



Documento 2: Anexo 1 Simulaciones

Autor/es
Ángel Martínez Sádaba

Director/es
Pedro Ibáñez Carabantes

Unizar / Escuela de ingeniería y arquitectura
Junio de 2024



Índice

1. Introducción	2
2. FEMM	2
3. Resultado gráfico de la elección de la tecnología de refrigeración.	13
4. DTS.	15



1. Introducción

En este anexo se van a describir brevemente los procedimientos llevados a cabo para introducir los modelos de las simulaciones en los programas.

Además, se van a mostrar los resultados gráficos producidos por la aplicación FEMM, que han servido para determinar la elección de la tecnología de refrigeración del transformador seco de 500 kVA especial para laboratorio.

2. FEMM

Para las simulaciones de FEMM se ha utilizado una hoja de Excel programada que se comunica con esta herramienta.

Se han llevado a cabo las simulaciones de todas las combinaciones de entrada y salida posibles.

En todos los diseños tendremos el mismo encabezado, para introducir los valores de las distancias se han utilizado unos puntos de coordenadas que empiezan en el centro del núcleo.

- Encabezado común:

Nombre	DISEÑO_FINAL	-	Hv	960	mm	T ^a Ref.
Potencia	500	kVA	Cota A	210	mm	120
Frecuencia	50	Hz	D. núcleo	215	mm	

A Continuación, se van a mostrar todas las simulaciones utilizadas para la comprobación del modelo final:



- Primario 400V-Secundario 800V.

HV	HV	HV	HV	Pantalla	LV	[·]	Nombre
				PE	400	460	Subnombre
Aluminio	Aluminio	Aluminio	Aluminio	Aluminio	Aluminio	"Aluminio" "Cobre"	Material
0,00	0,00	0,00	360,84	0,00	721,69	0,00	Corriente rms
180	180	180	180	0	0	0	Desfase
31	42	21	42	1	21	3	Num. espiras
750	750	750	750	750	750	750	Altura conductor
0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,8	0,8	Espesor conductor
0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	Espesor aisamiento
249,33	228,90	218,69	204,12	175,00	148,55	126,51	x_a
249,63	229,20	218,99	204,62	175,50	149,05	127,31	x_b
-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	y_a
375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	y_b
0,47	0,47	0,47	0,67	0,67	0,67	0,97	dx

- Primario 400V-Secundario 1200V.

	HV	HV	HV	HV	Pantalla	LV	[-]	Nombre
Aluminio	Aluminio	Aluminio	Aluminio	Aluminio	Aluminio	"Aluminio" "Cobre"	[-]	Subnombre
3000	2400	1600	1200	800	PE	400	460	
0,00	0,00	240,56	240,56	0,00	721,69	0,00	[A]	Corriente rms
180	180	180	180	0	0	0	[°]	Destase
31	42	21	21	42	1	21	3	Num. espiras
750	750	750	750	750	750	750	[mm]	Altura conductor
0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	[mm]	Espesor conductor
0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	[mm]	Espesor aislamiento
249,33	228,90	218,69	204,12	175,00	148,55	126,51	[mm]	x_a
249,63	229,20	218,99	204,62	175,50	149,05	127,31	[mm]	x_b
-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	[mm]	y_a
375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	[mm]	y_b
0,47	0,47	0,47	0,67	0,67	0,67	0,97	[mm]	dx



- Primario 400V-Secundario 1600V.

	HV	HV	HV	HV	Pantalla	LV	[·]	Nombre
	3000	2400	1600	1200	800	PE	400	460
Aluminio	"Aluminio" "Cobre"							
0,00	0,00	180,42	180,42	180,42	0,00	721,69	0,00	Corriente rms
180	180	180	180	180	0	0	0	Desfase
31	42	21	21	42	1	21	3	Num. espiras
750	750	750	750	750	750	750	750	Altura conductor
0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	Espesor conductor
0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	Espesor aislamiento
249,33	228,90	218,69	204,12	175,00	148,55	126,51	123,50	x_a
249,63	229,20	218,99	204,62	175,50	149,05	127,31	124,30	x_b
-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	y_a
375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	y_b
0,47	0,47	0,47	0,67	0,67	0,67	0,97	0,97	dx



- Primario 400V-Secundario 2400V.

	HV	HV	HV	HV	Pantalla	LV	[·]	Nombre
	3000	2400	1600	1200	800	PE	400	Subnombre
Aluminio	"Aluminio" "Cobre"	Material						
0,00	120,28	120,28	120,28	120,28	0,00	721,69	0,00	Corriente rms
180	180	180	180	180	0	0	0	Desfase
31	42	21	21	42	1	21	3	Num. espiras
750	750	750	750	750	750	750	750	Altura conductor
0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	Espesor conductor
0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	Espesor aislamiento
249,33	228,90	218,69	204,12	175,00	148,55	126,51	123,50	x_a
249,63	229,20	218,99	204,62	175,50	149,05	127,31	124,30	x_b
-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	y_a
375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	y_b
0,47	0,47	0,47	0,67	0,67	0,67	0,97	0,97	dx



- Primario 400V-Secundario 3000V.

HV	HV	HV	HV	Pantalla	LV	[-]	Nombre
	3000	2400	1600	1200	800	PE	Subnombre
Aluminio	Aluminio	Aluminio	Aluminio	Aluminio	Aluminio		"Aluminio"
96,53	96,53	96,53	96,53	96,53	0,00	721,69	0,00
180	180	180	180	180	0	0	0
31	42	21	21	42	1	21	3
750	750	750	750	750	750	750	Altura conductor
0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,8	Espesor conductor
0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	Espesor aislamiento
249,33	228,90	218,69	204,12	175,00	148,55	123,50	x_a
249,63	229,20	218,99	204,62	175,50	149,05	124,30	x_b
-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	y_a
375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	y_b
0,47	0,47	0,47	0,67	0,67	0,67	0,97	d _x



- Primario 460V-Secundario 800V.

	HV	HV	HV	HV	Pantalla	LV	[·]	Nombre
	3000	2400	1600	1200	800	PE	400	Subnombre
Aluminio	"Aluminio" "Cobre"	Material						
0,00	0,00	0,00	0,00	358,60	0,00	627,55	627,55	Corriente rms
180	180	180	180	180	0	0	0	Destase
31	42	21	21	42	1	21	3	Num. espiras
750	750	750	750	750	750	750	750	Altura conductor
0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	Espesor conductor
0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	Espesor aislamiento
249,33	228,90	218,69	204,12	175,00	148,55	126,51	123,50	x_a
249,63	229,20	218,99	204,62	175,50	149,05	127,31	124,30	x_b
-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	y_a
375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	y_b
0,47	0,47	0,47	0,67	0,67	0,67	0,97	0,97	dx



- Primario 460V-Secundario 1200V.

HV	HV	HV	HV	Pantalla	LV	[·]	Nombre
3000	2400	1600	1200	800	PE	400	460
Aluminio	Aluminio	Aluminio	Aluminio	Aluminio	Aluminio		"Aluminio" "Cobre"
0,00	0,00	239,07	239,07	0,00	627,55	627,55	Corriente rms
180	180	180	180	0	0	0	Desfase
31	42	21	21	42	1	21	Num. espiras
750	750	750	750	750	750	750	Altura conductor
0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,8	Espesor conductor
0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	Espesor aislamiento
249,33	228,90	218,69	204,12	175,00	148,55	126,51	x_a
249,63	229,20	218,99	204,62	175,50	149,05	127,31	x_b
-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	y_a
375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	y_b
0,47	0,47	0,47	0,67	0,67	0,97	0,97	dx



- Primario 460V-Secundario 1600V.

HV	HV	HV	HV	Pantalla	LV	[·]	Nombre
	2400	1600	1200	800	PE	400	Subnom
Aluminio	Aluminio	Aluminio	Aluminio	Aluminio	Aluminio		Material
0,00	0,00	179,30	179,30	0,00	627,55	627,55	Corriente rms
180	180	180	180	0	0	0	Difase
31	42	21	21	42	1	21	Num. espiras
750	750	750	750	750	750	750	Altura conducto
0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,8	Espesor conducto
0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	Espesor aislamiento
249,33	228,90	218,69	204,12	175,00	148,55	126,51	x_a
249,63	229,20	218,99	204,62	175,50	149,05	127,31	x_b
-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	y_a
375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	y_b
0,47	0,47	0,47	0,67	0,67	0,67	0,97	d_x



- Primario 460V-Secundario 2400V.

	HV	HV	HV	HV	Pantalla	LV	[-]	Nombre
	3000	2400	1600	1200	800	PE	400	Subnombre
Aluminio	"Aluminio" "Cobre"	Material						
0,00	119,53	119,53	119,53	119,53	0,00	627,55	627,55	Corriente rms
180	180	180	180	180	0	0	0	[A]
31	42	21	21	42	1	21	3	Destase
750	750	750	750	750	750	750	750	Num. espiras
0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	Altura conductor
0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	Espesor conductor
249,33	228,90	218,69	204,12	175,00	148,55	126,51	123,50	Espesor aislamiento
249,63	229,20	218,99	204,62	175,50	149,05	127,31	124,30	x_a
-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	x_b
375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	y_a
0,47	0,47	0,47	0,67	0,67	0,67	0,97	0,97	y_b
								dx



- Primario 460V-Secundario 3000V.

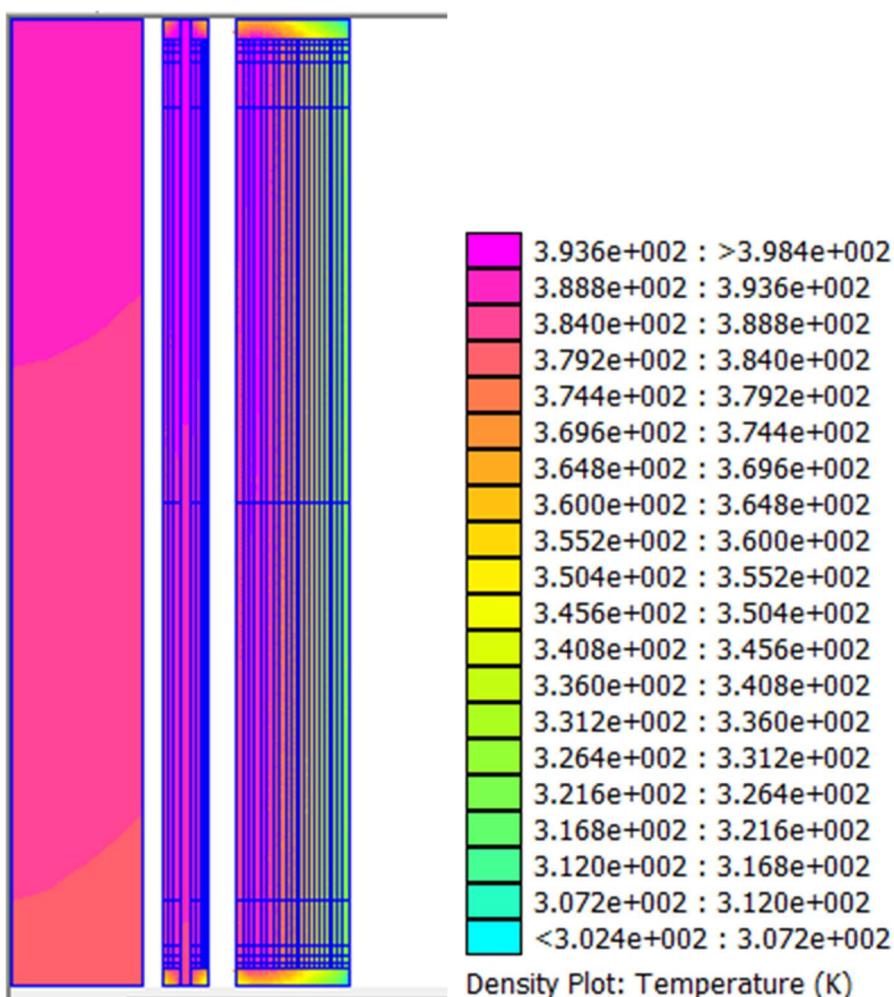
HV	HV	HV	HV	HV	Pantalla	LV	[-]	Nombre
	2400	1600	1200	800	PE	400	460	Subnom
Aluminio	"Aluminio"	"Cobre"						
0,00	119,53	119,53	119,53	119,53	0,00	627,55	627,55	Corriente rms
180	180	180	180	180	0	0	0	Desfase
31	42	21	21	42	1	21	3	Num. espiras
750	750	750	750	750	750	750	750	Altura conducto
0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	Espesor conducto
0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	Espesor aislamiento
249,33	228,90	218,69	204,12	175,00	148,55	126,51	123,50	x_a
249,63	229,20	218,99	204,62	175,50	149,05	127,31	124,30	x_b
-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	-375,00	y_a
375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	375,00	y_b
0,47	0,47	0,47	0,67	0,67	0,67	0,97	0,97	dx

3. Resultado gráfico de la elección de la tecnología de refrigeración.

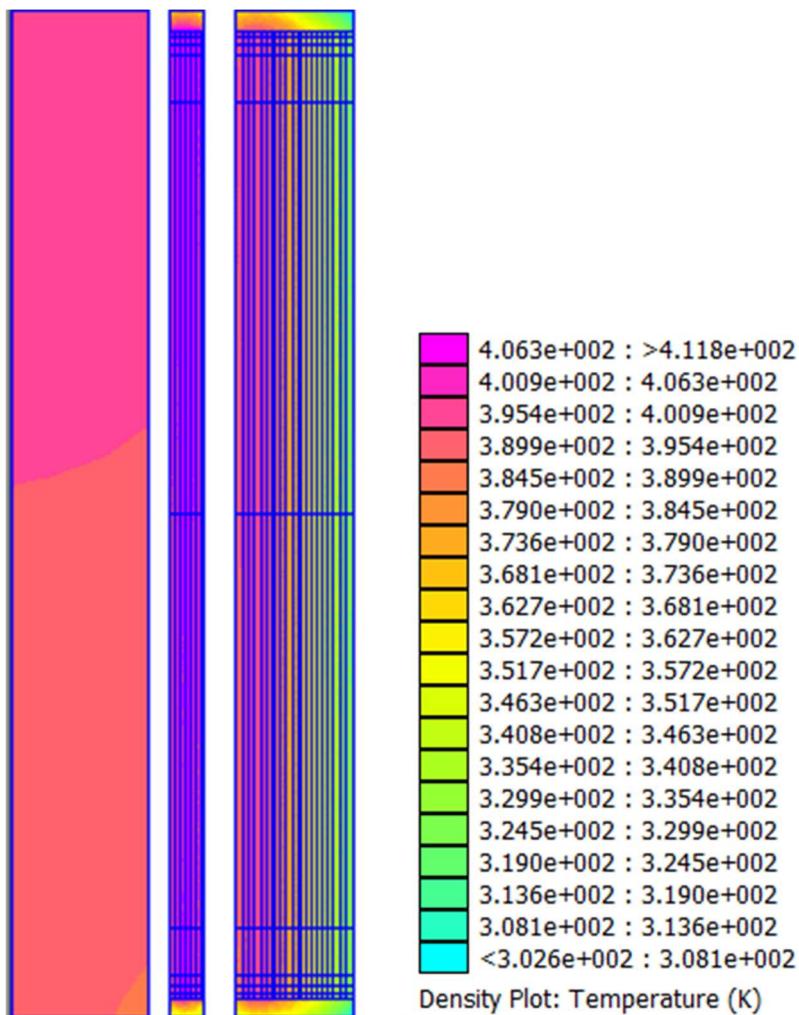
Una vez se han introducido todos los modelos como se ha mostrado en el apartado anterior del anexo, se ha obtenido el resultado gráfico de la simulación donde se puede ver la distribución de la temperatura en el transformador.

Cada imagen viene acompañada de una leyenda donde da valores a los diversos colores que componen el resultado de la simulación.

- Diseño con canales de refrigeración.



- Diseño sin canales de refrigeración.



La conclusión de estas simulaciones está en la memoria descriptiva de este proyecto.



4. DTS.

La herramienta DTS, es un programa desarrollado específicamente para la empresa Hitachi Energy, por lo tanto, se va a mantener la mayor discreción posible.

Para definir el modelo se ha utilizado una interfaz en la cual hemos introducido el diseño por circuitos o tramos.

Se han hecho tantos tramos como salidas posibles hay, es decir, 2 de primario y 5 de secundario, haciendo un total de 7 tramos.

Tramo	Salida
C1	400V
C2	460 V
C3	800 V
C4	1200 V
C5	1600 V
C6	2400 V
C7	3000 V

Se han resumido los datos de diseño introducidos para cada tramo en unas tablas, donde se van definiendo todos los circuitos que forman el modelo.

Utilizaremos para todo como unidad de medida los mm.

- C1-400V.

Geometría del bobinado		Espiras	
Forma	Circular	Material	Al
Diámetro Eléctrico (Inicio / Final)	247 / 252,67	Espira	21
Altura eléctrica	750	Dimensiones	1 / 0,8 / 750
Factor de agrupamiento	1.035	Permutación Max	21
Posición Y	-375	Permutación Min	21
Grupo mecánico	1	Pantalla electroestática	
Grosor aislante (Por vuelta)	0.17	Material	Al
Dimensiones Pletinas	1 / 8 / 80 / 1129	Grosor	0,5
Canales de refrigeración	Si	Altura	750



- C2-460V.

Geometría del bobinado		Espiras	
Forma	Circular	Material	Al
Diámetro Eléctrico (Inicio / Final)	253,67 / 312,47	Espira	24
Altura eléctrica	750	Dimensiones	1 / 0,8 / 750
Factor de agrupamiento	1.035	Permutación Max	24
Posición Y	-375	Permutación Min	24
Grupo mecánico	1	Pantalla electroestática	
Grosor aislante (Por vuelta)	0.17	Material	Al
Dimensiones Pletinas	1 / 8 / 80 / 1129	Grosor	0,5
Canales de refrigeración	Si	Altura	750

- C3-800V.

Geometría del bobinado		Espiras	
Forma	Circular	Material	Al
Diámetro Eléctrico (Inicio / Final)	365 / 422,9	Espira	42
Altura eléctrica	750	Dimensiones	1 / 0,5 / 750
Factor de agrupamiento	1.035	Permutación Max	42
Posición Y	-375	Permutación Min	42
Grupo mecánico	2	Pantalla electroestática	
Grosor aislante (Por vuelta)	0.17	Material	NO
Dimensiones Pletinas	1 / 5 / 40 / 984	Grosor	NO
Canales de refrigeración	NO	Altura	NO



5. C4-1200V.

Geometría del bobinado		Espiras	
Forma	Circular	Material	Al
Diámetro Eléctrico (Inicio / Final)	424 / 452,77	Espira	21
Altura eléctrica	750	Dimensiones	1 / 0,5 / 750
Factor de agrupamiento	1.035	Permutación Max	21
Posición Y	-375	Permutación Min	21
Grupo mecánico	2	Pantalla electroestática	
Grosor aislante (Por vuelta)	0.17	Material	NO
Dimensiones Pletinas	1 / 5 / 40 / 984	Grosor	NO
Canales de refrigeración	NO	Altura	NO

6. C5-1600V.

Geometría del bobinado		Espiras	
Forma	Circular	Material	Al
Diámetro Eléctrico (Inicio / Final)	453,77 / 473,85	Espira	21
Altura eléctrica	750	Dimensiones	1 / 0,3 / 750
Factor de agrupamiento	1.035	Permutación Max	21
Posición Y	-375	Permutación Min	21
Grupo mecánico	2	Pantalla electroestática	
Grosor aislante (Por vuelta)	0.17	Material	NO
Dimensiones Pletinas	1 / 5 / 40 / 984	Grosor	NO
Canales de refrigeración	NO	Altura	NO



7. C6-2400V.

Geometría del bobinado		Espiras	
Forma	Circular	Material	Al
Diámetro Eléctrico (Inicio / Final)	474,85 / 515,36	Espira	42
Altura eléctrica	750	Dimensiones	1 / 0,3 / 750
Factor de agrupamiento	1.035	Permutación Max	42
Posición Y	-375	Permutación Min	42
Grupo mecánico	2	Pantalla electroestática	
Grosor aislante (Por vuelta)	0.17	Material	NO
Dimensiones Pletinas	1 / 5 / 40 / 984	Grosor	NO
Canales de refrigeración	NO	Altura	NO

• C7-3000V.

Geometría del bobinado		Espiras	
Forma	Circular	Material	Al
Diámetro Eléctrico (Inicio / Final)	516,36 / 546,17	Espira	31
Altura eléctrica	750	Dimensiones	1 / 0,3 / 750
Factor de agrupamiento	1.035	Permutación Max	31
Posición Y	-375	Permutación Min	31
Grupo mecánico	2	Pantalla electroestática	
Grosor aislante (Por vuelta)	0.17	Material	NO
Dimensiones Pletinas	1 / 5 / 40 / 984	Grosor	NO
Canales de refrigeración	NO	Altura	NO



Finalmente se ha definido también el núcleo del transformador introduciendo los siguientes datos reunidos en una tabla:

- **Núcleo.**

Forma del núcleo	Circular	Área bruta	307,57
Área neta	299,88	Diámetro	210
Grosor Max	210	Centro columnas	560
Altura de ventana	900	B inducción	1,66 T
Voltios por espira	11		
Pérdidas en vacío	1632		
Conductos de ventilación	0		

Todas las tablas anteriores conforman el conjunto de datos necesarios para modelar el transformador final del proyecto en el programa de simulación DTS.



Documento 3: Anexo 2 Presupuesto

Autor/es
Ángel Martínez Sádaba

Director/es
Pedro Ibáñez Carabantes

Unizar / Escuela de ingeniería y arquitectura
Junio de 2024



Índice

1. Introducción	2
2. Coste del diseño y toma de datos.....	2
3. Costes materiales del proyecto.	2
4. Diseño técnico y horas de software.	3
5. Horas de montaje.....	3
6. Coste total del proyecto.....	4



1. Introducción

En este anexo se va a dar solución al presupuesto del transformador, el objetivo es hacer un cálculo aproximado del coste de desarrollo de este proyecto de principio a fin.

Evidentemente este coste no es ni mucho menos definitivo y está sujeto a muchas variables que pueden incrementarlo.

2. Coste del diseño y toma de datos.

Apartado del desarrollo del transformador donde se tienen en cuenta las horas técnicas del ingeniero a cargo, en este punto se van a sumar todas las horas empleadas en el diseño inicial de estimación del proyecto, además, del tiempo empleado en la toma de datos necesaria.

Se ha elegido un coste por hora de ingeniería técnica de 40€/h.

Tarea	Horas	Coste
Toma de datos	5	200 €
Diseño CDSE	5	200 €
TOTAL	10	400 €

Tabla de coste de diseño inicial y toma de datos

3. Costes materiales del proyecto.

Se ha elaborado una tabla incluyendo todos los materiales que se van a utilizar para el diseño, esto servirá de aproximación para los costes de materiales.

Hay que tener muy en cuenta dos factores que pueden hacer que este coste varíe:

El primer factor, es que aún falta el diseño mecánico del transformador, el cual seguramente aumentará levemente el coste de los materiales.

El segundo es el tiempo, no se sabe con certeza cuando se va a ejecutar este proyecto, por lo que es posible que se haya cambiado algún proveedor o los costes de algún material hayan aumentado.

Se ha obtenido la siguiente tabla de costes materiales:



Grupo	Peso (kg)	Coste Unidad	Matl. Cost/EUR
CORE & SCRAP (Núcleo y chapa)	1.354,17	1,95	2.640,64
LV1-Lead-ALBAR (Pletina y Embarrado BT)	18,04	4,82	86,95
LV1-ALFOIL (Conductor BT)	102,87	3,69	379,59
HV1-Lead-ALBAR (Pletina y Embarrado AT)	9,81	4,39	43,05
HV1-ALFOIL (Conductor AT)	516,95	3,60	1.861,03
B2-INS-PGS-STK-23.52 (Aislante)	7,10	3,07	21,75
LV1-B2-INS-NMN Preg-SHT-0.17 (Aislante)	9,64	43,86	422,75
LV1-B2-INS-NMN Preg-SHT-0.09 (Aislante)	0,34	43,86	14,95
HV1-TURN-INS-NMN Preg-SHT-0.17 (Aislante)	96,85	43,86	4.248,04
HV1-B1-INS-PGS-SHT-0.96 (Aislante)	2,57	3,07	7,87
HV1-B2-INS-PGS-SHT-0.51 (Aislante)	2,04	3,07	6,25
CLAMP (Brida)	170,16	2,38	404,99
TOTAL	2.290,54	161,61	10.137,87 €

Tabla de coste material

4. Diseño técnico y horas de software.

Se han recogido en una tabla todas las horas dedicadas a las aplicaciones de diseño del transformador, además, de todas las horas utilizadas en otros programas de tratamiento de datos y simulaciones necesarias para llevar a cabo el proyecto.

Tarea	Horas	Coste
Diseño CDSE	30	1.200 €
Simulaciones (FEMM y DTS)	15	600 €
Diseño gráfico asistido (AutoCAD)	5	200 €
Office 365	10	400 €
TOTAL	60	2.400 €

Tabla de coste de diseño técnico y software

5. Horas de montaje

Las horas de montaje de un transformador medio en HEZ son 50h, por lo tanto, para poder estimar las horas de montaje en un diseño especial, se ha incrementado hasta aproximadamente 65h.

Estas horas multiplicadas por el coste de hora de producción de la fábrica 90€/h, ha sido tenido en cuenta en la siguiente tabla de coste de montaje:



Tarea	Horas	Coste
Producción y ensamblaje	65	5.850 €
TOTAL	65	5.850 €

Tabla de coste de producción.

6. Coste total del proyecto.

Finalmente se han sumado todos los apartados del anexo 2 para obtener la estimación del coste total del proyecto.

Apartado	Coste
Diseño inicial y toma de datos	400,00 €
Coste material	10.137,87 €
Diseño técnico y software	2.400,00 €
Horas de montaje	5.850,00 €
TOTAL	18.787,87 €

El presupuesto estimado para la realización del proyecto esta exento del beneficio industrial dado que el cliente es la propia empresa, entonces la suma del coste de realización del proyecto asciende a 18.787,87 euros.