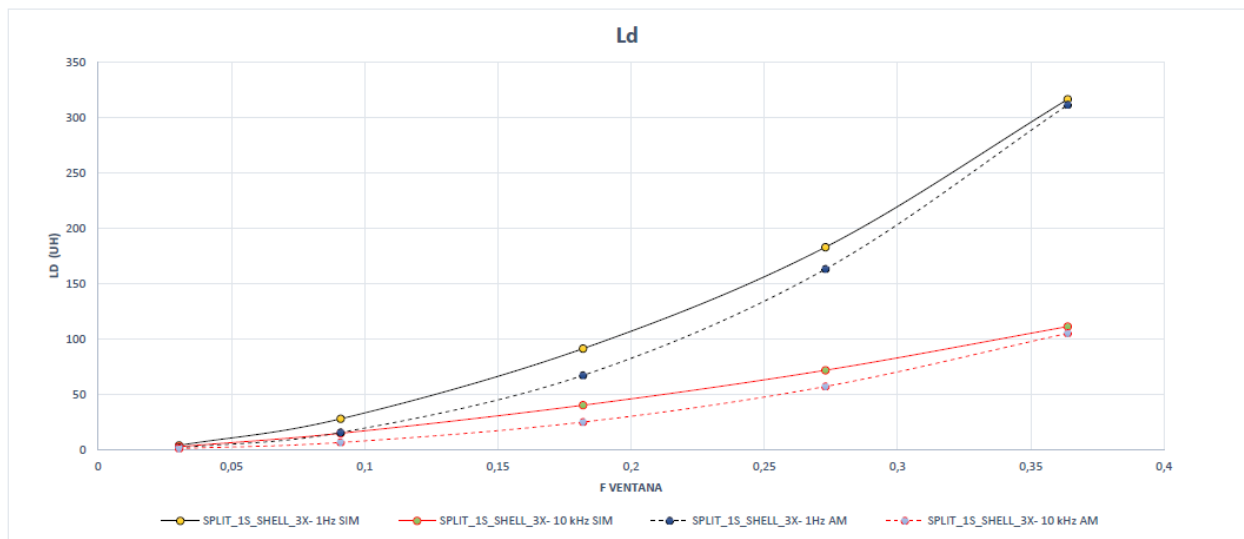


Figura 7.37. Inductancia de dispersión Shell+Split_1 3x-

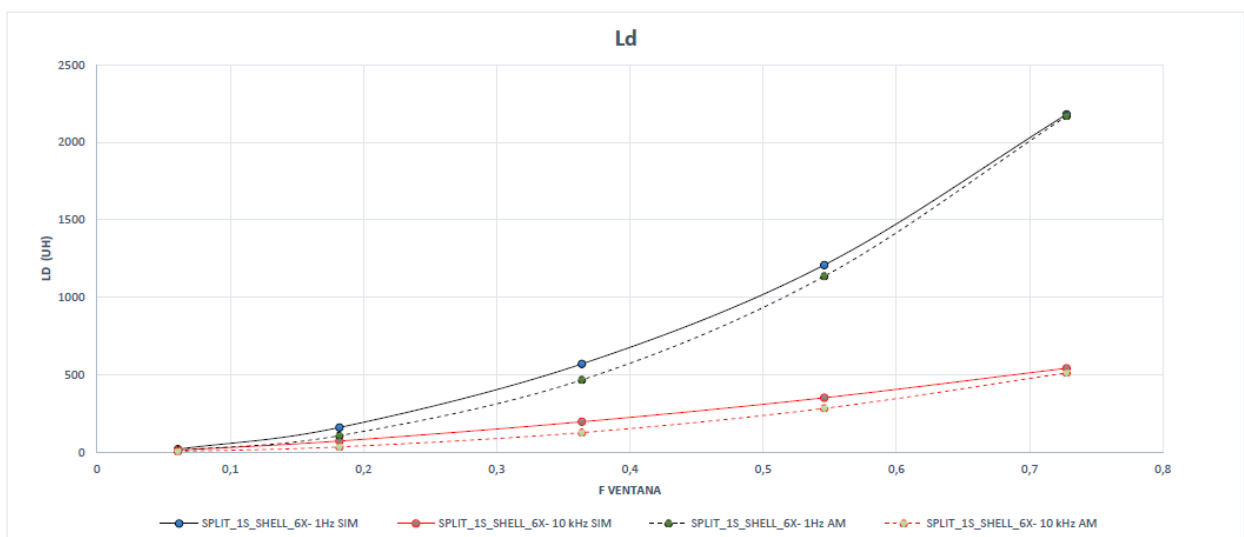


Figura 7.38. Inductancia de dispersión Shell+Split_1 5x-

En este caso la concavidad de las curvas analíticas encaja mejor con las curvas obtenidas mediante simulación, llegando el método analítico a tener una precisión muy alta para factores de llenado altos. El error relativo máximo es de un 75%, ya que para factores de llenado bajos la curva se aleja.



7.4.3 Core+Split_2

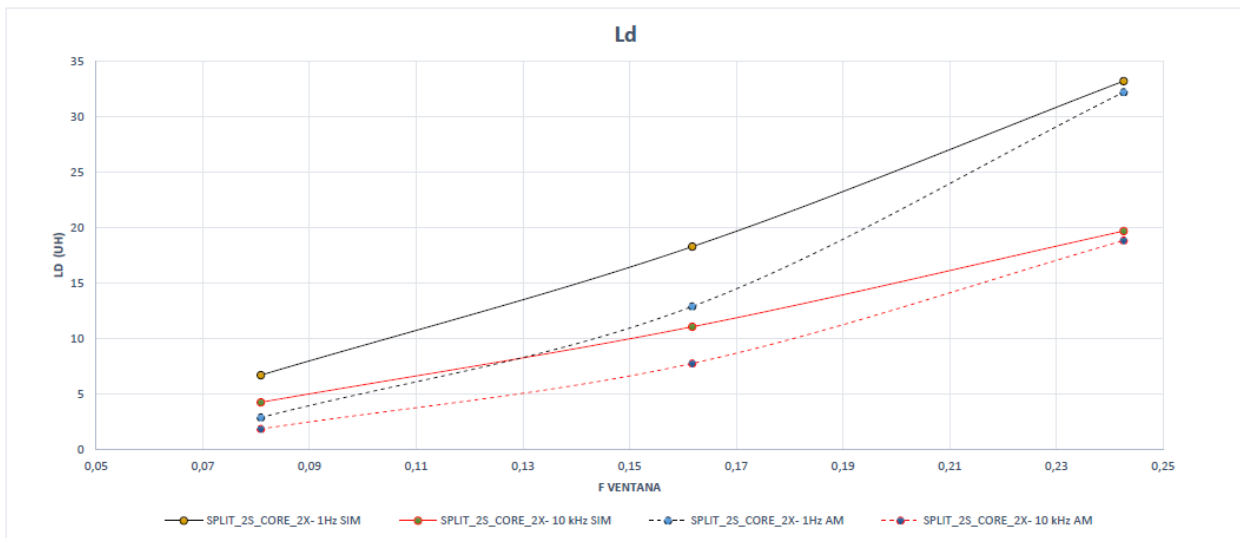


Figura 7.39. Inductancia de dispersión Core+Split_2 2x-

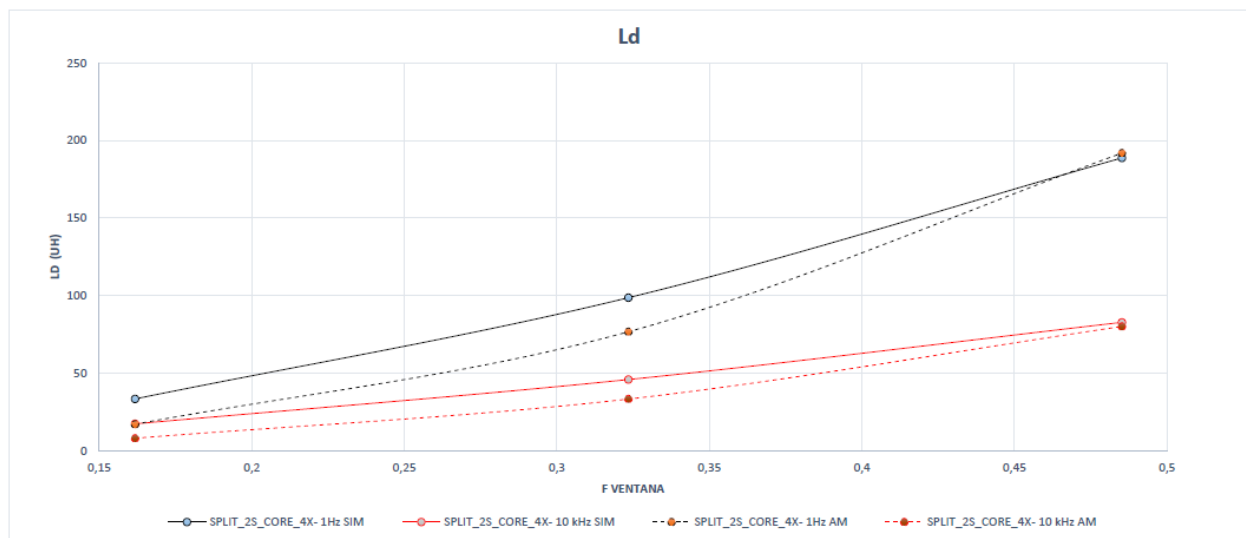


Figura 7.40. Inductancia de dispersión Core+Split_2 4x-

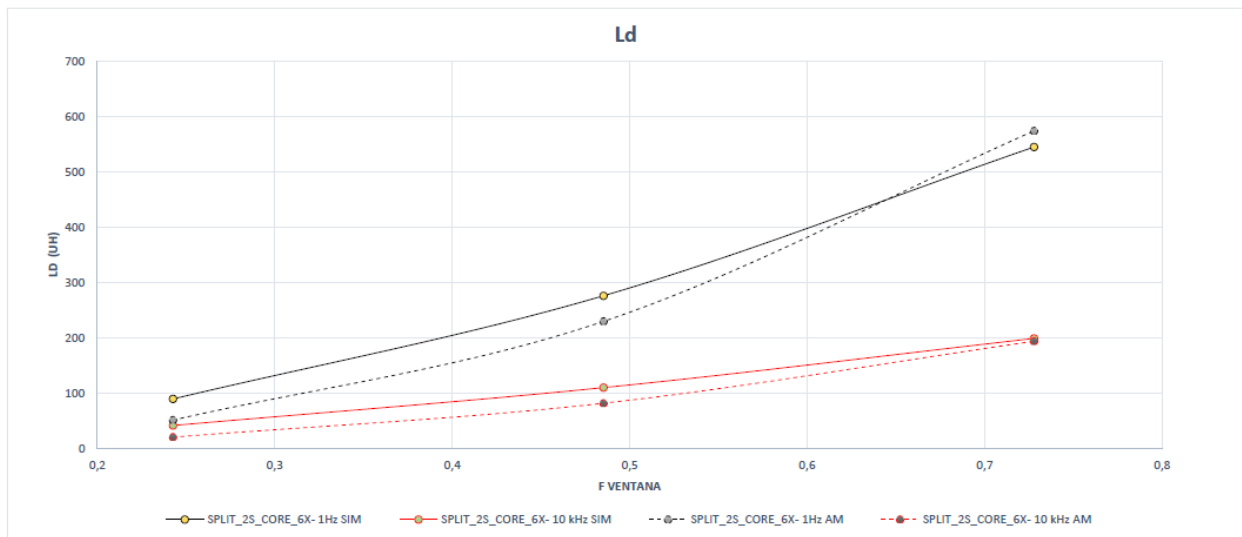


Figura 7.41. Inductancia de dispersión Core+Split_2 6x-

En este caso, el error relativo máximo es de un 55%, por lo que las curvas hasta ahora se aproximan más que en configuraciones de una única sección.

7.4.4 Shell+Split_2

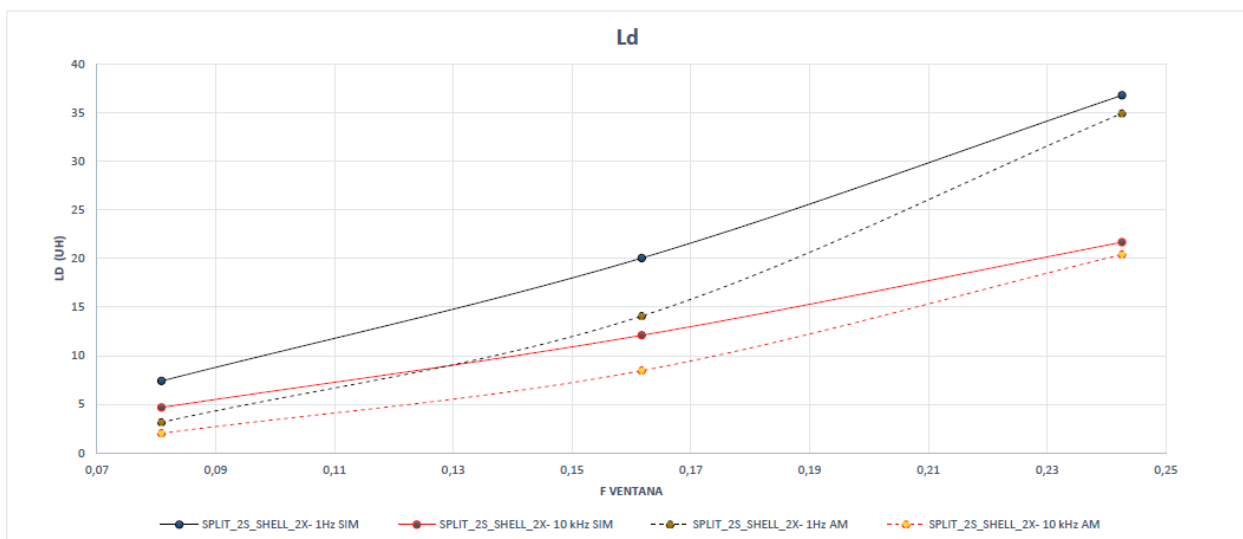


Figura 7.42. Inductancia de dispersión Shell+Split_2 2x-

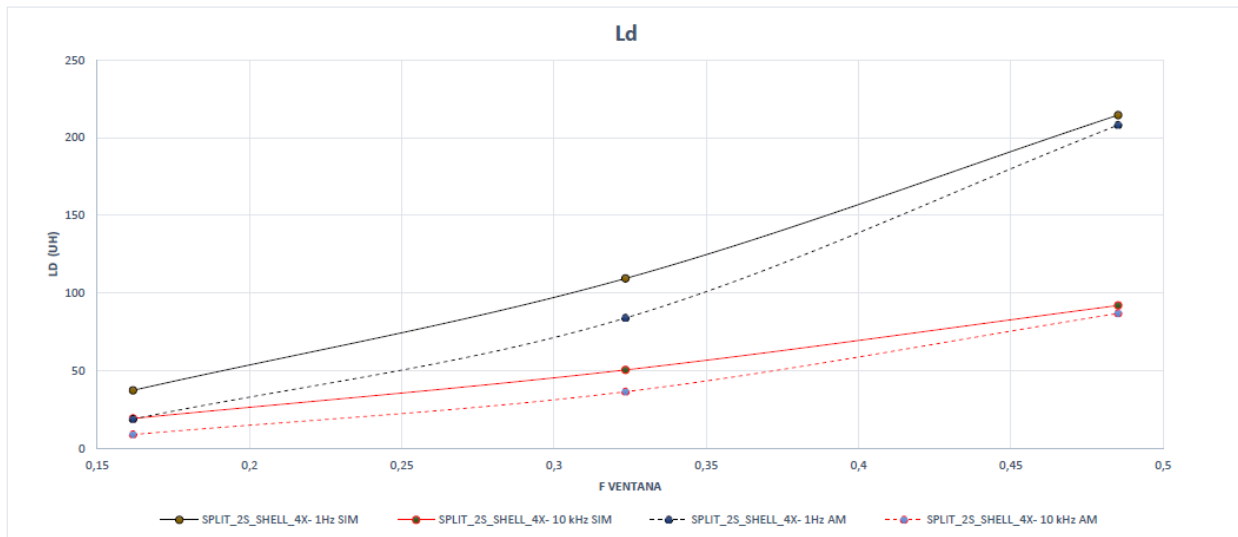


Figura 7.43. Inductancia de dispersión Shell+Split_2 4x-

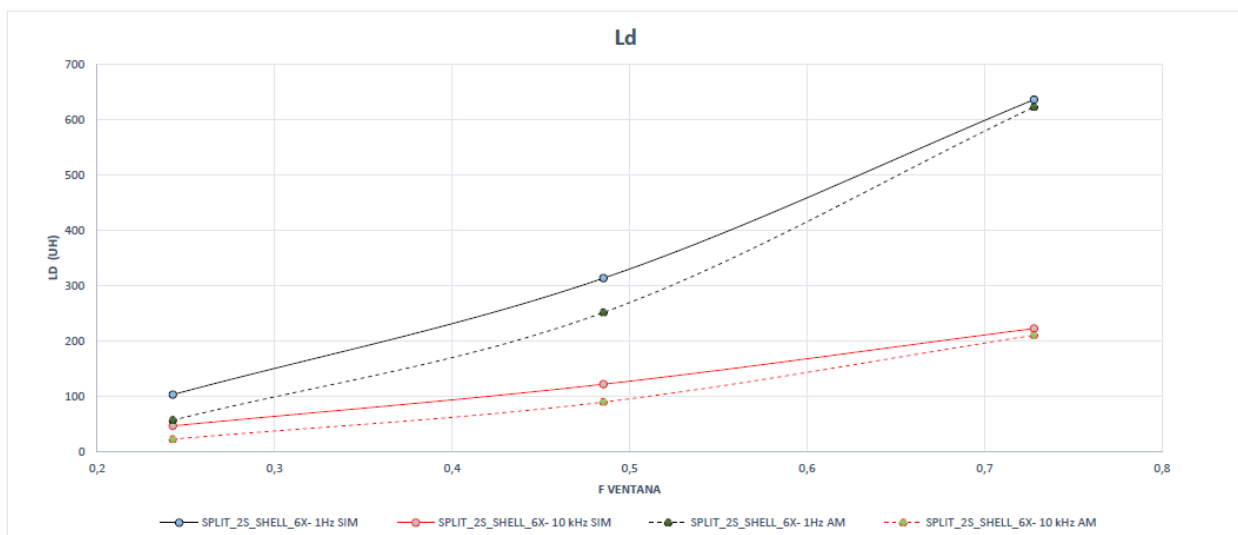


Figura 7.44. Inductancia de dispersión Shell+Split_2 6x-

El error relativo máximo sigue siendo del 55%, por lo que se confirma que para secciones partidas el método analítico resulta ser más preciso, en configuraciones tipo Split.



7.4.5 Core+Concentric_1

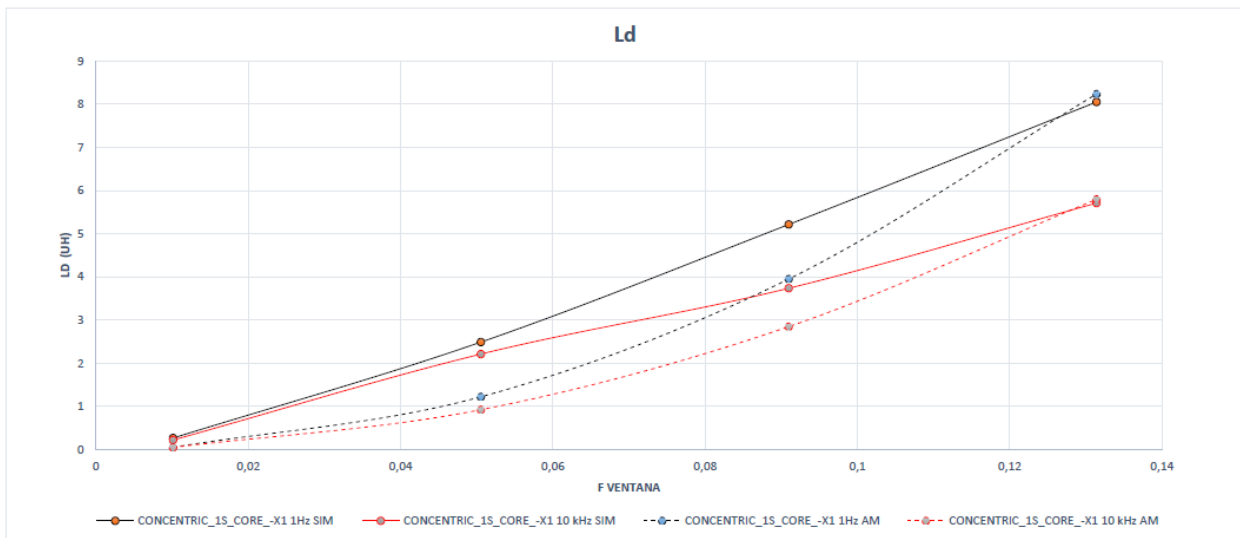


Figura 7.45. Inductancia de dispersión Core+Concentric_1 -x1

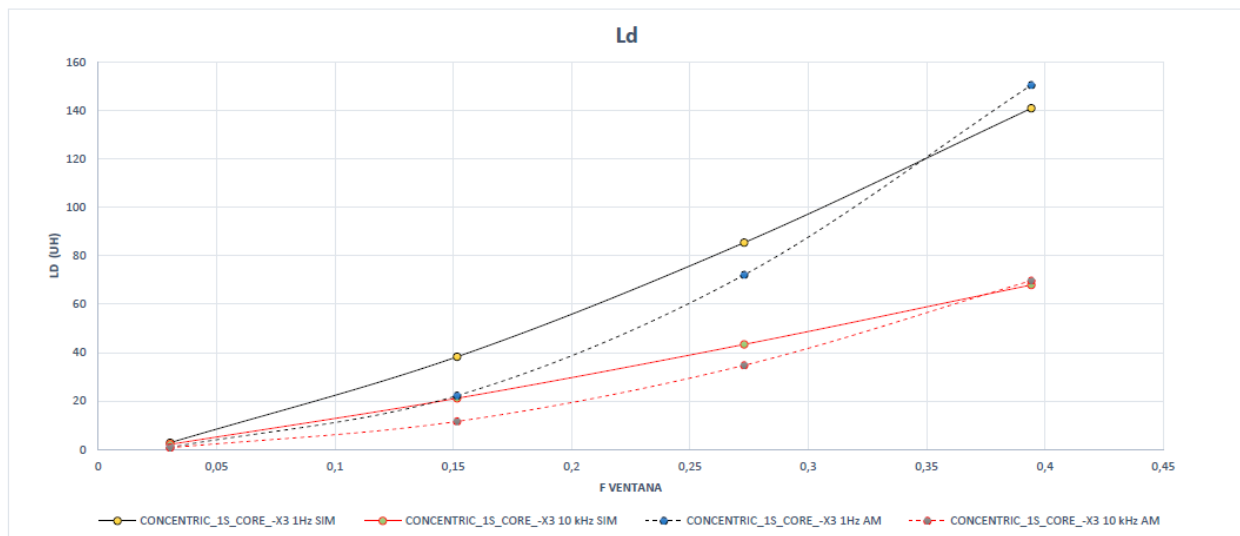


Figura 7.46. Inductancia de dispersión Core+Concentric_1 -x3

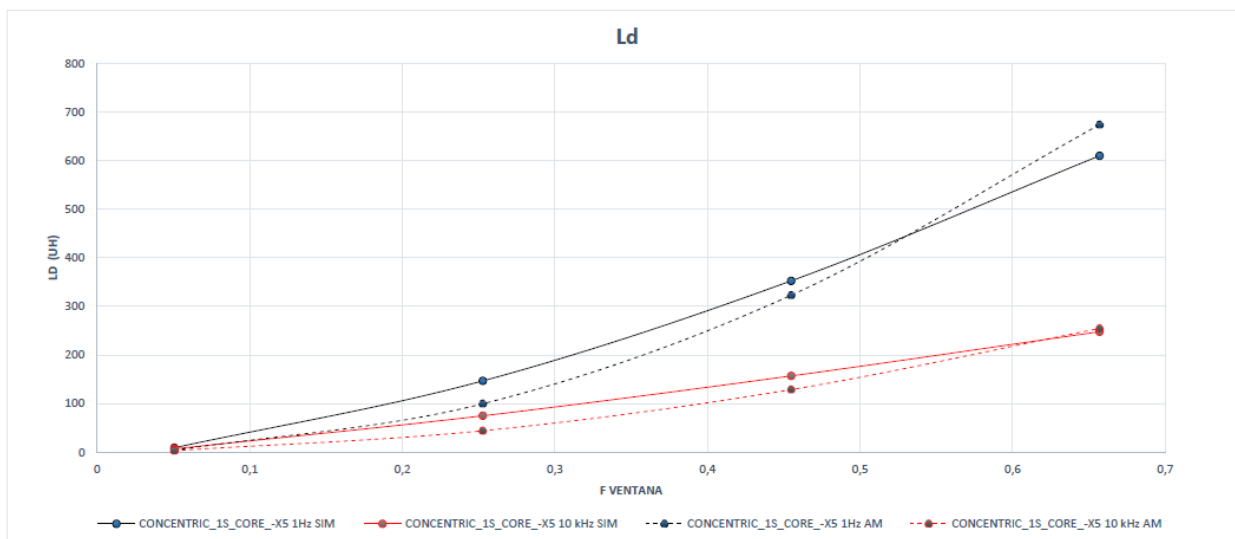


Figura 7.47. Inductancia de dispersión Core+Concentric_1-x5

Al igual que en la configuración Split, para este caso, la concavidad de las curvas analíticas resulta ser más acentuada que las curvas obtenidas mediante simulación, por lo que se tienen errores relativos máximos del 80%.

7.4.6 Shell+Concentric_1

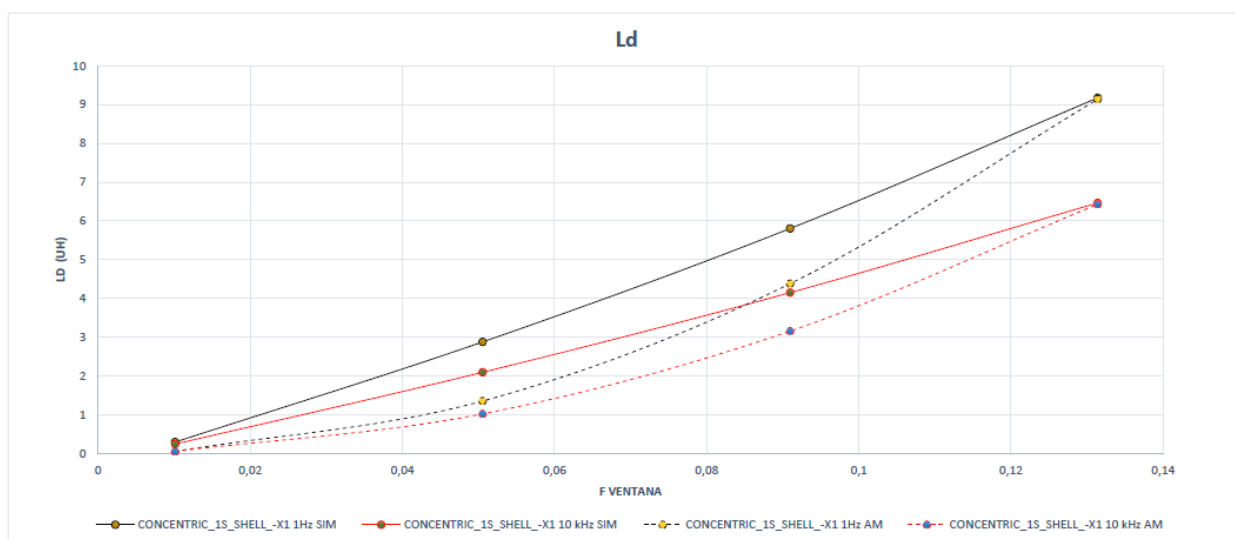


Figura 7.48. Inductancia de dispersión Shell+Concentric_1-x1

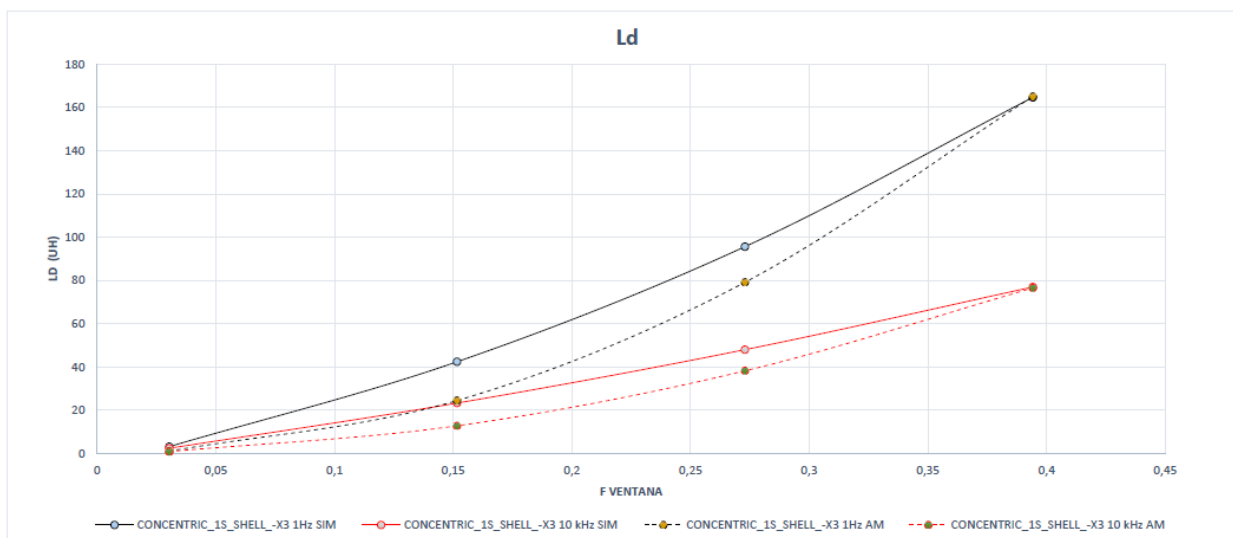


Figura 7.49. Inductancia de dispersión Shell+Concentric_1-x3

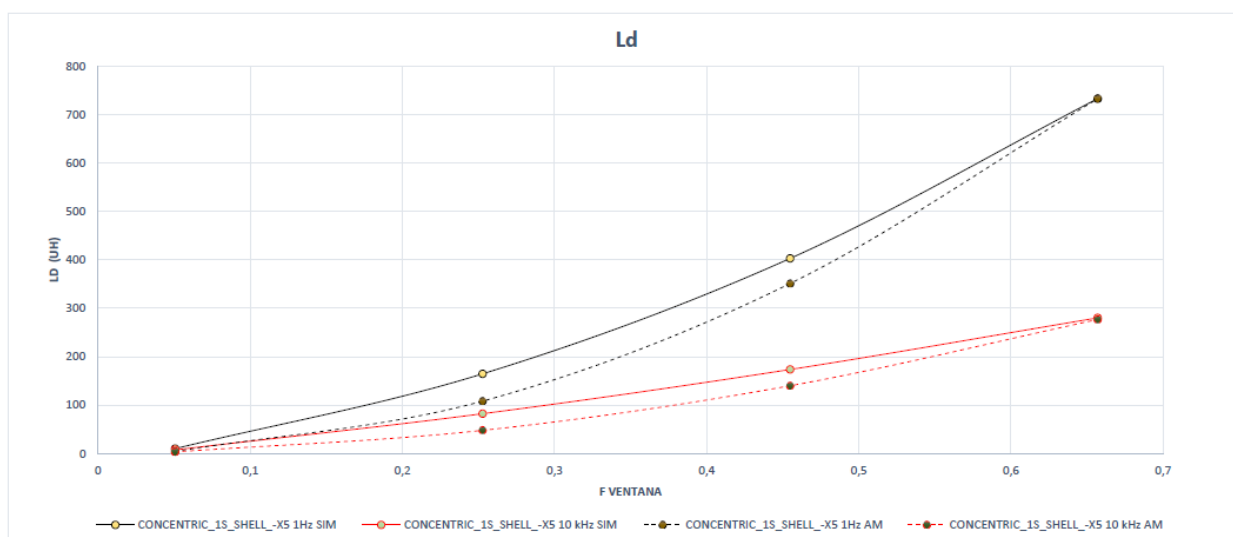


Figura 7.50. Inductancia de dispersión Shell+Concentric_1-x5

Se vuelven a tener errores relativos máximos del 80%.



7.4.7 Core+Concentric_2

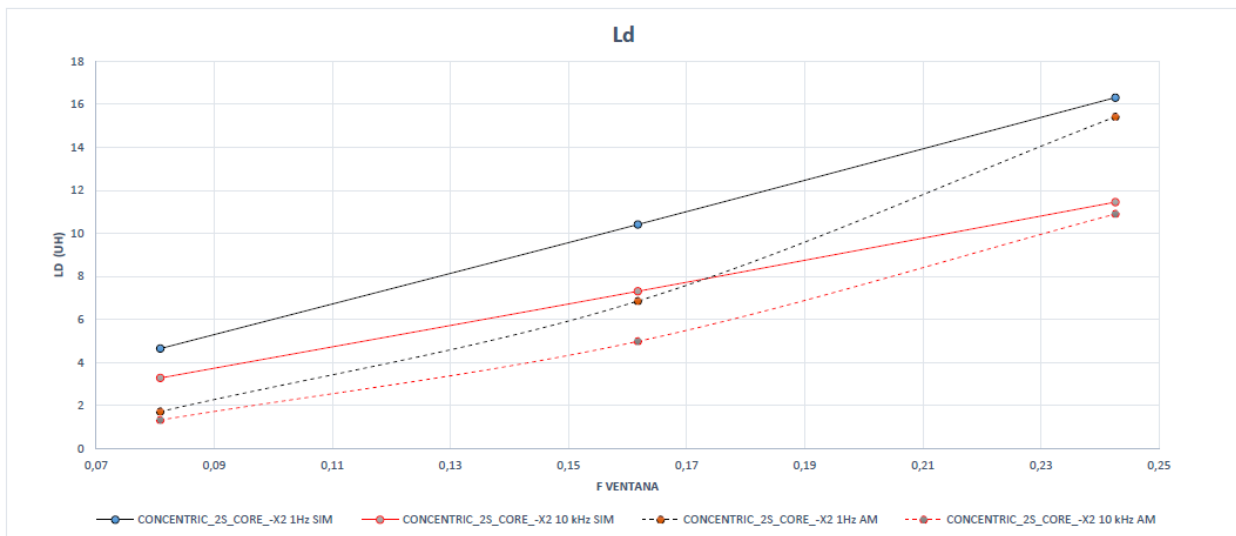


Figura 7.51. Inductancia de dispersión Core+Concentric_2-x2

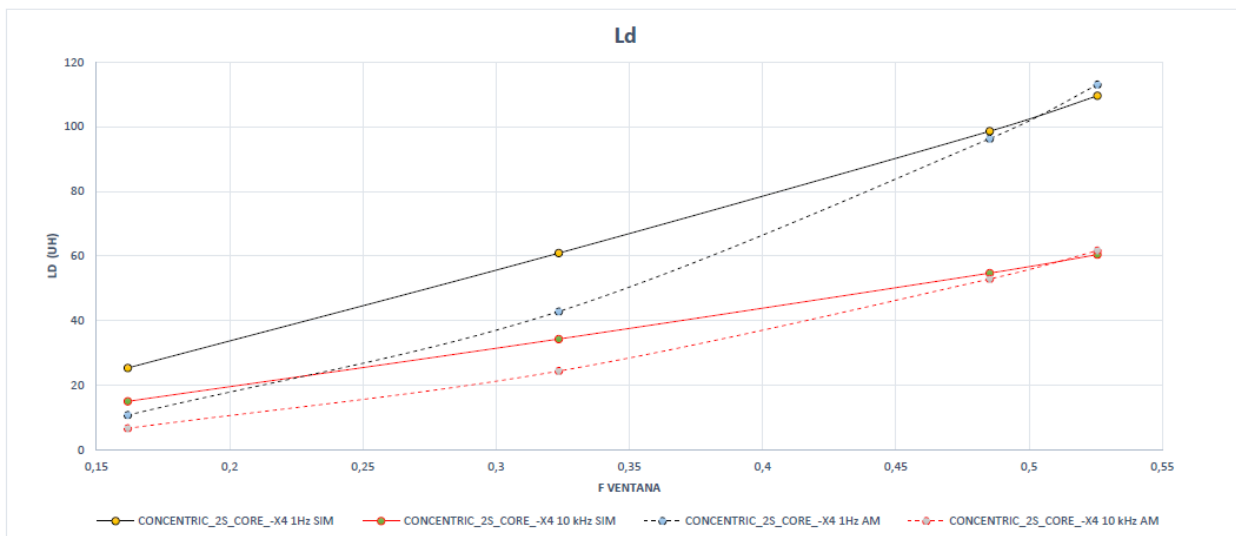


Figura 7.52. Inductancia de dispersión Core+Concentric_2-x4

Al igual que en la configuración Split, en configuraciones de secciones partidas el error relativo disminuye, siendo este caso de un 60%.



7.4.8 Shell+Concentric_2

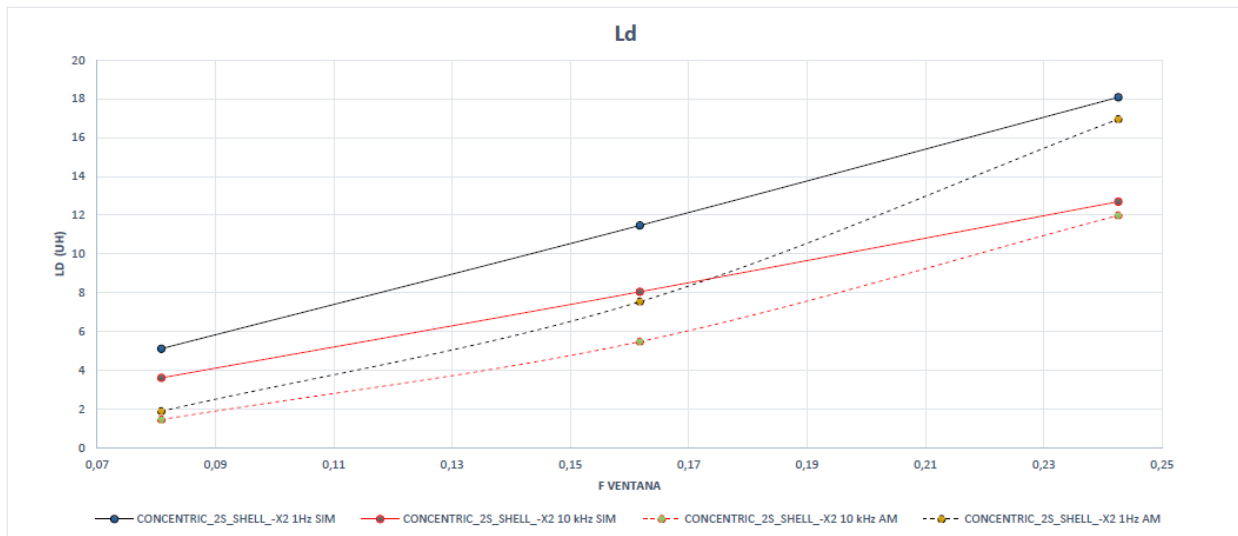


Figura 7.53. Inductancia de dispersión Shell+Concentric_2-x2

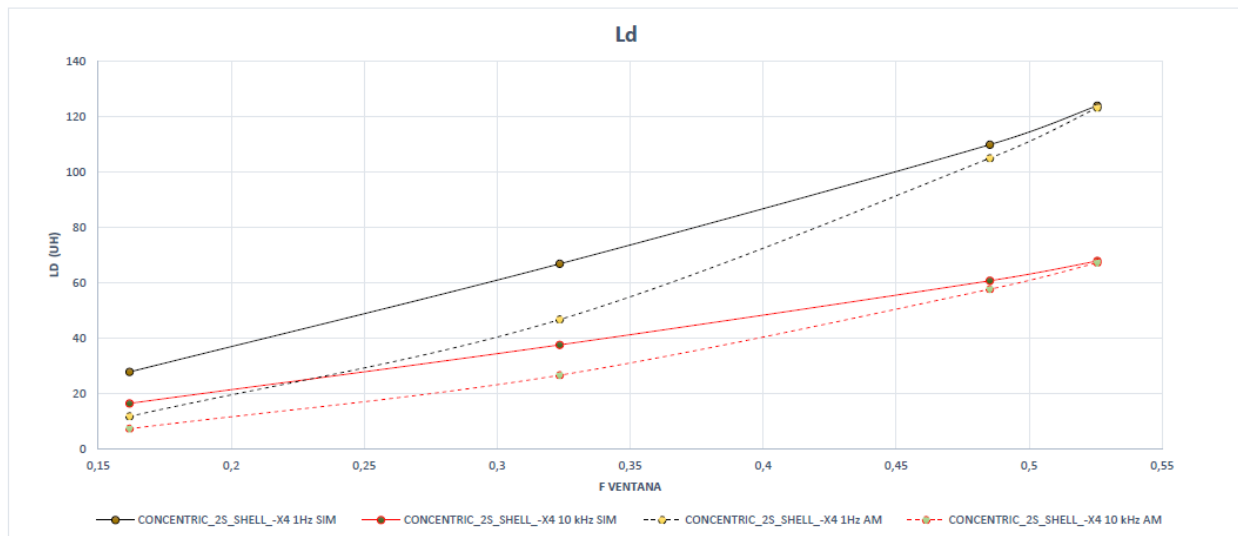


Figura 7.54. Inductancia de dispersión Shell+Concentric_2-x4

El error relativo sigue siendo de un 60%.

7.4.9 Conclusiones

Como se puede observar, las curvas obtenidas analíticamente son en general menos conservadoras y de mayor concavidad, respecto a los resultados experimentales.

En cuanto al error promedio obtenido, al igual que en el cálculo de los anteriores parámetros, disminuye con el aumento del factor de llenado de ventana, siendo menor en configuraciones con dos secciones magnéticas.



El error porcentual no varía en función de la configuración del núcleo (Core o Shell), siendo de un 70-80% en devanados de sección única y un 55-60% en devanados de sección partida.

7.5 Conclusiones generales

Se ha conseguido modelar paramétricamente y simular cada una de las configuraciones propuestas al inicio del proyecto, de forma bidimensional. Aunque no se ha indicado a lo largo del informe, también fueron modeladas todas las configuraciones tridimensionalmente, pero a la hora de simular, la capacidad computacional de la que se disponía no era suficiente.

Se ha podido plasmar como varían los principales parámetros eléctricos de un transformador en función de diversos parámetros y configuraciones de diseño, comparando los resultados obtenidos en las simulaciones con los resultados obtenidos mediante métodos analíticos.



Bibliografía

- Irma Villar. Multiphysical Characterization of Medium-Frequency Power Electronic Transformers. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Tesis doctoral. 2010.
- F. Tourkhani and P. Viarouge. Accurate Analytical Model of Winding Losses in Round Litz Wire Windings. IEEE Transactions on Magnetics, VOL. 37, NO. 1. January 2001
- Charles R. Sullivan. High-Frequency Magnetics Design: Overview and Winding Loss. Dartmouth Magnetics and Power Electronics Research Group. Thayer School of Engineering at Dartmouth
- W.G. Hurley, E. Gath and J.G. Breslin. Optimizing the AC Resistance of Multilayer Transformer Windings with Arbitrary Current Waveforms. Power Electronics Research Centre. National University of Ireland. 1999
- Salvador Magdaleno, Adame. Metodology to Combine Electrical Steels in Power Transformers. Magnetic instrumentation. June 2013
- Juan Alvaro Fuentes. Circuitos magnéticos y transformadores. Electrotécnia



Anexos

I. Especificaciones de la aleación 2605SA1 proporcionadas por Metglas

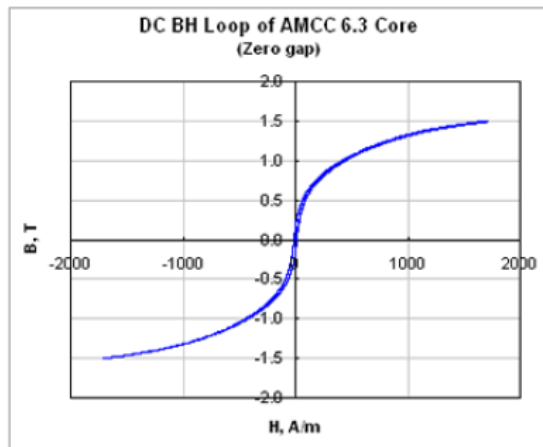
Metglas[®]

POWERLITE[®]
Inductor Cores

www.metglas.com

Technical Bulletin

POWERLITE[®] C-Cores are manufactured with iron based Metglas[®] amorphous Alloy 2605SA1. Their unique combination of low loss and high saturation flux density take advanced power conditioning applications to higher performance levels than previously possible with conventional ferromagnetic Materials.



Physical Properties METGLAS Alloy 2605SA1

Ribbon Thickness (μm)	.25
Density (g/cm^3)	7.18
Thermal Expansion ($\text{ppm}/^\circ\text{C}$)	7.6
Crystallization Temperature ($^\circ\text{C}$)	505
Curie Temperature ($^\circ\text{C}$)	392
Continuous Service Temperature ($^\circ\text{C}$)	150
Tensile Strength (MN/m^2)	1k-1.7k
Elastic Modulus (GN/m^2)	100-110
Vicker's Hardness (50g load)	860

Magnetic Properties METGLAS Powerlite Cores

Saturation Flux Density (Tesla)	1.56
Permeability (depending on gap size)	VARIABLE
Saturation Magnetostriction (ppm)	27
Electrical Resistivity ($\mu\Omega\text{ cm}$)	137