

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
INFORMÁTICA Y MECÁNICA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



TESIS

**DIMENSIONAMIENTO ANGULAR ÓPTIMO Y DETERMINACIÓN DEL
FACTOR DE UTILIZACIÓN DEL NÚCLEO ESCALONADO DEL
TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN, CON ASISTENCIA DEL MATLAB**

PRESENTADA POR:

BR. JEAN PAUL CANSAYA CUTIRE
BR. LEONEL ANTHONY ALVAREZ
RIQUELME

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO ELECTRICISTA**

ASESOR:

MSC. MANUEL LAU PACHECO

CUSCO – PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor MANUEL LAU PACHECO
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: "DIMENSIONAMIENTO ANGULAR ÓPTIMO Y
DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE UTILIZACIÓN DEL NÚCLEO ESCALONADO DEL
TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN, CON ASISTENCIA DEL MATLAB"

Presentado por: CANSAYA CUTIRE JEAN PAUL DNI N° 74918291

presentado por: ALVAREZ RIQUELME LEONEL ANTHONY DNI N°: 72751380

Para optar el título Profesional/Grado Académico de
INGENIERO ELECTRICISTA

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 01 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de
Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 0.....%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 12 de AGOSTO de 2026

MLau
Firma

Post firma Msc. MANUEL LAU PACHECO

Nro. de DNI 23828214

ORCID del Asesor 0000-0001-8988-1833

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 272598613954277

Leonel - Jean Alvarez - Cansaya

DIMENSIONAMIENTO ANGULAR ÓPTIMO Y DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE UTILIZACIÓN DEL NÚCLEO ESCALONADO D...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:613954277

Fecha de entrega

12 ago 2026, 3:25 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

12 ago 2026, 3:41 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

DIMENSIONAMIENTO ANGULAR ÓPTIMO Y DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE UTILIZACIÓN DELdocx

Tamaño del archivo

23.8 MB

226 páginas

42.087 palabras

251.870 caracteres

0% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Coincidencias menores (menos de 20 palabras)
- Trabajos entregados

Fuentes principales

- 0%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

PRESENTACIÓN

El transformador desempeña un papel muy importante y fundamental en los sistemas de distribución eléctrica al adaptar, regular y distribuir la energía eléctrica de manera eficiente y segura, logrando un suministro confiable de energía para las diversas necesidades de los consumidores o clientes finales.

Es necesario señalar los diversos sectores que son dependientes del servicio eléctrico y por consiguiente del transformador, entre estos tenemos el sector salud, educación, comunicación, cultura, turismo, economía, seguridad y otros; significa entonces que el sistema de distribución y el transformador deben de garantizar: calidad de producto, de suministro, alumbrado e instalaciones.

La operación confiable del transformador requiere principalmente un diseño y dimensionamiento preciso y en detalle de cada una de sus componentes; en ese contexto, el dimensionamiento del núcleo del transformador adquiere delicada y gran importancia porque representa la parte medular del transformador.

El presente proyecto de investigación aborda el “dimensionamiento óptimo” del núcleo escalonado del transformador como proceso preliminar y determinante de la evaluación consecuente del “factor de utilización”, en ese escenario como es de entender participan un conjunto de parámetros y variables que son inherentes al diseño del transformador y que requieren herramientas adecuadas de cálculo o dimensionamiento.

Las herramientas convencionales que se utilizan en algunos casos en nuestro entorno tienen algunas limitaciones a pesar de que algunas utilizan tablas, curvas o gráficas extraídas de años de experiencia; sin embargo, el permanente desarrollo de la tecnología nos posibilita novedosas herramientas que podrían ser utilizadas en la solución de las ecuaciones de maximización y optimización de resultados, entre otras se tiene el software o entorno de programación Matlab el mismo que actualmente tiene licencia de uso en la Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica.

Los autores

ÍNDICE

PRESENTACIÓN	II
ÍNDICE	III
ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
RESUMEN.....	XIV
ABSTRACT	XV
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1 Situación problemática	1
1.2 Formulación del problema	3
1.2.1 Problema general	3
1.2.2 Problemas específicos.....	3
1.3 Justificación del problema.....	3
1.3.1 Teórica	3
1.3.2 Metodológica.....	5
1.3.3 Tecnológica	6
1.4 Limitaciones de la investigación	6
1.5 Objetivos	7
1.5.1 Objetivo general	7
1.5.2 Objetivos específicos	7
1.6 Hipótesis	7
1.6.1 Hipótesis general	7
1.6.2 Hipótesis específicas	7
1.7 Variables e indicadores.....	7
1.7.1 Variable independiente e indicadores	7
1.7.2 Variable dependiente.....	8
1.7.3 La operacionalización de variables	8
1.8 Metodología.....	10
1.8.1 Enfoque, tipo y nivel de la investigación.....	10
1.8.2 Unidad de análisis	10
1.8.3 Técnicas de recolección de información	11
1.8.4 Técnicas de análisis e interpretación de la información	11
1.8.5 Matriz de consistencia.....	11
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	15
2.1 Antecedentes.....	15
2.2 Bases teóricas.....	17
2.2.1 Dimensionamiento angular óptimo	17

2.1.2	Calculo teórico del área máxima del núcleo	18
2.1.3	Restricciones constructivas del dimensionamiento angular	21
2.1.4	Dimensionamiento del factor de utilización Kg	23
2.1.5	Materiales utilizados en el núcleo.....	24
2.1.6	Dimensiones usuales de los escalones en transformadores de distribución.....	27
2.1.7	El factor de utilización del núcleo	27
2.3	Marco conceptual.....	28
2.3.1	Dimensionamiento angular	28
2.3.2	Factor de utilización.....	29
2.3.3	Transformadores de distribución.....	30
2.3.4	Software Matlab	31
CAPÍTULO III ANÁLISIS DEL DIMENSIONAMIENTO ANGULAR Y EL FACTOR DE UTILIZACIÓN DEL NÚCLEO ESCALONADO CON ASISTENCIA DEL MATLAB.....		34
3.1	Generalidades.....	34
3.2	Dimensionamiento angular para un escalón	37
3.2	Dimensionamiento angular para dos escalones.....	44
3.3	Dimensionamiento angular para tres escalones.....	51
3.4	Dimensionamiento angular para cuatro escalones	59
3.5	Dimensionamiento angular para cinco escalones.....	66
3.6	Dimensionamiento angular para seis escalones.....	74
3.7	Dimensionamiento angular para siete escalones	83
3.8	Dimensionamiento angular para ocho escalones.....	92
3.9	Dimensionamiento angular para nueve escalones	102
3.10	Dimensionamiento angular para diez escalones	111
CAPÍTULO IV INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO PARA EL DIMENSIONAMIENTO ANGULAR Y EL FACTOR DE UTILIZACIÓN DEL NÚCLEO ESCALONADO		124
4.1	Generalidades.....	124
4.2	Estructura de la interfaz gráfica de usuario GUI para el dimensionamiento angular y el factor de utilización.....	125
4.2.1	La ventana de entradas de la interfaz gráfica de usuario	126
4.2.2	La ventana de resultados de corte de columna	130
4.2.3	La ventana crear gráficas (dibujos)	131
4.2.4	La ventana resumen de datos	133
CAPÍTULO V COMPROBACIÓN DE HIPÓTESIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		136
5.1	Generalidades.....	136

5.2 Comprobación de la hipótesis general	136
5.2.1 El dimensionamiento angular óptimo	137
5.2.2 Maximización de la utilización del material magnético y la sección neta S_n	137
5.2.3 El número de escalones y los factores de utilización f_u del núcleo escalonado	141
5.2.4 El número de escalones y los factores de utilización f_u para dos tipos de material de hierro de grano orientado convencional mejorado	143
5.3 Análisis comparativo del factor de utilización entre los materiales magnéticos	146
CONCLUSIONES.....	150
RECOMENDACIONES.....	152
BIBLIOGRAFÍA.....	153
ANEXO	156
APENDICE.....	175

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Matriz de operacionalización de variables</i>	9
Tabla 2 <i>Matriz de consistencia</i>	12
Tabla 3 <i>Espesores, designaciones técnicas y equivalencias JIS de los aceros eléctricos de grano orientado (CGO) mejorados</i>	36
Tabla 4 <i>Resumen de Ángulos para un escalón</i>	41
Tabla 5 <i>Cálculo del área neta, factor de utilización y factor del hierro para un núcleo de 1escalón con diferentes tipos de acero eléctrico de grano orientado convencional mejorado</i>	42
Tabla 6 <i>Resultados de base y altura de las chapas magnéticas para un escalón</i>	43
Tabla 7 <i>Ángulos para dos escalones</i>	48
Tabla 8 <i>Cálculo de los parámetros de las chapas magnéticas según el tipo de aislamiento para dos escalones</i>	50
Tabla 9 <i>Resultados de base y altura de las chapas magnéticas para dos escalones</i>	51
Tabla 10 <i>Ángulos calculados para tres escalones</i>	56
Tabla 11 <i>Valores calculados de la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro para núcleo del transformador de tipos de acero de grano orientado convencional mejorado</i>	57
Tabla 12 <i>Resultados de base y altura de las chapas magnéticas para tres escalones</i>	58
Tabla 13 <i>Ángulos calculados para cuatro escalones</i>	63
Tabla 14 <i>Cálculo de la sección neta, factor de utilización factor de hierro para 4 escalones</i>	65
Tabla 15 <i>Cálculo Resultados de base y altura de las chapas magnéticas para cuatro escalones</i>	66
Tabla 16 <i>Ángulos para cinco escalones</i>	71
Tabla 17 <i>Cálculo de la sección neta, factor de utilización y factor del hierro para materiales magnéticos de hierro de grano orientado convencional mejorado para cinco escalones</i>	72
Tabla 18 <i>Resultados de base y altura de las chapas magnéticas para cinco escalones</i>	74
Tabla 19 <i>Ángulos para seis escalones</i>	79
Tabla 20 <i>Cálculo de la sección neta, factor de utilización y factor del hierro en los materiales magnéticos de hierro de grano orientado convencionales mejorados para seis escalones</i>	81
Tabla 21 <i>Resultados del ancho (b) de las láminas magnéticas para seis escalones</i>	83
Tabla 22 <i>Resultados de la altura (c) de las láminas magnéticas para seis escalones</i>	83
Tabla 23 <i>Ángulos para siete escalones</i>	88
Tabla 24 <i>Cálculo de los parámetros de las chapas magnéticas según el tipo de aislamiento para siete escalones</i>	90
Tabla 25 <i>Resultados de base y altura de las láminas magnéticas de hierro de granos orientados convencionales mejorados para siete escalones</i>	92
Tabla 26 <i>Resultados de base y altura de las láminas magnéticas para siete escalones</i>	92

Tabla 27 <i>Ángulos para seis escalones</i>	97
Tabla 28 <i>Ángulos para dos escalones</i>	97
Tabla 29 <i>Cálculo de los parámetros de las láminas magnéticas de acero de grano orientado convencional mejorado para ocho escalones</i>	99
Tabla 30 <i>Resultados de base de las chapas magnéticas para ocho escalones</i>	101
Tabla 31 <i>Resultados altura de las chapas magnéticas para ocho escalones.</i>	102
Tabla 32 <i>Ángulos para nueve escalones</i>	107
Tabla 33 <i>Ángulos para nueve escalones</i>	107
Tabla 34 <i>Cálculo de los parámetros de las láminas magnéticas de acero de grano orientado convencional mejorado para nueve escalones</i>	109
Tabla 35 <i>Resultados de dimensiones de base de las chapas magnéticas para nueve escalones</i>	111
Tabla 36 <i>Resultados de las dimensiones altura de las chapas magnéticas para nueve escalones</i>	111
Tabla 37 <i>Ángulos calculados para cinco escalones</i>	117
Tabla 38 <i>Ángulos calculados para cinco escalones</i>	117
Tabla 39 <i>Cálculo de los parámetros de las chapas magnéticas según el tipo de aislamiento para diez escalones</i>	119
Tabla 40 <i>Resultados de base de las chapas magnéticas para diez escalones</i>	121
Tabla 41 <i>Resultados altura de las láminas magnéticas para diez escalones.</i>	122
Tabla 42 <i>Propiedades del acero M 105-23 S AM FCE</i>	128
Tabla 43 <i>Propiedades del acero M 114-27 S AM FCE</i>	128
Tabla 44 <i>Propiedades del acero M 117-30 S AM FCE</i>	128
Tabla 45 <i>Propiedades M 125-35 S AM FCE</i>	128
Tabla 46 <i>Dimensionamiento Angular óptima para 10 escalones del núcleo</i>	137
Tabla 47 <i>Sección neta del núcleo para cada escalón y factor de apilamiento para el material M 105-23 S</i>	138
Tabla 48 <i>Relación entre el número de escalones, el factor de utilización y el peso</i>	142
Tabla 49 <i>Relación entre número de escalones y factor de utilización para dos tipos de materiales magnéticos</i>	144

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Sección circular del núcleo del transformador con “n” escalones</i>	18
Figura 2 <i>Organigrama del cálculo teórico de las abscisas que dan área máxima</i>	21
Figura 3 <i>Dimensiones del núcleo escalonado y el factor de utilización para varios escalones</i>	24
Figura 4 <i>Propiedades del material M105-23S AM FCE (espesor 0,23 mm) generadas en MATLAB</i>	25
Figura 5 <i>Propiedades del material M114-27S AM FCE (espesor 0,27 mm) generadas en MATLAB</i>	25
Figura 6 <i>Propiedades del material M117-30 S AM FCE (espesor 0,30 mm) generadas en MATLAB</i>	26
Figura 7 <i>Propiedades del material M117-30 S AM FCE (espesor 0,30 mm) generadas en MATLAB</i>	26
Figura 8 <i>Dimensiones de los escalones</i>	27
Figura 9 <i>Dimensiones de escalones para transformadores de distribución y el correspondiente factor de utilización</i>	29
Figura 10 <i>Área transversal del núcleo para un escalón inscrito dentro del círculo</i>	38
Figura 11 <i>Instrucciones en Matlab para calcular el ángulo óptimo de un escalón</i>	39
Figura 12 <i>Solución en Matlab para calcular el ángulo óptimo de un escalón.....</i>	39
Figura 13 <i>Código en Matlab para calcular la sección geométrica del núcleo del transformador de un escalón</i>	40
Figura 14 <i>Solución en Matlab para la sección geométrica del núcleo del transformador de un escalón</i>	40
Figura 15 <i>Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de un escalón para materiales de grano orientado convencionales mejorados</i>	42
Figura 16 <i>Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de un escalón</i>	42
Figura 17 <i>Código en Matlab para calcular los valores de los ángulos de nuestros escalones del núcleo del transformador de un escalón.....</i>	43
Figura 18 <i>Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de un escalón.</i>	43
Figura 19 <i>Área transversal del núcleo para dos escalones inscrito dentro del círculo</i>	44
Figura 20 <i>Instrucciones en Matlab para calcular el ángulo óptimo de dos escalones</i>	45

Figura 21 Solución en Matlab para calcular el ángulo óptimo de dos escalones.....	46
Figura 22 Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de dos escalones	47
Figura 23 Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de dos escalones	48
Figura 24 Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de dos escalones para materiales de grano orientado convencionales mejorados	49
Figura 25 Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de dos escalones	49
Figura 26 Código en Matlab para calcular los valores de las láminas de los escalones del núcleo del transformador de dos escalones	50
Figura 27 Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de dos escalones	51
Figura 28 Área transversal del núcleo para tres escalones inscrito dentro del círculo.....	52
Figura 29 Instrucciones en Matlab para calcular el ángulo óptimo de tres escalones.....	53
Figura 30 Solución en Matlab para calcular el ángulo óptimo de tres escalones.	54
Figura 31 Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de tres escalones.....	55
Figura 32 Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de tres escalones.....	55
Figura 33 Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de tres escalones para acero de grano orientado convencionales mejorados.	56
Figura 34 Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de tres escalones.....	57
Figura 35 Código en Matlab para calcular las dimensiones de los escalones del núcleo del transformador para tres escalones	58
Figura 36 Solución en Matlab para calcular las dimensiones de los escalones del núcleo del transformador para tres escalones	58
Figura 37 Área transversal del núcleo para cuatro escalones inscrito dentro del círculo ...	59
Figura 38 Instrucciones en Matlab para calcular el ángulo óptimo de cuatro escalones	61
Figura 39 Solución en Matlab para calcular el ángulo óptimo de cuatro escalones.....	61
Figura 40 Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor	

<i>de hierro del núcleo del transformador de cuatro escalones</i>	<i>62</i>
Figura 41 <i>Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de cuatro escalones</i>	<i>63</i>
Figura 42 <i>Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de cuatro escalones para materiales de grano orientado convencionales mejorados</i>	<i>64</i>
Figura 43 <i>Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de cuatro escalones</i>	<i>64</i>
Figura 44 <i>Código en Matlab para calcular los valores de los ángulos de los 4 escalones ..</i>	<i>65</i>
Figura 45 <i>Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de cuatro escalones</i>	<i>66</i>
Figura 46 <i>Área transversal del núcleo para cinco escalones inscrito dentro del círculo</i>	<i>67</i>
Figura 47 <i>Instrucciones en Matlab para calcular el ángulo óptimo de cinco escalones</i>	<i>68</i>
Figura 48 <i>Solución en Matlab para calcular el ángulo óptimo de cinco escalones.....</i>	<i>69</i>
Figura 49 <i>Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de cinco escalones</i>	<i>70</i>
Figura 50 <i>Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de cinco escalones</i>	<i>70</i>
Figura 51 <i>Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de cinco escalones para materiales de grano orientado convencionales mejorados.</i>	<i>71</i>
Figura 52 <i>Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de cinco escalones</i>	<i>72</i>
Figura 53 <i>Código en Matlab para calcular los valores de los ángulos de nuestros escalones del núcleo del transformador de cinco escalones.....</i>	<i>73</i>
Figura 54 <i>Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de cinco escalones.</i>	<i>73</i>
Figura 55 <i>Área transversal del núcleo para seis escalones inscrito dentro del círculo.....</i>	<i>75</i>
Figura 56 <i>Instrucciones en Matlab para calcular el ángulo óptimo de seis escalones.....</i>	<i>76</i>
Figura 57 <i>Solución en Matlab para calcular el ángulo óptimo de seis escalones.</i>	<i>77</i>
Figura 58 <i>Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de seis escalones.....</i>	<i>78</i>
Figura 59 <i>Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de seis escalones.....</i>	<i>79</i>

Figura 60 Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de seis escalones para materiales de grano orientado convencionales mejorados.	80
Figura 61 Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de seis escalones.....	81
Figura 62 Código en Matlab para calcular los valores de los ángulos de los escalones del núcleo del transformador de seis escalones	82
Figura 63 Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de seis escalones.....	82
Figura 64 Área transversal del núcleo para siete escalones inscrito dentro del círculo	84
Figura 65 Instrucciones en Matlab para calcular el ángulo óptimo de siete escalones	86
Figura 66 Solución en Matlab para calcular el ángulo óptimo de siete escalones.	86
Figura 67 Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de siete escalones	87
Figura 68 Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de siete escalones	88
Figura 69 Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de siete escalones para materiales de grano orientado convencionales mejorados	89
Figura 70 Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de siete escalones	89
Figura 71 Solución Código en Matlab para calcular los valores de los ángulos óptimos de los escalones del núcleo del transformador de siete escalones.....	91
Figura 72 Respuestas en Matlab del cálculo de la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de siete escalones.....	91
Figura 73 Área transversal del núcleo para ocho escalones inscrito dentro del círculo	93
Figura 74 Instrucciones en Matlab para calcular el ángulo óptimo para ocho escalones ...	95
Figura 75 Solución en Matlab para calcular el ángulo óptimo de ocho escalones.....	95
Figura 76 Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de ocho escalones.....	96
Figura 77 Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de ocho escalones.	97
Figura 78 Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de ocho escalones para materiales de grano	

<i>orientado convencionales mejorados</i>	98
Figura 79 <i>Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de ocho escalones.</i>	98
Figura 80 <i>Código en Matlab para calcular los valores de los ángulos de nuestros escalones del núcleo del transformador de ocho escalones.....</i>	100
Figura 81 <i>Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de ocho escalones.</i>	101
Figura 82 <i>Área transversal del núcleo para nueve escalones inscrito dentro del círculo ..</i>	103
Figura 83 <i>Instrucciones en Matlab para calcular el ángulo óptimo de nueve escalones ...</i>	105
Figura 84 <i>Solución en Matlab para calcular el ángulo óptimo de nueve escalones</i>	105
Figura 85 <i>Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de nueve escalones</i>	106
Figura 86 <i>Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de nueve escalones.</i>	107
Figura 87 <i>Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de nueve escalones para materiales de grano orientado convencionales mejorados</i>	108
Figura 88 <i>Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de nueve escalones</i>	108
Figura 89 <i>Código en Matlab para calcular los valores de los ángulos de nuestros escalones del núcleo del transformador de nueve escalones</i>	110
Figura 90 <i>Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de nueve escalones</i>	110
Figura 91 <i>Área transversal del núcleo para diez escalones inscrito dentro del círculo</i>	112
Figura 92 <i>Instrucciones en Matlab para calcular el ángulo óptimo de diez escalones</i>	114
Figura 93 <i>Solución en Matlab para calcular el ángulo óptimo de diez escalones.....</i>	114
Figura 94 <i>Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de diez escalones</i>	116
Figura 95 <i>Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de diez escalones</i>	116
Figura 96 <i>Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de diez escalones para materiales de grano orientado convencionales mejorados.</i>	118
Figura 97 <i>Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor</i>	

<i>de hierro del núcleo del transformador de diez escalones</i>	<i>118</i>
Figura 98 <i>Código en Matlab para calcular los valores de los ángulos de nuestros escalones del núcleo del transformador de diez escalones.</i>	<i>120</i>
Figura 99 <i>Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de diez escalones.</i>	<i>121</i>
Figura 100 <i>Interfaz gráfica del usuario para determinar el dimensionamiento del núcleo del transformador</i>	<i>125</i>
Figura 101 <i>Ventana de entrada de datos iniciales</i>	<i>126</i>
Figura 102 <i>Gráfica para el cálculo del diámetro D del núcleo en función de la potencia aparente</i>	<i>129</i>
Figura 103 <i>Gráfica del corte de columna, con los ángulos óptimos, dimensiones de 4 escalones</i>	<i>130</i>
Figura 104 <i>Ventana de presentación de resultados de corte de escalones de la columna ..</i>	<i>131</i>
Figura 105 <i>La ventana de crear gráficas de armado al solape para cada escalón</i>	<i>131</i>
Figura 106 <i>Dimensiones de las láminas del núcleo para el caso de 4 escalones en armado al solape</i>	<i>132</i>
Figura 107 <i>Ventana de resumen de datos del núcleo caso de cuatro escalones del acero M 110-23S</i>	<i>134</i>
Figura 108 <i>Cuadro de dimensiones, volumen, peso y pérdidas por láminas y escalones ...</i>	<i>134</i>
Figura 109 <i>Relación gráfica entre los escalones dimensionados óptimos y la sección neta del núcleo</i>	<i>138</i>
Figura 110 <i>Comparación geométrica: núcleo escalonado y círculo circunscrito</i>	<i>140</i>
Figura 111 <i>Relación entre el número de escalones y el factor de utilización fu</i>	<i>142</i>
Figura 112 <i>Relación entre número de escalones y factor de utilización para dos tipos de materiales magnéticos</i>	<i>145</i>

RESUMEN

La presente investigación analiza el impacto del dimensionamiento angular óptimo en la determinación del factor de utilización del núcleo escalonado de transformadores de distribución, mediante el uso de herramientas de modelado en Matlab. El problema de investigación se formuló en los siguientes términos: ¿De qué manera el dimensionamiento angular óptimo influye en la determinación del factor de utilización del núcleo escalonado de un transformador de distribución, con asistencia de Matlab? A partir de esta pregunta, el objetivo general consistió en analizar el dimensionamiento angular óptimo y determinar el factor de utilización del núcleo escalonado, utilizando procedimientos computacionales que permitan simular distintas configuraciones geométricas del núcleo magnético. La hipótesis central plantea que un dimensionamiento angular óptimo maximiza la utilización del material magnético y mejora la precisión en la estimación del factor de utilización del núcleo escalonado. La metodología adoptada corresponde a un enfoque mixto, al integrar análisis cuantitativos y cualitativos. Se trata de una investigación aplicada de carácter tecnológico, dado que traduce fundamentos teóricos en soluciones prácticas, y de nivel descriptivo-explicativo, al abordar las causas y efectos derivados de los escalonamientos geométricos en el núcleo magnético. Los resultados evidencian que el cálculo angular óptimo permitió obtener dimensiones precisas ($b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9, b_{10} \dots; c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_9, c_{10}$) para cada escalón, en función del diámetro D del círculo circunscrito, así como los ángulos óptimos correspondientes ($\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta, \eta, \Theta, \iota, \kappa$).

Palabras clave: Dimensionamiento angular óptimo, Factor de utilización, Núcleo escalonado, Transformadores de distribución, Modelado computacional y Matlab.

ABSTRACT

This research analyzes the impact of optimal angular sizing on determining the utilization factor of the stepped core of distribution transformers, using modeling tools in Matlab. The research problem was formulated in the following terms: How does optimal angular sizing influence the determination of the utilization factor of the stepped core of a distribution transformer, with the assistance of Matlab? From this question, the general objective was to analyze optimal angular sizing and determine the utilization factor of the stepped core, using computational procedures that allow simulating different geometric configurations of the magnetic core. The central hypothesis is that optimal angular sizing maximizes the utilization of magnetic material and improves the accuracy in estimating the utilization factor of the stepped core. The methodology adopted corresponds to a mixed approach, integrating quantitative and qualitative analyses. This is an applied research of a technological nature, since it translates theoretical foundations into practical solutions, and of a descriptive-explanatory level, since it addresses the causes and effects derived from geometric staggering in the magnetic core. The results show that the optimal angular calculation allowed obtaining precise dimensions ($b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9, b_{10} \dots; c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_9, c_{10}$) for each step, based on the diameter D of the circumscribed circle, as well as the corresponding optimal angles ($\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta, \eta, \Theta, \iota, \kappa$).

Keywords: Optimal angular sizing, Utilization factor, Stepped core, Distribution transformers, Computational modeling and Matlab.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Situación problemática

El diseño del transformador y su correspondiente dimensionamiento implican un conjunto de procesos que inciden en cada uno de los componentes del transformador, visto desde una óptica del modelo se puede citar al circuito eléctrico, magnético, dieléctrico, mecánico, térmico y alguno más que pueda integrarse; en este escenario, el circuito magnético cobra importancia debido a que se constituye en la fuente de la fuerza magnetomotriz (f.m.m) que produce el flujo magnético (Φ) que es la encargada de procesar la tensión inducida (E) recorriendo una estructura ferromagnética denominada núcleo y cuya estructura es escalonada y debe ofrecer alta permeabilidad (P) al paso del flujo magnético.

El núcleo del transformador requiere “para su dimensionamiento conocer muchas variables operativas del transformador, siendo algunas de ellas la potencia (P), frecuencia (f), densidad de flujo (B), tipo de material ferromagnético (aceros de grano orientado), factor de apilamiento (f.a.), espesor de lámina (τ), tensión eléctrica (E), diámetro del círculo inscrito de la bobina (D) (Harlow, 2012, p. 87). Por otra parte, Kulkarni indica que “integrar estos parámetros geométricos y operativos en ecuaciones de cálculo diferencial para maximizar y lograr dimensionar el núcleo con los métodos tradicionales de por sí constituye una dificultad lo que vuelve el proceso de diseño lento y susceptible a errores si se hace con métodos convencionales. (Kulkarni & Khaparde, 2004, p. 213).

En ese sentido, el proceso de dimensionamiento y optimización del núcleo escalonado de estos transformadores presenta desafíos significativos al utilizar herramientas convencionales o cálculo manual. Estas dificultades se ven agravadas por la complejidad del proceso de optimización y la necesidad de determinar un *factor de utilización* (K_o) adecuado que tenga en cuenta los múltiples parámetros y variables de diseño del núcleo escalonado, además requiere valores específicos para cada escalón solicitado, y exige el desarrollo de un conjunto de procesos iterativos para diferentes condiciones iniciales de entrada o variables input anteriormente señaladas, en estas condiciones el uso de herramientas o métodos convencionales implica una inversión de tiempo y posibles errores de cálculo.

La importancia de este *factor de utilización* entre otros aspectos permite según Corrales

“determinar la sección neta o útil de las columnas del núcleo para diferentes números de escalones propuestos, así como también el volumen del núcleo, peso y pérdidas del material magnético es parte importante en el cálculo de la tensión inducida, un error en su cálculo genera dimensiones incorrectas y diseños ineficientes que perjudican la tensión inducida y el rendimiento del transformador” (Corrales, 1976, p. 142).

Igualmente, La determinación imprecisa del factor de utilización en el diseño de transformadores de distribución constituye un error crítico que compromete directamente la viabilidad geométrica y la integridad electromagnética de la máquina. Por un lado, si se subestima este factor, se asume erróneamente que el cobre y el aislamiento ocuparán un espacio menor al real, lo que conduce al diseño de una ventana del núcleo físicamente demasiado pequeña que impide el paso y correcto ensamblaje de las bobinas en el taller de manufactura (McLyman, 2011). Asimismo, un cálculo erróneo del factor de apilamiento sobreestima la sección transversal neta de acero disponible, induciendo una saturación magnética temprana al operar en densidades de flujo que superan los límites del material (Fitzgerald et al., 2003). Esta saturación dispara drásticamente las corrientes de magnetización y las pérdidas por histéresis, provocando un calentamiento térmico acelerado que degrada prematuramente el aislamiento de los devanados (Chapman, 2012).

Por otro lado, la sobreestimación del factor de utilización al proyectar un escenario teóricamente perfecto e irreproducible en la práctica obliga a un sobredimensionamiento general del núcleo para poder albergar los conductores (McLyman, 2011). Este incremento innecesario en las dimensiones físicas separa en exceso los devanados, lo que aumenta el flujo de dispersión, eleva significativamente la reactancia de dispersión y empeora la regulación de voltaje del transformador bajo carga (Kulkarni y Khaparde, 2004). Finalmente, un núcleo mal optimizado que carece de una perfecta compactación geométrica deja espacios vacíos que merman la estabilidad del conjunto; ante las brutales fuerzas electrodinámicas originadas por un evento de cortocircuito, la falta de sujeción hermética puede provocar desplazamientos, vibraciones severas y deformaciones destructivas en las bobinas (Harlow, 2012).

En este contexto, se investiga la manera en que el *dimensionamiento angular* determina el cálculo del *factor de utilización* abordando las dificultades que se presentan en la maximización de las dimensiones y la solución de las ecuaciones diferenciales en diferentes condiciones y escalones del núcleo; para abordar estas dificultades se propone el uso y la aplicación del Matlab como plataforma de programación y cálculo numérico, que permita el *dimensionamiento angular óptimo* y luego determinar el *factor de utilización* y lograr un adecuado dimensionamiento del núcleo escalonado del transformador de distribución, para tal efecto proponemos el siguiente título: “Dimensionamiento angular óptimo y determinación del factor de utilización del núcleo escalonado del transformador de distribución, con asistencia del Matlab”.

1.2 Formulación del problema

El problema planteado se formula de la siguiente manera:

1.2.1 Problema general

¿De qué manera el dimensionamiento angular óptimo incide en la determinación del factor de utilización del núcleo escalonado del transformador de distribución, con asistencia del Matlab?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cómo influye la aplicación del lenguaje de programación Matlab en el dimensionamiento angular óptimo del núcleo escalonado del transformador de distribución?
- ¿De qué manera influye el número de escalones en la determinación del factor de utilización del núcleo escalonado del transformador de distribución?

1.3 Justificación del problema

1.3.1 Teórica

Del Vecchio et al. (2010) explican:

El diseño geométrico del núcleo implica la consideración rigurosa de diferentes parámetros tales como la distribución angular de los escalonamientos y la correcta evaluación del área magnética útil. Estos elementos son fundamentales para estimar la tensión inducida, las pérdidas y el rendimiento general del transformador, por lo que errores en su determinación afectan directamente el comportamiento electromagnético del equipo. El ámbito teórico del dimensionamiento de los escalones debe mostrar precisión y exactitud, utilizando modelos teóricos y principios físicos establecidos en una amplia gama de condiciones operativas (p.54).

Asimismo, la necesidad de mitigar las severas deficiencias operativas y geométricas inherentes al diseño tradicional de transformadores de distribución. Al abordar el cálculo preciso del factor de utilización (tanto del núcleo magnético como de la ventana de conductores), se establece una base de diseño robusta que evita de forma directa la saturación magnética temprana, el sobrecalentamiento dieléctrico y la inestabilidad estructural ante esfuerzos de cortocircuito (McLyman, 2011; Fitzgerald et al., 2003). La optimización de este factor no constituye únicamente una mejora geométrica, sino una solución directa para reducir la reactancia y los flujos de dispersión bajo condiciones de carga extrema (Kulkarni y Khaparde, 2004). En consecuencia, un dimensionamiento riguroso y óptimo del núcleo escalonado se traduce en un incremento directo de la vida útil de los materiales de aislamiento y en un aumento sustancial de la confiabilidad operativa del sistema eléctrico.

Desde una perspectiva de viabilidad y beneficio económico, esta investigación se sustenta sólidamente en los hallazgos de Flamini Marczuk y Segundo Sainz (Universidad Nacional de Mar del Plata), quienes demostraron que la transición desde el cálculo tradicional hacia herramientas avanzadas de optimización geométrica permite alcanzar una reducción del **21.6% en las pérdidas totales** de la máquina. Este enfoque no solo incrementa la eficiencia energética del equipo en vacío y bajo carga, sino que genera un ahorro financiero real del **12.90% en costos de materiales** frente a tecnologías comerciales convencionales de cobre como Tubo Trans Electric, y de hasta un **15.26%** frente a tecnologías comerciales de aluminio como Alfamar.

Asimismo, la justificación metodológica y de diseño se respalda en las investigaciones de pérdidas por flujos de dispersión desarrolladas por el Grupo de Investigación en Alta Tensión (GRALTA) de la Universidad del Valle. Sus análisis confirman que una correcta distribución del dimensionamiento escalonado no solo optimiza el núcleo magnético, sino que reduce de forma contundente las pérdidas adicionales en las paredes de la cuba o tanque. Al aplicar un adecuado diseño por escalonamiento físico de pantallas magnéticas, es viable mitigar las pérdidas remanentes del tanque en un **25.6% utilizando configuraciones de un escalón, y hasta en un 51.56% mediante un diseño optimizado de tres escalones** (Cadavid et al., 2011).

De este modo, la formulación de una metodología precisa para el cálculo del factor de utilización y el correcto dimensionamiento del núcleo escalonado se justifica plenamente como un aporte científico crucial para el desarrollo de transformadores de alta eficiencia, bajo costo de manufactura y pérdidas energéticas mínimas.

1.3.2 Metodológica

La adopción de nuevos métodos modernos para la determinación de las dimensiones de los escalones del núcleo del transformador ofrece ventajas significativas en términos de eficiencia, precisión y confiabilidad en comparación con los métodos clásicos tradicionales. Esta transición hacia enfoques tecnológicos avanzados es fundamental para mejorar la calidad y la eficacia del diseño de núcleos de los transformadores eléctricos en la era moderna de la ingeniería eléctrica. Los métodos clásicos, como el uso de tablas y curvas, pueden requerir un considerable tiempo y esfuerzo para buscar y encontrar la información relevante, así como para realizar interpolaciones y cálculos manuales. En contraste, los nuevos métodos computacionales ofrecen la posibilidad de automatizar y acelerar significativamente el proceso de análisis y diseño del transformador, lo que conduce a una mejora notable en el dimensionamiento del transformador.

Los métodos clásicos pueden estar sujetos a errores humanos durante el proceso de búsqueda, interpretación y extrapolación de datos de tablas, curvas y gráficas. Además, la precisión de estos métodos puede verse limitada por la calidad de los datos disponibles en las fuentes utilizadas. Por otro lado, los nuevos métodos modernos, basados en técnicas de modelado y simulación, permiten realizar cálculos precisos y detallados que tienen en cuenta una amplia gama de variables y condiciones, lo que resulta en una mayor precisión en la determinación de las dimensiones de los escalones del núcleo del transformador.

Los métodos clásicos también pueden estar sujetos a la disponibilidad y la calidad de las tablas y curvas utilizadas, así como a la interpretación subjetiva de los datos por parte del usuario. Esto puede dar lugar a resultados inconsistentes y poco confiables. En contraste, los nuevos métodos modernos ofrecen resultados más confiables y reproducibles al eliminar la dependencia de fuentes externas y algoritmos sujetos a interpretación humana, lo que aumenta la confiabilidad del proceso de diseño del núcleo del transformador.

1.3.3 Tecnológica

Al respecto Harlow (2012) señala que:

El diseño tecnológico de los núcleos de transformadores se fundamenta en la aplicación rigurosa de la teoría electromagnética y del comportamiento de los materiales ferromagnéticos, ya que estos principios permiten transformar conceptos científicos en soluciones prácticas y eficientes. En este proceso, el *dimensionamiento angular óptimo* constituye un elemento clave para definir la geometría escalonada del núcleo, optimizando la distribución del flujo magnético y reduciendo pérdidas asociadas a configuraciones no ajustadas a la forma ideal circunscrita. Del mismo modo, el *factor de utilización* se vuelve determinante para establecer la sección neta aprovechable del núcleo, garantizando que el material magnético sea empleado con la mayor eficiencia posible. Por tanto, comprender cómo interactúan los materiales magnéticos y el flujo en el núcleo permite a los ingenieros mejorar la precisión del diseño y desarrollar transformadores con mayor eficiencia y confiabilidad operacional. En consecuencia, la integración de estas dos variables constituye un soporte tecnológico esencial para el diseño moderno de transformadores de distribución (p.54).

Si bien la teoría proporciona una base sólida para el diseño, la práctica también desempeña un papel crucial en la validación de los modelos teóricos y en la mejora continua de los diseños. La combinación de teoría y práctica permite identificar áreas de mejora y perfeccionar los modelos teóricos para reflejar con mayor precisión el comportamiento real de los transformadores. La aplicación de la teoría en la práctica impulsa el avance tecnológico al facilitar la exploración de nuevos materiales, geometrías y técnicas de fabricación para los núcleos de transformadores. Esto conduce al desarrollo de transformadores más eficientes, compactos y confiables que sean capaces de satisfacer las demandas cada vez mayores de las redes eléctricas de distribución modernas.

1.4 Limitaciones de la investigación

Se consideran las limitaciones siguientes:

- Acceso limitado a la información especializada de diseño y manufactura de transformadores, algunas empresas consideran que es una información clasificada y que es parte del *know how* empresarial y se consideran activos intangibles.
- La potencia de diseño de los núcleos escalonados estará entre los rangos menores de 500 KVA, tomando en cuenta que los referidos rangos son los denominados transformadores de distribución; sin embargo, la corporación FONAFE indica en

el documento “Especificaciones técnicas del comité de normalización de bienes eléctricos” que en distribución puede extenderse la potencia del transformador hasta 630 KVA.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Analizar el dimensionamiento angular óptimo y determinar el factor de utilización del núcleo escalonado del transformador de distribución, con asistencia del Matlab.

1.5.2 Objetivos específicos

- Determinar mediante el método convencional y el lenguaje de programación Matlab las dimensiones angulares óptimos y reales del núcleo para diferentes escalones del transformador de distribución
- Evaluar el factor de utilización para diferentes números de escalones del núcleo del transformador de distribución para verificar los rangos de variabilidad e incidencia.

1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis general

La hipótesis que se formula para el presente proyecto es:

“El dimensionamiento angular óptimo permite maximizar la utilización del material magnético y lograr mayor precisión en los valores del factor de utilización del núcleo escalonado del transformador de distribución, con asistencia del Matlab”

1.6.2 Hipótesis específicas

- La aplicación del lenguaje de programación Matlab en el dimensionamiento angular óptimo del núcleo escalonado del transformador permite mayor eficiencia y reducción de tiempos, así como una facilidad iterativa y manipulación de datos.
- El incremento del número de escalones en el núcleo del transformador de distribución influye en el factor de utilización del núcleo considerando los factores de apilamiento, espesor de láminas y tipo de material magnético utilizado.

1.7 Variables e indicadores

1.7.1 Variable independiente e indicadores

Esta variable es conocida como la causa del problema, en el proyecto se considera el siguiente:

Dimensionamiento angular óptimo

Indicadores:

- Número de escalones

- Número de láminas
- Espesor de láminas

1.7.2 Variable dependiente

Esta variable es conocida como efecto del problema, en el proyecto se considera el siguiente:

Factor de utilización

Indicadores:

- Dimensiones del escalón
- Factor de apilamiento

1.7.3 La operacionalización de variables

Este proceso permite definir conceptualmente cada variable, establecer sus respectivas dimensiones y, finalmente, identificar los indicadores correspondientes tanto de la variable independiente como de la dependiente, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1
Matriz de operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Operacionalización			Escala de medición
			Dimensiones	Indicadores	Índice	
Variable independiente: Dimensionamiento angular optimo	La sección circular del núcleo del transformador debe aproximarse mediante paquetes de chapas que formen escalones. Las láminas que componen el núcleo deben cortarse en los tamaños previamente determinados. Sin embargo, no es posible ajustar con exactitud los valores teóricos, por lo que estos deben redondearse a un número entero de milímetros. Por ejemplo, en el presente trabajo, al cuantificar el valor en milímetros, se ha incorporado la condición de que dicho valor sea el número entero más cercano. Por razones constructivas, es necesario limitar la altura del último escalón con el fin de permitir la inserción de placas aislantes que aislen el núcleo respecto a las placas de sujeción que se instalarán posteriormente (García y Jordana, 1972).	Este dimensionamiento consiste en aproximar la sección transversal circular ideal del núcleo mediante un conjunto de paquetes de chapas magnéticas escalonadas, dispuestas en forma de polígono regular de múltiples lados (escalones). Cada escalón está compuesto por láminas de acero al silicio de espesor controlado, cortadas con ángulos y dimensiones específicas para minimizar el espacio entre el área circular teórica y el área poligonal construida.	Configuración de los paquetes de chapas escalonados o número de escalones. Características de los materiales magnéticos utilizados en la manufactura de los núcleos de los transformadores de distribución.	• Número de escalones • Número de láminas • Espesor de láminas	Número entero de escalones ≥ 1 Número entero de láminas por escalón Espesor en mm (ej: 0.35 mm, 0.5 mm)	Razón
Variable dependiente: Factor de utilización del núcleo escalonado	El factor de utilización (k_o) se expresa mediante la ecuación $k_o = f_a \times f_f \times f_p$, donde: k_o = factor de utilización; f_a = factor de apilado; f_f = factor de forma; y f_p = factor de proporcionalidad. Los factores mencionados son determinantes en el cálculo del factor de utilización. Además, se presenta una tabla ilustrativa que cuantifica las dimensiones de los escalones y los factores de utilización del núcleo para diferentes configuraciones de escalones (Dimenna y Stecca, 2015).	El factor de utilización (k_o) en los transformadores es un indicador de eficiencia que cuantifica el aprovechamiento del área transversal del núcleo magnético para aproximarse a una sección circular ideal mediante escalones. Se calcula como $k_o = f_a \times f_f \times f_p$, donde: k_o = factor de utilización; f_a = factor de apilado; f_f = factor de forma; y f_p = factor de proporcionalidad. Este factor optimiza el uso del material magnético al reducir las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas, minimiza el espacio no utilizado entre el núcleo escalonado y la sección circular ideal, e incide directamente en el rendimiento y el costo del transformador.	Las dimensiones de los escalones, expresadas en función del diámetro circunscrito del paquete de láminas Características de los materiales magnéticos utilizados en la manufactura de los núcleos de los transformadores de distribución.	• Dimensiones del escalón • Factor de apilamiento	Área geométrica del escalón: $A_g = a \times h$ Área del hierro $A_n = A_g \times f_a$ $f_f = \text{perímetro del escalón} / \text{perímetro de la sección circular ideal}$ Chapas de grano orientada $f_a \approx 0.90 - 0.95$.	Razón

Nota. *Elaboración propia*

1.8 Metodología

1.8.1 Enfoque, tipo y nivel de la investigación

De acuerdo con Hernández-Sampieri et al., (2021), *“los enfoques de investigación se clasifican en cuantitativo, cualitativo y mixto; el enfoque mixto representa la integración sistemática de los dos anteriores en un solo estudio”* (p. 51). Por tanto, el presente estudio adopta un enfoque mixto, ya que integra procedimientos cuantitativos mediante el análisis de parámetros técnicos y resultados numéricos y procedimientos cualitativos al considerar la interpretación de datos técnicos y entrevistas con especialistas, permitiendo así una comprensión más completa del fenómeno investigado.

Según el tipo de investigación, se enmarca dentro de la investigación aplicada tecnológica, dado que busca la aplicación práctica de fundamentos teóricos en la solución de un problema específico. En palabras de Hernández-Sampieri et al., (2021), *“la investigación aplicada se orienta hacia la utilización del conocimiento para resolver problemas concretos”* (p. 113). En este caso, se aplicarán los conocimientos sobre dimensionamiento óptimo y factor de utilización del núcleo escalonado en transformadores de distribución, con el propósito de mejorar su eficiencia y desempeño.

En relación con el nivel de investigación, esta se clasifica como descriptiva-explicativa. Es descriptiva porque detalla las características técnicas del núcleo escalonado del transformador y explicativa porque analiza las causas y efectos derivados de su aplicación. Conforme lo indica Hernández-Sampieri et al., (2021), *“las investigaciones explicativas van más allá de la descripción de conceptos o fenómenos, pues se dirigen a responder por las causas de los eventos o fenómenos”* (p. 109). En ese sentido, el estudio no solo describe, sino que busca comprender los factores que inciden en el comportamiento técnico del transformador.

1.8.2 Unidad de análisis

La unidad de análisis de la presente investigación está constituida por el núcleo escalonado del transformador de distribución, elemento técnico central en el que se aplicará el proceso de dimensionamiento óptimo y análisis del factor de utilización. Este componente será objeto de observación, medición y evaluación para determinar su influencia en la eficiencia y el rendimiento del transformador.

1.8.3 Técnicas de recolección de información

Para el desarrollo de la investigación se emplearon diversas técnicas de recolección de información, junto con sus respectivos instrumentos, con el fin de garantizar la validez y fiabilidad de los datos obtenidos. De acuerdo con Hernández-Sampieri y Mendoza (2018), *“la elección de técnicas e instrumentos depende del enfoque adoptado y de los objetivos del estudio”* (p. 210).

Las técnicas e instrumentos aplicados fueron los siguientes:

- **Revisión bibliográfica:** se utilizó como instrumento las fichas bibliográficas, permitiendo recopilar información teórica y antecedentes científicos relacionados con el diseño y operación de transformadores de distribución.
- **Observación directa y adquisición de datos:** se empleó una guía de observación y una base de datos técnica para registrar parámetros experimentales y resultados de medición.
- **Entrevistas y consultas académicas:** se aplicaron una guía de entrevista y una guía de consulta estructurada, dirigidas a expertos y docentes especializados en ingeniería eléctrica, con el propósito de contrastar y validar los resultados obtenidos.

1.8.4 Técnicas de análisis e interpretación de la información

El análisis de la información se desarrolló considerando los enfoques cuantitativo y cualitativo, en correspondencia con la naturaleza mixta de la investigación. Para ello, los datos experimentales fueron procesados mediante herramientas estadísticas y simulaciones computacionales, con el propósito de identificar tendencias, relaciones y comportamientos relevantes que contribuyan a una comprensión integral del fenómeno estudiado.

De igual modo, se empleará el software Matlab como instrumento de apoyo para el procesamiento numérico, modelamiento y simulación de los parámetros eléctricos y magnéticos del núcleo escalonado del transformador de distribución. Este procedimiento permitirá analizar con precisión el desempeño del sistema bajo condiciones controladas, validar el dimensionamiento óptimo propuesto y comprobar la eficiencia del diseño desarrollado.

1.8.5 Matriz de consistencia

Tabla 2
Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	MÉTODOLOGIA
GENERAL	GENERAL	GENERAL	VARIABLE INDEPENDIENTE	Tipo y nivel de investigación Conforme al enfoque: investigación <i>mixta</i> Conforme a la utilidad: <i>tecnológica aplicada</i> conforme con el nivel: Descriptiva- <i>Explicativa</i>
¿De qué manera el dimensionamiento angular óptimo incide en la determinación del factor de utilización del núcleo escalonado del transformador de distribución, con asistencia del Matlab?	Analizar el dimensionamiento angular óptimo y determinar el factor de utilización del núcleo escalonado del transformador de distribución, con asistencia del Matlab.	El dimensionamiento angular óptimo permite maximizar la utilización del material magnético e incide en lograr mayor precisión en los valores del factor de utilización del núcleo escalonado del transformador de distribución, con asistencia del Matlab.	“Dimensionamiento angular del núcleo escalonado” Indicadores: • Número de escalones • Número de láminas • Espesor de láminas	Unidad de análisis El núcleo escalonado del transformador de distribución.
ESPECÍFICAS	ESPECÍFICAS	ESPECÍFICAS	VARIABLE DEPENDIENTE	Técnicas de recolección de información Para el desarrollo de la investigación se emplearon las siguientes técnicas, junto con sus respectivos instrumentos:
PE1. ¿Cómo influye la aplicación del lenguaje de programación Matlab en el dimensionamiento angular óptimo del núcleo escalonado del transformador de distribución?	OE1. Determinar mediante el método convencional y el lenguaje de programación Matlab las dimensiones angulares óptimas y reales del núcleo para diferentes escalones del transformador de distribución	HE1. La aplicación del lenguaje de programación Matlab en el dimensionamiento angular óptimo del núcleo escalonado del transformador influye en la mayor eficiencia y reducción de tiempos, así como una facilidad iterativa y manipulación de datos.	“Factor de utilización del núcleo escalonado” Indicadores • Dimensiones del escalón • Factor de apilamiento	• Revisión bibliográfica – Fichas bibliográficas. • Observación directa y adquisición de datos – Guía y base de datos. • Entrevistas y consultas académicas – Guía de entrevista y guía de consulta estructurada.
PE2. ¿De qué manera influye el número de escalones en la determinación del factor de utilización del núcleo escalonado del transformador de distribución?	OE2. Evaluar el factor de utilización para diferentes números de escalones del núcleo del transformador de distribución para verificar los rangos de variabilidad e incidencia.	HE2. El incremento del número de escalones en el núcleo del transformador de distribución influye en el factor de utilización del núcleo considerando los factores de apilamiento, espesor de láminas y tipo de material magnético utilizado		Técnicas de análisis e interpretación de la información Para el estudio de datos será necesario utilizar los diferentes niveles de estudios cuantitativo y cualitativo. También se utilizará asistencia de la interface de programación Matlab.

Nota. *Elaboración propia*

RESUMEN DEL CAPÍTULO I

El Capítulo I presenta los elementos fundamentales que sustentan la investigación sobre el *dimensionamiento angular óptimo y la determinación del factor de utilización del núcleo escalonado de un transformador de distribución*, desarrollada mediante modelamiento computacional en Matlab. Se inicia con la **situación problemática**, donde se describe la limitada eficiencia geométrica de los núcleos escalonados tradicionales, problemática que repercute en un uso deficiente del material magnético y en la imprecisión del factor de utilización. Se evidencia que el diseño convencional o tradicional, no considera adecuadamente la relación directa entre los ángulos de escalonamiento y el aprovechamiento del material, lo que justifica la necesidad de un análisis matemático-computacional más riguroso.

A partir de ello se formula el **problema general**, orientado a determinar de qué manera el *dimensionamiento angular óptimo* influye en la obtención de un *factor de utilización eficiente* del núcleo escalonado. Los **problemas específicos** desagregan esta interrogante centrándose en la relación entre los ángulos de cada escalón, el diámetro del círculo circunscrito y la geometría final del núcleo magnético.

La **justificación** se desarrolla en tres dimensiones:

- **Teórica**, al aportar fundamentos geométricos y electromagnéticos al estudio del escalonamiento del núcleo.
- **Metodológica**, al emplear Matlab como herramienta de simulación avanzada para obtener valores óptimos de ángulos y dimensiones.
- **Tecnológica**, al contribuir al diseño de transformadores más eficientes y al uso racional del acero magnético.

Asimismo, se reconocen las **limitaciones de la investigación**, vinculadas principalmente a la disponibilidad de modelos matemáticos y a la precisión de los algoritmos utilizados. Luego se plantean los **objetivos**, donde el objetivo general se complementa con objetivos específicos orientados al cálculo de ángulos óptimos, la obtención de las dimensiones ($b_1 \dots b_{10}$; $c_1 \dots c_{10}$) de cada escalón y la evaluación del comportamiento del factor de utilización.

Las **hipótesis** —general y específicas— afirman que el cálculo angular óptimo incrementa significativamente el factor de utilización y contribuye a un diseño más eficiente del núcleo escalonado, especialmente en los primeros niveles de escalonamiento. Las **variables** se estructuran en una variable independiente (dimensionamiento angular óptimo) y una variable dependiente (factor de utilización del núcleo), cada una con sus respectivos indicadores

claramente definidos en la matriz de operacionalización.

Finalmente, en el apartado metodológico se establece que la investigación adopta un **enfoque mixto**, de tipo **aplicado** y nivel **descriptivo-explicativo**, lo cual permite integrar modelamiento computacional y análisis conceptual. Se precisa la unidad de análisis, las técnicas de recolección y análisis de información, y se presenta la **matriz de consistencia** que articula el problema, los objetivos, la hipótesis y la metodología empleada. Este capítulo, en conjunto, brinda la estructura conceptual y metodológica que guía el desarrollo de la investigación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1 Antecedentes

Flores et al. (2021) realizaron una investigación titulada: *“Diseño del núcleo de un transformador trifásico para la reducción de pérdidas técnicas”*, con el fin de optar al título profesional de Ingeniero Electricista, en la Universidad Continental.

El estudio tuvo como **objetivo** desarrollar el diseño de un transformador trifásico de distribución orientado a reducir las pérdidas técnicas presentes en los sistemas eléctricos, buscando optimizar su eficiencia energética y disminuir los costos asociados a la energía disipada. La **metodología** aplicada correspondió a un enfoque tecnológico y de diseño experimental, empleando el método aplicado al diseño con un esquema factorial 2⁴, además del procedimiento de modelamiento VDI 2221. Para el proceso de simulación se utilizó el software ANSYS Maxwell, donde se evaluaron dieciséis combinaciones de variables a fin de identificar la alternativa con menor nivel de pérdidas de potencia. Los **resultados** evidenciaron que el modelo diseñado, de configuración cruciforme, con núcleo de material mumetal, bobinas de cobre y una tensión nominal de 13.2 kV, alcanzó un nivel de pérdidas de 4.6882 W, valor que se encuentra dentro de los márgenes establecidos por la norma internacional IEEE C57-12. Finalmente, se **concluyó** que el diseño propuesto logró una disminución significativa de las pérdidas técnicas frente a los transformadores convencionales, mejorando de manera notable la eficiencia global del sistema de distribución eléctrica y confirmando la pertinencia del enfoque metodológico empleado para el desarrollo del modelo.

Castro et al. (2015) en su pesquisa intitulada: *“Experiencia colombiana en reparación de núcleos de transformadores de potencia”*, publicada en la Revista Ingenierías Universidad de Medellín.

El estudio tuvo como **propósito** analizar las fallas presentadas en los núcleos de transformadores de potencia y diseñar procedimientos técnicos y metodológicos para su reparación parcial o total, con el fin de mejorar su eficiencia operativa y reducir las pérdidas en vacío. La **metodología** empleada consistió en la evaluación técnica de distintos casos atendidos por la empresa dedicada al mantenimiento y reparación de transformadores. Se aplicaron procedimientos sistemáticos para la selección del tipo de lámina, el método de corte, ensamblaje, ajuste y prensado del núcleo, complementados con cálculos de flujo magnético, pruebas de saturación, inspecciones termográficas y mediciones de pérdidas. Los **resultados** evidenciaron que las fallas más comunes estuvieron asociadas al mal corte del núcleo, dobles

aterrizamientos y deterioro del aislamiento entre láminas. Las intervenciones realizadas incluyeron el cambio de medio núcleo, el reaislamiento con fibras Nomex y el reemplazo total del núcleo cuando el daño era estructural. En todos los casos se registró una disminución significativa de las pérdidas en vacío y una mejora del desempeño térmico y eléctrico de los transformadores una vez reintegrados al servicio. En **conclusión**, el trabajo demostró que la correcta selección de materiales, junto con técnicas adecuadas de ensamblaje y prensado, es determinante para prolongar la vida útil de los transformadores y minimizar las pérdidas energéticas. Asimismo, validó la eficacia de los procedimientos de diagnóstico y reparación aplicados, consolidando un enfoque metodológico replicable en futuras intervenciones industriales.

Condori (2021) en su indagación que lleva por título: *“Estudio y elaboración de programas para la obtención del punto de máxima eficiencia del transformador eléctrico mediante Matlab”*, con el fin de optar al Título Profesional de Ingeniero Electricista.

Tuvo como **objetivo** representar gráficamente la eficiencia de un transformador de distribución en función del porcentaje de carga y del factor de potencia, con el propósito de identificar el punto de máxima eficiencia y comprender su comportamiento frente a diferentes condiciones de operación. El **método** consistió en la elaboración de dos programas informáticos: el primero calculó los parámetros del circuito equivalente del transformador a partir de los datos obtenidos en las pruebas de vacío y cortocircuito; el segundo generó y graficó la curva de eficiencia del transformador respecto a la potencia aparente de carga, considerando distintos factores de potencia. Los **resultados** evidenciaron que la eficiencia del transformador varió según la magnitud de la carga alimentada, disminuyendo notablemente cuando la carga era muy baja o muy elevada, y también cuando el factor de potencia se reducía. Cada curva obtenida representó un comportamiento distinto del transformador, permitiendo visualizar con precisión el punto de máxima eficiencia para cada condición de carga. En **conclusión**, se determinó que conocer la relación entre eficiencia, carga y factor de potencia resulta fundamental para la toma de decisiones técnicas y económicas, ya que permite optimizar el rendimiento de los transformadores de distribución y reducir las pérdidas energéticas en los sistemas eléctricos.

Sánchez (2009) en su pesquisa titulada: *“Diseño de un transformador de 5MVA, 33/11 kV Dyn11”*, proyecto fin de carrera, publicado en la Universidad Carlos III de Madrid.

Tuvo como **propósito general** analizar la complejidad que implica el diseño de un transformador de potencia de 5 MVA y establecer una visión general de los principales problemas técnicos involucrados, tanto los simples como los de mayor dificultad, proponiendo

soluciones aproximadas o metodologías adecuadas para su resolución. El **método** empleado consistió en una revisión comparativa de distintos enfoques de diseño descritos en manuales y obras especializadas publicadas entre 1957 y 2005, identificando las diferencias entre los métodos tradicionales basados en la experiencia, tablas y fórmulas empíricas y los métodos modernos, sustentados en cálculos numéricos y programas informáticos, especialmente mediante el uso del método de los elementos finitos. Los **resultados** evidenciaron que los diseños realizados con metodologías clásicas producen transformadores de dimensiones excesivas y con sobredimensionamiento de componentes, lo que incrementa su costo y reduce su eficiencia. Asimismo, se comprobó que las metodologías antiguas presentan una baja compatibilidad con los criterios de diseño actuales, debido a los avances tecnológicos, la aparición de nuevos materiales y la introducción de procedimientos de cálculo más precisos. En **conclusión**, se determinó que el diseño de transformadores constituye una tarea de alta complejidad por la interacción de factores electromagnéticos, térmicos y mecánicos. Además, se confirmó que no existe una guía integral de diseño aplicable a todos los casos, ya que las decisiones adoptadas dependen de las condiciones específicas de potencia y tensión. Por tanto, se resaltó la necesidad de integrar la experiencia práctica con los métodos numéricos modernos para lograr transformadores más eficientes, seguros y económicamente viables.

2.2 Bases teóricas

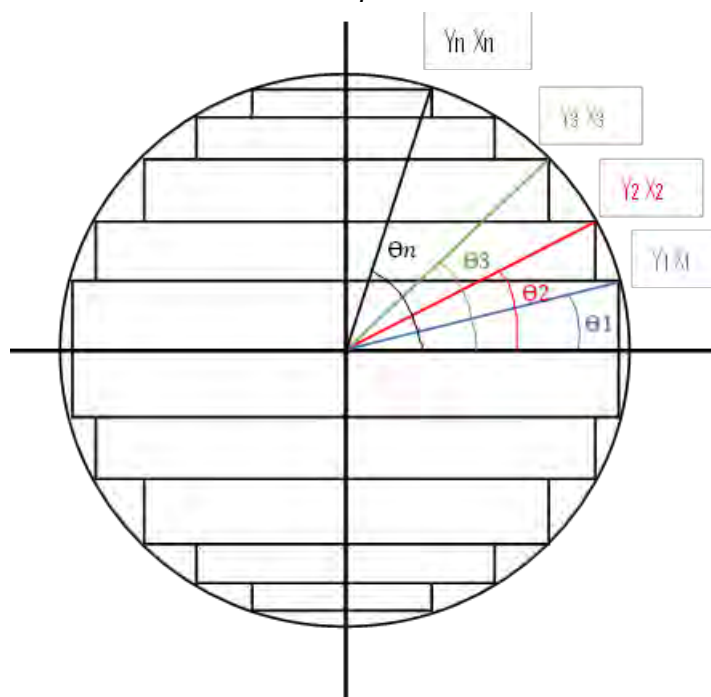
2.1.1 Dimensionamiento angular óptimo

El artículo especializado titulado: “*Cálculo del número óptimo de escalones del núcleo de transformadores*”, elaborado por García y Jordana y publicado en la revista *DYNA*, N.º 2, en febrero de 1972, aborda el dimensionamiento angular óptimo y su relevancia en la determinación del número adecuado de escalones del núcleo de los transformadores. Al respecto, García y Jordana (1972) señalan lo siguiente:

“La sección circular del núcleo del transformador debe aproximarse, mediante paquetes de chapas, formando escalones tal como se muestra en la figura 1. Para un determinado número de escalones conformadas de láminas es interesante conocer las coordenadas $x_1y_1, x_2y_2, \dots, x_ny_n$ que dan el área máxima. En el artículo de Philips y Thomas se dan algunas indicaciones generales sobre cómo se ha resuelto el problema, pero no se dan las soluciones. Por otra parte, los valores teóricos no son los constructivos, pues existen una serie de limitaciones que obligan a reajustar los valores obtenidos. Esas limitaciones permiten determinar el número de escalones óptimos que, en caso contrario, sería el máximo que permitiera el espesor de la chapa, formando cada chapa un solo escalón” (p.31).

Figura 1

Sección circular del núcleo del transformador con “n” escalones



Nota. Adaptado de Cálculo del número óptimo de escalones del núcleo de transformadores de García y Jordana (1972), p. 31

La figura representa la sección circular del núcleo del transformador conformada por “n” escalones, donde se muestran las coordenadas de cada escalón (x_n, y_n) y el dimensionamiento angular correspondiente $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n)$, formadas por paquetes de láminas del núcleo.

2.1.2 Cálculo teórico del área máxima del núcleo

García y Jordana (1972) sostiene que para el cálculo del área máxima del núcleo se sigue el siguiente procedimiento:

Conociendo las coordenadas: $x_1y_1, x_2y_2, \dots, x_ny_n$, que dan el área máxima del núcleo y si suponemos conocidos las coordenadas $x'_1y'_1 \dots x'_ny'_n$, entonces el área del polígono vale

Luego:

$$S = 4[x'_1y'_1 + x'_2(y'_2 - y'_1) + \dots + x'_n(y'_n - y'_{n-1})]$$

$$S = 4[x'_1y'_1 + \dots + x'_ny'_n - (x'_2y'_1 + \dots + x'_ny'_{n-1})]$$

En forma de sumatoria:

$$S = 4 \left[\sum_i x'_i y'_i - \sum_j x'_j + y'_j \right] \left\{ \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, n \\ j = 1, 2, \dots, (n-1) \end{array} \right.$$

Luego, al dividir por cuatro veces el cuadrado del radio, esta área se transforma en una función F , la cual debe maximizarse:

$$F = \frac{S}{4R^2} = \frac{4[\sum_i x'_i y'_i - \sum_j x'_j + y'_j]}{4R^2} = \frac{[\sum_i x'_i y'_i - \sum_j x'_j + y'_j]}{R^2}$$

$$F = \sum_i \frac{x'_i y'_i}{R^2} - \sum_j \frac{x'_j + y'_j}{R^2}$$

$$F = \sum_i x_i y_i - \sum_j x_j + y_j$$

Entonces:

$$x_i = \frac{x'_i}{R} \wedge y_i = \frac{y'_i}{R}$$

Para hallar el máximo de esta función se deriva respecto de x_i ; Como existen diferentes casos extremos, tendemos a tener tipos muy diferentes de derivadas.

$$\frac{dF}{dx_1} = y_1 + x_1 \left(\frac{dy}{dx} \right)_1 - x_2 \left(\frac{dy}{dx} \right)_1 = 0$$

$$\frac{dF}{dx_1} = y_i + x_i \left(\frac{dy}{dx} \right)_i - y_{i-1} - x_{i+1} \left(\frac{dy}{dx} \right) = 0 \dots [1]$$

$$\frac{dF}{dx_n} = y_n + x_n \left(\frac{dy}{dx} \right)_n - y_{n-1} = 0$$

Por otra parte, x'_i e y'_i deben cumplir:

$$(x'_i)^2 + (y'_i)^2 = R^2 \vee x_i^2 + y_i^2 = 1$$

Diferenciando la segunda ecuación

$$2x_i dx_i + 2y_i dy_i = 0$$

De donde:

$$(dy/dx)_i = -\frac{x_i}{y_i}$$

Y sustituyendo en las ecuaciones [1] obtenemos:

$$y_1^2 - x_1^2 + x_1 x_2 = 0$$

$$y_i^2 - x_i^2 + x_{i+1} x_i - y_{i-1} y_i = 0 \dots [2]$$

$$y_n^2 - x_n^2 - y_{n-1} y_n = 0$$

Por la simetría del problema debe cumplirse que

$$\theta_1 + \theta_n = \theta_2 + \theta_{n-1} = 90^\circ$$

De lo cual se concluye que

$$\begin{aligned} x_n &= y_1 & x_{n-1} &= y_2 \\ y_n &= x_1 & y_{n-1} &= x_2 \end{aligned}$$

Y sustituidas en la 3ª ecuación de [2], se obtiene

$$y_n^2 - x_n^2 - y_{n-1}y_n = x_1^2 - y_1^2 - x_1x_2 = 0$$

Que es la primera ecuación de [2]. Resolveremos, pues, el sistema equivalente no lineal

$$y_1^2 - x_1^2 + x_1x_2 = 0 \cdots [3.1]$$

$$y_i^2 - x_i^2 + x_{i+1}x_i - y_{i-1}y_i = 0 \quad i = 2, \dots, n-1 \cdots [3.2]$$

$$x_n = y_1 \cdots [3.3]$$

El siguiente proceso es el más simple ya que no encontramos ningún procedimiento iterativo convergente.

Comenzamos con cualquier valor de x_1 , distinto de cero y mediante la ecuación [3.1], calculemos x_2 :

$$x_2 = \frac{(x_1^2 - y_1^2)}{x_1}$$

Mediante [3.2] se calculan sucesivamente los valores

$$x_j = \frac{x_{j-1}^2 - y_{j-1}^2 * y_{j-2}}{x_{j-1}}$$

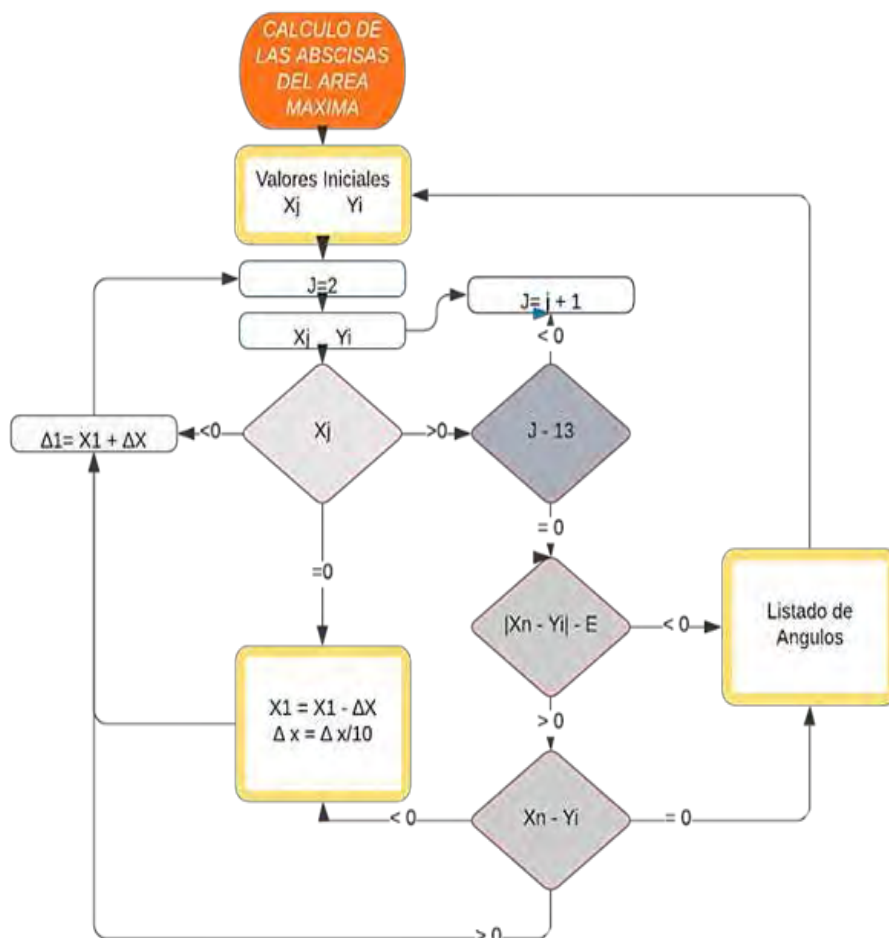
Compare el valor X_n resultante con el valor y_1 .

El proceso automático cambia x_1 , al punto que $x_n - y_1 \leq \varepsilon$ y ε el error aparece en un momento concreto.

La secuencia del procedimiento se muestra en la figura 2, y es el siguiente:

Figura 2

Organigrama del cálculo teórico de las abscisas que dan área máxima



Nota. Algoritmo del cálculo teórico de las abscisas que dan el área máxima (p. 34)

2.1.3 Restricciones constructivas del dimensionamiento angular

En la práctica, existen varias limitaciones constructivas que Phillips y Thomas explican muy claramente en el artículo citado. Siguiendo las limitaciones propuestas por los autores estas son:

1. Primera limitación

Las láminas que forman el núcleo del transformador deben cortarse a los tamaños que se determinen. Pero es imposible reducir los valores teóricos; este número debe ser redondeado a número entero de mm, por ejemplo, En el presente trabajo, cuantificando el valor de en mm, hemos insertado la condición de que sea el número entero, más cercano.

2. Segunda limitación

El número total de láminas de cada escalón, necesitan ser un número entero. Las láminas de transformadores tienen espesores fijos. Según los autores Phillips y Thomas consideran el espesor normalmente de 0,35 milímetros y un factor de apilamiento del orden de 0,93, en tal sentido la altura de cada escalón se puede representar de la siguiente forma $(y_j - y_{j-1})$, cumpliendo que dicha altura

sea múltiplo de 0,35/0,93.

3. Tercera limitación

El bloque final de láminas, en anchura $2x_n$, debe tener un valor mínimo para garantizar el soporte suficiente en la base del transformador. El valor mínimo permitido según los autores Phillips y Thomas para $2x_n$ es una fracción del diámetro D.

$$2x_n \geq g_i D$$

$$g_i = 0,225 \text{ (comunmente)}$$

Esta limitación no es la más importante, dado que si $2x_n$ resultara ser inferior, se pueden completar los bordes de los bloques superiores, con un material resistente no magnético, hasta completar la superficie requerida.

4. Cuarta limitación

Puede suceder que debido a las limitaciones anteriores existan dos escalones consecutivos que poseen una diferencia muy pequeña de anchura, de forma que resulte más conveniente hacer solo un escalón, donde su altura es la suma de los dos escalones anteriores. En lugar de tener N pasos, tendríamos N-1. Matemáticamente podemos escribir esta restricción:

$$x_j - x_{j+1} \geq x_{min}$$

5. Quinta limitación

Por motivos de construcción, es necesario limitar la altura del último escalón, con la finalidad de poder introducir placas aislantes, de manera que aislen el núcleo con respecto a las placas de sujeción que estarán colocadas. Como la altura de los escalones del transformador disminuye conforme nos acercamos al último, esta restricción puede representarse de forma general:

$$y_n - y_{n-1} \geq y_{min}$$

Esta limitación es equivalente a la sexta limitación, que es la utilizada

6. Sexta limitación

No parece lógico formar un escalón con chapa magnética. Por lo tanto, debe limitarse el número mínimo de chapas magnéticas en el escalón superior.

7. Séptima limitación

La séptima limitación es una aportación por Andrés G. y Carlos J. dichos autores proponen la resolución teórica del cálculo del área máxima con secciones elípticas.

La segunda limitación se refiere a las cifras inexactas. Decir que el espesor de las chapas magnéticas es siempre de 0,35 milímetros es una suposición falsa. Las laminaciones Aristrain, S.A. dan un límite de $\pm 10\%$, es decir, los espesores de las chapas magnéticas varían entre 0,385 mm y 0,315 mm, y el factor de apilamiento puede variar entre 0,92 y 0,94. Con la segunda limitación obtenemos m chapas magnéticas para un escalón, tendremos dos alturas, una mínima y una

máxima, que son el margen de tolerancia

En el caso de ocho escalones y radio de 100 mm, el número total de chapas es de 258 y la abscisa del escalón 8°. Es de 23mm. Si, todas las chapas fueran de 0,385 mm de espesor y el factor de apilamiento fuera del 0,92%, la ordenada del último escalón sería:

$$\Delta y_{max} = m * \frac{0,385}{0,92}$$

$$\Delta y_{min} = m * \frac{0,315}{0,94}$$

En el caso de utilizar ocho escalones y radio de 100 mm, el número total de chapas magnéticas es 258 y la distancia de la abscisa del octavo escalón es de 23 mm. Solo si, todas las chapas poseen un espesor de 0,385 mm y un factor de apilamiento fuera del 0,92%, entonces la ordenada del último escalón sería:

$$y_{m\acute{a}x} = \frac{258.0,385}{0,92} = 108mm$$

Y en el caso de utilizar el mínimo valor del espesor y mejor valor del factor de apilamiento

$$y_{m\acute{i}n} = \frac{258.0,315}{0,94} = 86,5mm$$

2.1.4 Dimensionamiento del factor de utilización Kg

Respecto al dimensionamiento escalonado Corrales (1976), indica que la sección neta de la columna de un núcleo Sn puede ponerse en función del diámetro D de la circunferencia circunscrita a dicha sección. La superficie del cuadrado circunscrito vale (D^2) y la del círculo inscrito en el mismo es ($\pi/4 * D^2$); el escalonamiento de la sección origina un nuevo coeficiente geométrico de reducción Kg rebajando aquella superficie hasta el valor de Kg ($\pi/4 * D^2$) y el aislamiento entre chapas ocasiona otra pérdida adicional de sección útil quedando esta por fin en:

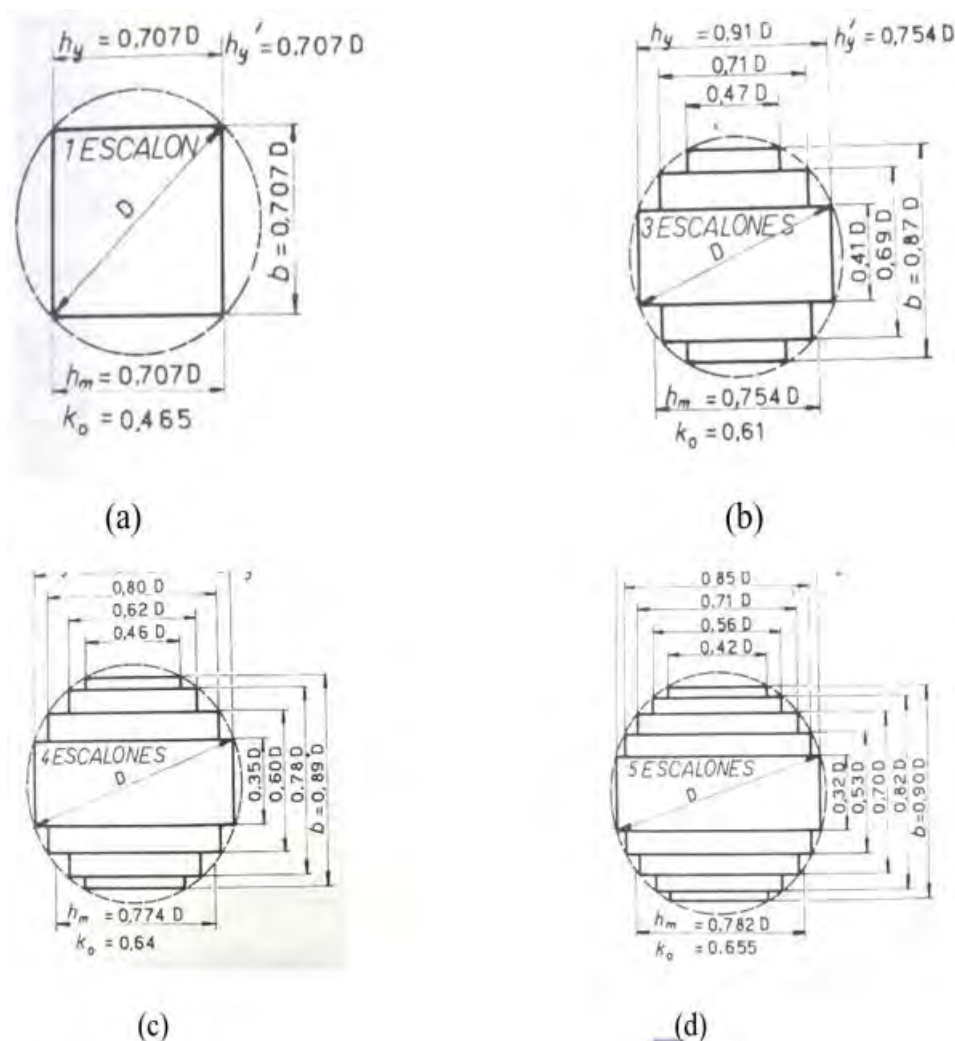
$$S_n = K_{fe} * K_g * (\pi/4 * D^2) = K_o * D^2$$

Donde Kfe es el coeficiente de empilado, con planchas de 0.35 mm de grueso, varía entre 0.88 cuando las chapas van aisladas con papel, 0.9 a 0.92 con aislamiento de esmalte y hasta 0.95 en las de grano orientado tratadas químicamente para la formación de la capa aislante denominada carlita.

Ko es el factor global de utilización del cuadrado circunscrito al núcleo, y sus valores pueden tomarse directamente de la Figura 3 propuesta por el autor.

Figura 3

Dimensiones del núcleo escalonado y el factor de utilización para varios escalones



Nota. Tomado de dimensionamiento escalonado de núcleos magnéticos, expuesto por Corrales (1976)

2.1.5 Materiales utilizados en el núcleo

ArcelorMittal (2024), es una empresa dedicada al rubro de los materiales magnéticos, para el diseño y dimensionamiento de los transformadores de distribución mayormente se utilizan los materiales de *acero de grano orientado convencionales mejorados*:

Propiedades. Los aceros eléctricos de grano orientado convencionales (CGO) mejorados se comercializan en estado final de suministro y tienen mejores propiedades que las exigidas para las calidades convencionales que se describen en la norma EN 10107:2014. Además de los niveles de pérdidas máximas y de polarización mínima indicados, ArcelorMittal pone a disposición de sus clientes las curvas completas de caracterización magnética a diferentes frecuencias en relación con los niveles de pérdidas, polarización, permeabilidad y

potencia aparente de estos materiales.

Ventajas. Los aceros eléctricos CGO mejorados ofrecen menores pérdidas y mayores niveles de polarización que los grados CGO convencionales. La polarización magnética a 800 A/m de las calidades CGO mejoradas es de 1,85 T como mínimo, es decir, un valor superior a 1,75 o 1,78 T, que es lo exigido por la norma EN 10107:2014. Ello permite utilizar estos grados en un punto de trabajo más alto que las calidades convencionales y en aplicaciones diferentes, como transformadores y bobinas de impedancia (selfs). Tener un punto de trabajo más alto se traduce en que el transformador puede ser de menor tamaño, lo que permite un ahorro de costes en cuanto a la cantidad de los materiales magnéticos y conductores que se necesitan. Obviamente, un punto de trabajo más alto puede generar mayores pérdidas y hacer que el transformador pierda eficiencia; de ahí que ArcelorMittal sólo ofrezca sus calidades CGO mejoradas con bajas pérdidas para tener en cuenta dicho efecto.

Aplicaciones. Los grados CGO mejorados puede utilizarse en cualquier aplicación en que se utilicen los CGO convencionales, pero pueden resultar ventajosos cuando, por ejemplo, de lo que se trata es de reducir las pérdidas en vacío de un transformador. Estos grados mejorados deben considerarse como una categoría de producto situada entre el GO convencional y el GO de alta permeabilidad. El HGO tiene la ventaja de que permite reducir aún más los niveles de pérdidas y aumentar la polarización, si bien con un aumento del coste del producto.

Los grados CGO mejorados encuentran su mercado en aquellas aplicaciones en las que se requiere obtener mejores prestaciones de manera rentable, especialmente en transformadores de distribución y sus características se muestran en las figuras 4, 5, 6 y 7.

Figura 4

Propiedades del material M105-23S AM FCE (espesor 0,23 mm) generadas en MATLAB

Espesor 0,23 mm							
	Densidad convencional (kg/dm ³)	Pérdida máx. (W/kg) a 50 Hz a 1,5 T	Pérdida máx. (W/kg) a 50 Hz a 1,7 T	Pérdida máx. (W/kg) a 60 Hz a 1,7 T	Polarizació n mín. (T) a 800 A/m	Número mín. de plegados	Factor de apilamiento o mín. (mm)
		Indicativ o	Garantizad o	Indicativ o	Garantizado	Garantizad o	Garantizado
M 105-23 S AM FCE	7,65	0,73	1,05	1,38	1,85	1	0,945

Nota. Los cortes gráficos se obtuvieron de ArcelorMittal. (2024). *Página oficial de ArcelorMittal.* <https://corporate.arcelormittal.com/>. Principalmente se muestran variables de cálculo como son las pérdidas con diferentes densidades de flujo y frecuencia, así como el factor de apilamiento.

Figura 5

Propiedades del material M114-27S AM FCE (espesor 0,27 mm) generadas en MATLAB

Espesor 0,27 mm

	Densidad convencional l (kg/dm ³)	Pérdida máx. (W/kg) a 50 Hz a 1,5 T	Pérdida máx. (W/kg) a 50 Hz a 1,7 T	Pérdida máx. (W/kg) a 60 Hz a 1,7 T	Polarizació n mín. (T) a 800 A/m	Número mín. de plegados	Factor de apilamiento o mín. (mm)
		Indicativ o	Garantizad o	Indicativ o	Garantizado	Garantizad o	Garantizado
M 114-27 S AM FCE	7,65	0,78	1,14	1,50	1,85	1	0,950

Nota. Los cortes gráficos se obtuvieron de ArcelorMittal. (2024). *Página oficial de ArcelorMittal*. <https://corporate.arcelormittal.com/>. Principalmente se muestran variables de cálculo como son las pérdidas con diferentes densidades de flujo y frecuencia, así como el factor de apilamiento.

Figura 6

Propiedades del material M117-30 S AM FCE (espesor 0,30 mm) generadas en MATLAB

Espesor 0,30 mm

	Densidad convencional l (kg/dm ³)	Pérdida máx. (W/kg) a 50 Hz a 1,5 T	Pérdida máx. (W/kg) a 50 Hz a 1,7 T	Pérdida máx. (W/kg) a 60 Hz a 1,7 T	Polarizació n mín. (T) a 800 A/m	Número mín. de plegados	Factor de apilamiento o mín. (mm)
		Indicativ o	Garantizad o	Indicativ o	Garantizado	Garantizad o	Garantizado
M 117-30 S AM FCE	7,65	0,81	1,17	1,55	1,85	1	0,955

Nota. Los cortes gráficos se obtuvieron de ArcelorMittal. (2024). *Página oficial de ArcelorMittal*. <https://corporate.arcelormittal.com/>. Principalmente se muestran variables de cálculo como son las pérdidas con diferentes densidades de flujo y frecuencia, así como el factor de apilamiento.

Figura 7

Propiedades del material M117-30 S AM FCE (espesor 0,30 mm) generadas en MATLAB

Espesor 0,35 mm

	Densidad convencional l (kg/dm ³)	Pérdida máx. (W/kg) a 50 Hz a 1,5 T	Pérdida máx. (W/kg) a 50 Hz a 1,7 T	Pérdida máx. (W/kg) a 60 Hz a 1,7 T	Polarizació n mín. (T) a 800 A/m	Número mín. de plegados	Factor de apilamiento o mín. (mm)
		Indicativ o	Garantizad o	Indicativ o	Garantizado	Garantizad o	Garantizado
M 125-35 S AM FCE	7,65	0,92	1,25	1,65	1,85	1	0,960

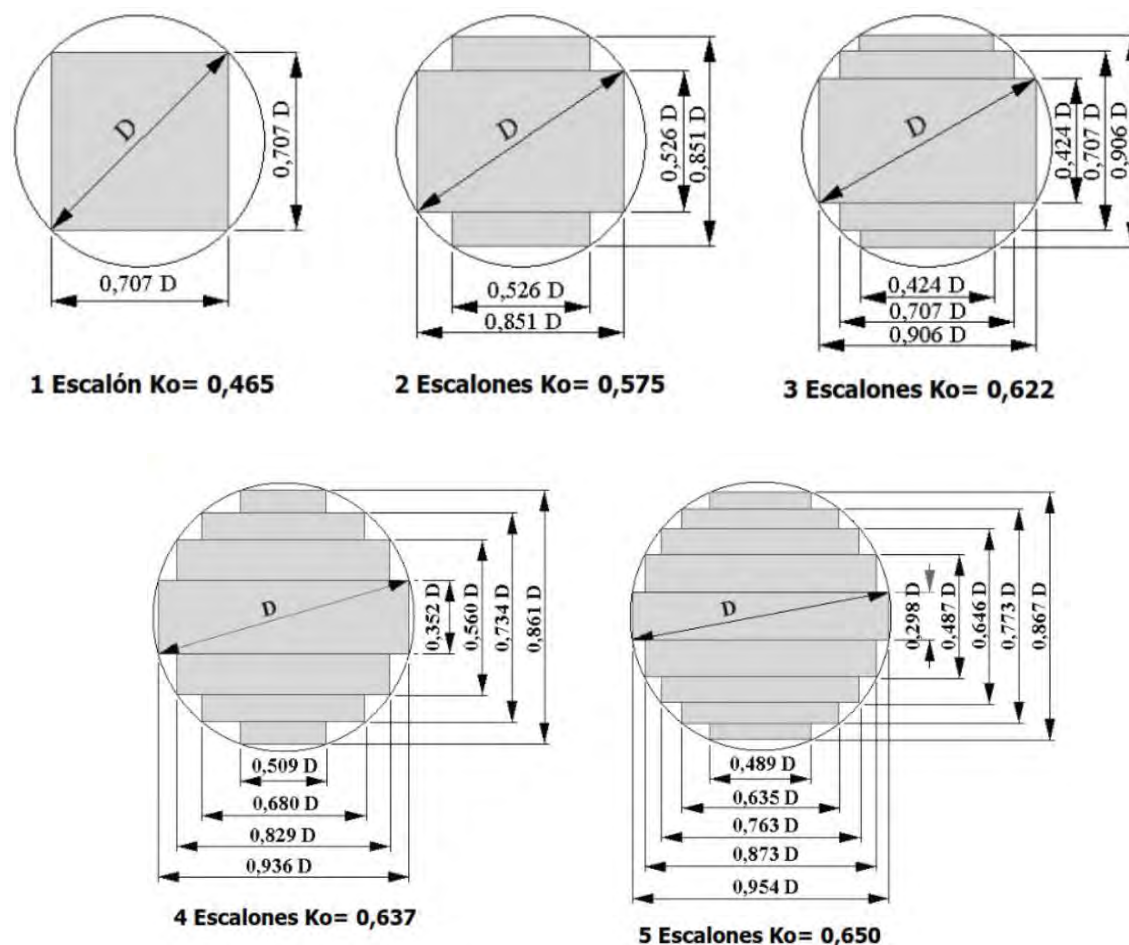
Nota. Los cortes gráficos se obtuvieron de ArcelorMittal. (2024). *Página oficial de ArcelorMittal*. <https://corporate.arcelormittal.com/>. Principalmente se muestran variables de cálculo como son las pérdidas con diferentes densidades de flujo y frecuencia, así como el factor de apilamiento.

2.1.6 Dimensiones usuales de los escalones en transformadores de distribución

La práctica del diseño y dimensionamiento de transformadores nos muestra en la Figura 8 las siguientes dimensiones logrados en base a tablas y curvas de diseño (Corrales, 1976).

Figura 8

Dimensiones de los escalones



Nota. Gráficas mejoradas de la fuente de Corrales, J. (1976). *Cálculo industrial de máquinas eléctricas: Tomo II. Método de cálculo*. Barcelona: Universidad Politécnica de Barcelona; Marcombo de Boixareu Editores, se muestra en forma directa los valores del factor de utilización.

2.1.7 El factor de utilización del núcleo

El factor de utilización del núcleo escalonado es una medida que evalúa la eficiencia con la que se utiliza un material laminado en forma de núcleo escalonado en aplicaciones estructurales. Este factor se ve influenciado por varias variables clave, que incluyen entre otros

el factor de apilamiento, el espesor de la lámina y el número de escalones. A continuación, se presenta una teoría que explora cómo estas variables afectan el factor de utilización del núcleo escalonado:

“Factor de apilamiento. Se refiere a la relación entre el espesor total del núcleo escalonado y el espesor total de las láminas individuales que lo componen. Un factor de apilamiento más alto indica que hay más láminas en el núcleo, lo que podría aumentar la resistencia y la rigidez del conjunto. Sin embargo, un aumento excesivo en el factor de apilamiento puede llevar a una mayor dificultad en el proceso de fabricación y a posibles problemas de adherencia entre las láminas” (Corrales, 1976).

Espesor de la lámina. El espesor de cada lámina individual que compone el núcleo escalonado es crucial para determinar su resistencia y rigidez. Un espesor mayor aumentará la resistencia a la compresión y la flexión, pero también puede aumentar el peso del conjunto. Por otro lado, un espesor menor puede reducir las pérdidas por corrientes parásitas, pero también puede disminuir la resistencia estructural. Por lo tanto, la selección del espesor de la lámina debe equilibrar la resistencia requerida con la consideración del peso total del componente y los requisitos de fabricación.

Número de escalones. El número de escalones en el núcleo escalonado se refiere a la cantidad de pasos o capas individuales que componen la estructura laminada. Un mayor número de escalones generalmente conduce a una mayor resistencia y rigidez, ya que proporciona más interconexiones entre las láminas y distribuye mejor las cargas aplicadas. Sin embargo, un mayor número de escalones también puede aumentar el costo de fabricación y complicar el proceso de diseño. Por lo tanto, la optimización del número de escalones implica encontrar un equilibrio entre el rendimiento estructural deseado y la viabilidad económica del componente.

En resumen, el factor de utilización del núcleo escalonado se ve influenciado por el factor de apilamiento, el espesor de la lámina y el número de escalones. Una cuidadosa consideración de estas variables durante el proceso de diseño y fabricación es fundamental para maximizar la eficiencia y el rendimiento del núcleo escalonado en diversas aplicaciones estructurales.

2.3 Marco conceptual

Alguno términos o definiciones para utilizar en el siguiente proyecto son:

2.3.1 Dimensionamiento angular

“Para un número determinado de escalones es interesante conocer las coordenadas x_1 y y_1 , x_2 y y_2 ,..., x_n y y_n que dan el área máxima. En el artículo de Philips y Thomas se dan

indicaciones generales sobre cómo han resuelto el problema, pero no se dan las soluciones. Por otra parte, los valores teóricos no son los constructivos, pues existen una serie de limitaciones que obligan a reajustar los valores obtenidos. Esas limitaciones permiten determinar el número de escalones óptimos, que, en caso contrario, sería el máximo que permitiera el espesor de la chapa, formando cada chapa un solo escalón” (Garcia y Jordana, 1972).

2.3.2 Factor de utilización

De acuerdo con el Ing. Juan Carlos Stecca el factor de utilización (k_o) se expresa mediante la ecuación:

$$k_o = f_a \times f_f \times f_p$$

Donde:

- k_o : factor de utilización
- f_a : factor de apilado
- f_f : factor de forma
- f_p : factor de proporcionalidad

Adicionalmente se muestra en la Figura 9 que es una tabla grafica que cuantifica las dimensiones de los escalones y los factores de utilización del núcleo para diferentes escalones.

Figura 9

Dimensiones de escalones para transformadores de distribución y el correspondiente factor de utilización

	ESCALONES									
	1		2		3		4		5	
n	Xn	Yn	Xn	Yn	Xn	Yn	Xn	Yn	Xn	Yn
1	0,707	0,707	0,851	0,526	0,906	0,424	0,936	0,352	0,954	0,298
2	-----	-----	0,526	0,851	0,707	0,707	0,829	0,560	0,873	0,487
3	-----	-----	-----	-----	0,424	0,906	0,680	0,734	0,763	0,646
4	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,509	0,861	0,635	0,773
5	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0,498	0,867
6	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
7	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
8	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
9	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
10	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
k_o	0,465		0,575		0,622		0,637		0,650	

Nota. Transcrito de Dimenna, C., & Stecca, J. (2015). *Transformadores: Su cálculo y construcción.* Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata.

2.3.3 Transformadores de distribución

En los sistemas de distribución de energía eléctrica, para acercar los productos energéticos a los usuarios finales, es necesario contar con un aparato conocido como transformador. Una gran cantidad de energía producida se transmite desde la planta de producción a una subestación.

De éstas, salen los alimentadores primarios hacia las áreas de consumo, en donde se alimentan a los transformadores de distribución, que son los encargados de transmitir la energía hasta los consumidores finales a niveles de tensión convenientes (Benites, 2014).

De acuerdo con el documento “Especificaciones técnicas del comité de normalización de bienes eléctricos de FONAFE” define las características del transformador de distribución de la forma siguiente:

2.3.3.1 Transformadores de distribución

- **Alcance:** estas especificaciones abarcan la concepción, diseño y los ensayos de los transformadores de distribución monofásicos y trifásicos, detallando una calidad mínima permisible, traslado y entrega de los equipos en los depósitos de las empresas concesionarias de distribución de la compañía FONAFE.

La potencia de los transformadores de distribución se considera a potencias menores a 500KVA y en caso excepcional menores a 630 KVA.

- **Disposiciones técnicas de producción y ensayos:** los transformadores serán concertados, producidos y ensayados según las reglamentaciones y recomendaciones de las Normas vigentes.

Las elaboraciones de los bienes ofrecidos deben de cumplir con las Normas Internacionales y Nacionales, las que se especifican posteriormente; por lo que el licitador deberá indicar notoriamente la regla de fabricación y ensayos en la ficha técnica, esta debe de respetar además lo indicado en las Especificaciones Técnicas.

Normas Técnicas Peruanas: NTP IEC. 60076-1: Transformadores de potencia parte 1: Generalidades. NTP 370.400:

Transformadores de distribución: “Monofásicos y trifásicos auto refrigerados, sumergidos en líquido aislante. Corriente en vacío, pérdidas y tensión de corto circuito. Normas Internacionales: IEC. 60076-1: Transformadores de potencia parte 1: Generalidades. IEC. 60076-2: Transformadores de potencia parte 2: Elevación de temperatura. IEC. 60076-3: Transformadores de potencia parte 3: Niveles de aislamiento, ensayos dieléctricos y distancia de aislamiento en el aire. IEC. 60076-4:

Transformadores de potencia parte 4: Guía de ensayo de impulso tipo rayo e impulso tipo maniobra. Transformadores de potencia y reactancias. IEC. 60076-5: Transformadores de potencia parte 5: Capacidad de resistencia al corto circuito. IEC. 60076-7: Transformadores de potencia parte 7: Guía de carga para transformadores sumergidos en aceite. IEC. 60076-10: Transformadores de potencia parte 10: Determinación de niveles de ruido y su guía de aplicación. ASTM B187/B187M: Standard Specification for Copper, Bus Bar, Rod, and Shapes and General Purpose Rod, Bar and Shapes IEC 60137: Aisladores pasantes para tensiones alternas superiores a 1000 V. IEC 60296: Fluidos para aplicaciones electrotécnicas. Aceites minerales aislantes nuevos para transformadores y aparata de conexión. ASTM D3487: Standard Specification for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus. ASTM D 3359: Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test ISO 2409: Paints and varnishes - Cross-cut test. IEC 60156: Líquidos aislantes. Determinación de la tensión de ruptura dieléctrica a frecuencia industrial. Método de ensayo. IEC 62270: Esteres naturales nuevos para transformadores y equipos eléctricos similares. ASTM D 6871: Standard Specification for Natural (vegetal oil) ester Fluids used in electrical apparatus. ASTM B 117: Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. DIN 42530: Bushing up to 1000 V and from 250 A to 5000 A – For Liquid Filled transformers” (FONAFE, 2017).

2.3.4 Software Matlab

De acuerdo con Universidad San Juan de Argentina NSJ (2017), el MATLAB se define como:

“una de las muchas sofisticadas herramientas de computación disponibles en el comercio para resolver problemas de matemáticas, tales como Maple, Mathematica y MathCad. A pesar de lo que afirman sus defensores, ninguna de ellas es “la mejor”. Todas tienen fortalezas y debilidades. Cada una permitirá efectuar cálculos matemáticos básicos, pero difieren en el modo como manejan los cálculos simbólicos y procesos matemáticos más complicados, como la manipulación de matrices. Por ejemplo, MATLAB es superior en los cálculos que involucran matrices, mientras que Maple lo supera en los cálculos simbólicos. El nombre mismo de MATLAB es una abreviatura de *Matrix Laboratory*, laboratorio matricial. En un nivel fundamental, se puede pensar que estos programas son sofisticadas calculadoras con base en una computadora. Son capaces de realizar las mismas funciones que una calculadora

científica, y muchas más. Si usted tiene una computadora en su escritorio, descubrirá que usará MATLAB en lugar de su calculadora incluso para la más simple de sus aplicaciones matemáticas, por ejemplo, para el balance de su chequera. En muchas clases de ingeniería, la realización de cálculos con un programa de computación matemático como MATLAB sustituye la programación de computadoras más tradicional. Esto no significa que el lector no deba aprender un lenguaje de alto nivel como C++ o FORTRAN, sino que los programas como MATLAB se han convertido en una herramienta estándar para ingenieros y científicos”.

RESUMEN CAPITULO II

El Capítulo II desarrolla los fundamentos teóricos, conceptuales y antecedentes necesarios para sustentar el estudio del dimensionamiento angular óptimo y del factor de utilización del núcleo escalonado en transformadores de distribución. Inicia con una revisión de antecedentes relevantes, entre ellos investigaciones sobre diseño de núcleos, reducción de pérdidas técnicas, programación en Matlab para cálculos de eficiencia y metodologías modernas de diseño electromagnético. Estos antecedentes demuestran la importancia creciente de integrar técnicas de modelado computacional y el uso de software especializado para lograr diseños más eficientes y exactos, superando las limitaciones de los métodos tradicionales.

Posteriormente se presentan las **bases teóricas**, abordando en primer lugar el *dimensionamiento angular óptimo*, sustentado en el trabajo clásico de García y Jordana (1972), quienes proponen el cálculo de coordenadas que permiten maximizar el área efectiva del núcleo mediante un polígono escalonado inscrito en una circunferencia. El capítulo explica el procedimiento matemático para obtener los ángulos óptimos, el cálculo del área máxima y el sistema no lineal que debe resolverse mediante iteraciones. Asimismo, se detallan las **restricciones constructivas** que deben cumplirse en la práctica: redondeo de dimensiones, espesores reales de láminas, limitaciones en el número de chapas, restricciones de altura del último escalón y tolerancias derivadas de los factores de apilamiento.

Se desarrolla luego el concepto del **factor de utilización**, entendido como el coeficiente que expresa qué porcentaje del área de un círculo teórico es efectivamente aprovechado por el núcleo escalonado. Este factor depende del factor de apilamiento, el factor de forma y el factor de proporcionalidad. Se incluye la ecuación general $K_o = f_a \times f_f \times f_p$ y se presentan los aportes de Corrales (1976), quien relaciona la sección neta del núcleo con el diámetro circunscrito y muestra gráficamente los factores de utilización para diferentes escalones.

El capítulo profundiza también en los **materiales magnéticos**, haciendo referencia a los aceros de grano orientado convencionales mejorados (CGO) utilizados actualmente. Se analizan sus propiedades, ventajas, niveles de pérdidas y curvas de magnetización generadas en Matlab, para materiales como M105-23S, M114-27S y M117-30S.

Finalmente, se presenta el **marco conceptual**, definiendo los conceptos clave: *dimensionamiento angular*, *factor de utilización*, *transformadores de distribución* y *Matlab* como herramienta de modelado y simulación. Este capítulo proporciona el soporte teórico esencial que sustenta el análisis geométrico, el proceso de optimización y la comprobación del factor de utilización desarrollados en los capítulos posteriores.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DEL DIMENSIONAMIENTO ANGULAR Y EL FACTOR DE UTILIZACIÓN DEL NÚCLEO ESCALONADO CON ASISTENCIA DEL MATLAB

3.1 Generalidades

El dimensionamiento angular del núcleo escalonado es un aspecto clave en el diseño de transformadores eléctricos, ya que influye directamente en la eficiencia magnética y en la reducción de pérdidas en el núcleo. Este análisis permite optimizar la geometría del núcleo, mejorando la distribución del flujo magnético y minimizando la generación de calor.

Según Del Vecchio et al. (2010):

La correcta configuración de los ángulos en un núcleo escalonado contribuye a un mejor rendimiento electromagnético, disminuyendo la saturación local y mejorando la uniformidad del campo magnético. Factores como la densidad de flujo, la permeabilidad del material y el método de laminación son determinantes en el diseño de estos núcleos. A través de modelos matemáticos y simulaciones electromagnéticas, se pueden evaluar los efectos de diferentes configuraciones angulares en el comportamiento del transformador. Este estudio es fundamental para optimizar la eficiencia energética y prolongar la vida útil de los equipos eléctricos. Además, permite reducir costos operativos al minimizar las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas. (pp.20,27,40 y 47)

El uso de herramientas computacionales avanzadas como el Matlab facilita el análisis y comparación de distintos diseños de núcleo escalonado. En este contexto, el presente estudio busca desarrollar una metodología para evaluar y mejorar el dimensionamiento angular y el factor de utilización de los núcleos para diferentes escalones de los transformadores eléctricos de distribución. Esta metodología y el software especifica el uso de los aceros de grano orientado convencionales mejorados en conformidad a las recomendaciones de la Norma Europea EN 10107:2014 que exige la calidad de las características de estos materiales que resultan ventajosos cuando se trata de reducir las pérdidas en el núcleo además de garantizar el aislamiento.

Los aceros eléctricos de grano orientado convencionales mejorados (CGO mejorados) se comercializan en estado final de suministro y presentan propiedades superiores a las exigidas por la norma EN 10107:2014 para las calidades convencionales. Estos grados pueden emplearse en cualquier aplicación en la que se utilizan aceros CGO estándar; sin embargo, ofrecen ventajas significativas, especialmente cuando se busca reducir las pérdidas en vacío de los transformadores.

De acuerdo a ArcelorMittal (2024) indica:

Una de las principales ventajas de los CGO mejorados es su capacidad para ofrecer menores pérdidas magnéticas y mayores niveles de polarización en comparación con los grados convencionales. Por ejemplo, la polarización magnética a una intensidad de 800 A/m alcanza un mínimo de 1,85 T, superando ampliamente los valores de 1,75 o 1,78 T establecidos por la norma. Esto permite operar en puntos de trabajo más elevados, posibilitando diseños de transformadores más compactos y eficientes, con menores requerimientos de materiales magnéticos y conductores, lo que se traduce en reducción de costos de fabricación. (pp.34-37)

No obstante, operar a un punto de trabajo más alto puede generar mayores pérdidas térmicas y reducir la eficiencia del transformador. Por esta razón, ArcelorMittal ofrece exclusivamente calidades CGO mejoradas con bajas pérdidas específicas, equilibrando rendimiento y eficiencia.

Estos aceros mejorados representan una categoría intermedia entre los grados convencionales y los aceros GO de alta permeabilidad (HGO). Si bien el HGO permite reducir aún más las pérdidas y elevar la polarización, su mayor costo puede no ser viable en todas las aplicaciones. Por ello, los CGO mejorados se posicionan como una alternativa rentable y de alto rendimiento para transformadores y bobinas de impedancia (selfs), entre otras aplicaciones exigentes.

Recomendaciones de uso y fabricación

Las propiedades de los aceros eléctricos de grano orientado convencionales mejorados CGO mejorados se determinan de acuerdo con los procedimientos descritos en la EN 10107, empleando equipos de medición del tipo *Epstein* o *Single Sheet Tester* (SST).

Esta norma requiere realizar un proceso de recocido posterior al corte de las probetas, con el fin de eliminar tensiones residuales que podrían afectar las mediciones.

Los aceros eléctricos de grano orientado convencionales mejorados CGO mejorados según ArcelorMittal (2024) se producen en diversos espesores de 0.23mm, 0.27mm, 0.30mm y 0.35mm, cuyas designaciones técnicas y equivalencias según la norma europea se presentan en la tabla 3, se aprecian los espesores fabricados, la designación técnica y su correspondiente equivalencia en la norma japonesa.

Tabla 3

Espesores, designaciones técnicas y equivalencias JIS de los aceros eléctricos de grano orientado (CGO) mejorados

Espesor	Designación Técnica	Equivalencia JIS
0,23 mm	M 105-23 S AM FCE	JIS C 2553:2000
0,27 mm	M 114-27 S AM FCE	JIS C 2553:2000
0,30 mm	M 117-30 S AM FCE	JIS C 2553:2000
0,35 mm	M 125-35 S AM FCE	JIS C 2553:2000

Nota. Tomado de *Recomendaciones de uso y fabricación de aceros eléctricos de grano orientado*, por ArcelorMittal (2024)

Además, en la fabricación de núcleos para transformadores también es posible emplear otros materiales ferromagnéticos laminados, tales como:

- Aceros laminados en frío
- Aceros con aptitud a la corte garantizada (Easy Punch)
- Aceros eléctricos de grano orientado convencionales (equivalentes M3, M4, M5, etc.)

La decisión final depende las características técnicas de operación, mantenimiento, vida útil, costo, ámbito de funcionamiento y el cumplimiento de las normas correspondientes.

Con respecto al aislamiento, los aceros de grano orientado convencionales mejorados fabricados por Arcelor Mittal utilizan el aislante C5-G que es un recubrimiento diseñado para proporcionar aislamiento eléctrico entre las láminas en aplicaciones como transformadores. Este barniz, también conocido como EC-5-N, es un recubrimiento pigmentado compuesto predominantemente de fosfatos, aplicado sobre una capa vitrificada obtenida durante el proceso de recocido a alta temperatura. Las características técnicas de aislamiento del C5-G son:

- Composición química: Inorgánica, basada en fosfatos.
- Color: Gris.
- Espesor típico: Entre 2 y 4 μm por cara.
- Resistencia de aislamiento típica: Superior a $10 \Omega \cdot \text{cm}^2$ por cara, medida según el ensayo Franklin conforme a la norma EN 60404-11:2013.
- Resistencia térmica: Soporta temperaturas de hasta 850°C , permitiendo procesos de recocido de alivio de tensiones sin degradar sus propiedades dieléctricas.
- Compatibilidad: No afecta ni es afectado por los aceites utilizados en transformadores.

- Aplicaciones recomendadas: Transformadores de distribución y potencia u otras aplicaciones que requieren alta eficiencia y resistencia térmica.

Este recubrimiento mejora la resistencia de aislamiento superficial y es resistente al recocido de alivio de tensiones, proceso que permite restaurar las propiedades magnéticas en los bordes de corte de los aceros de grano orientado. Además, se recomienda para aplicaciones que requieren buena adherencia y deben soportar procesos normales de troquelado y corte. Este barniz no afecta a los aceites utilizados en transformadores ni se ve alterado por los mismos. Su fabricación está basada en las normas EN 10342:2005, ASTM A976:2008, IEC/CEI 60404-1-1:2004.

Asimismo, es usual aplicar el aislamiento Carlite 3 es un recubrimiento inorgánico aplicado a aceros eléctricos de grano orientado (GOES) fabricados por AK Steel. Está diseñado para proporcionar aislamiento eléctrico entre las láminas en aplicaciones como transformadores de potencia y otros equipos con altos voltajes por vuelta. Este recubrimiento es equivalente al estándar ASTM A976 C-5 y ofrece ventajas adicionales, como resistencia a daños por deformación elástica, reducción del ruido por magnetostricción, alto factor de apilamiento y facilidad de ensamblaje debido a su baja fricción superficial.

Tanto Carlite 3 como C5-G son recubrimientos de alta calidad utilizados en aceros eléctricos de grano orientado para aplicaciones en transformadores. La elección entre uno u otro dependerá de las necesidades específicas del proceso de fabricación y las propiedades deseadas en el producto final. Por ejemplo, si se requiere una excelente resistencia térmica durante tratamientos térmicos prolongados y una buena soldabilidad, C5-G podría ser la opción preferida. Por otro lado, si se busca reducir el ruido por magnetostricción y facilitar el ensamblaje debido a una baja fricción superficial, Carlite 3 podría ser más adecuado.

3.2 Dimensionamiento angular para un escalón

Para el dimensionamiento se grafica el área transversal del núcleo del transformador para el caso de 1 escalón, el mismo que está inscrito dentro del círculo y se definen sus dimensiones ($b_1 \dots c_1$) en función del diámetro D y el ángulo correspondiente α . La elección de la simbología es aleatoria, por ejemplo; *Gambha engineers* asume $A, \dots, E$ y $e_1, \dots, e_5$ etc. En la Figura 5 se considera las correspondientes dimensiones.

Donde:

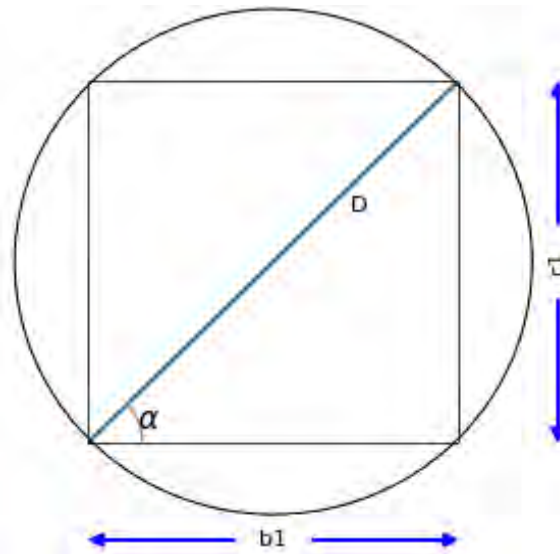
b_1 : Ancho de la lámina magnética

c_1 : Altura de la lámina magnética

D : Diámetro de la circunferencia

Figura 10

Área transversal del núcleo para un escalón inscrito dentro del círculo



Nota. Elaboración propia para determinar el ángulo del primer escalón

La Sección geométrica (S_g)

$$S_g = b_1 c_1 \quad \text{Ec. 1}$$

$$b_1 = D \cos \alpha$$

$$c_1 = D \sin \alpha$$

Reemplazando los valores

$$S_g = D^2 * \cos \alpha * \sin \alpha \quad \text{Ec. 2}$$

El criterio de optimización o maximización del área indica que se debe derivar e igualar a cero la ecuación, luego:

$$\text{Para: } \frac{dS_g}{d\alpha} = 0 \quad \text{Ec. 3}$$

$$D^2 (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) = 0$$

Luego la ecuación será:

$$Y(1) \Rightarrow \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha \quad \text{Ec. 4}$$

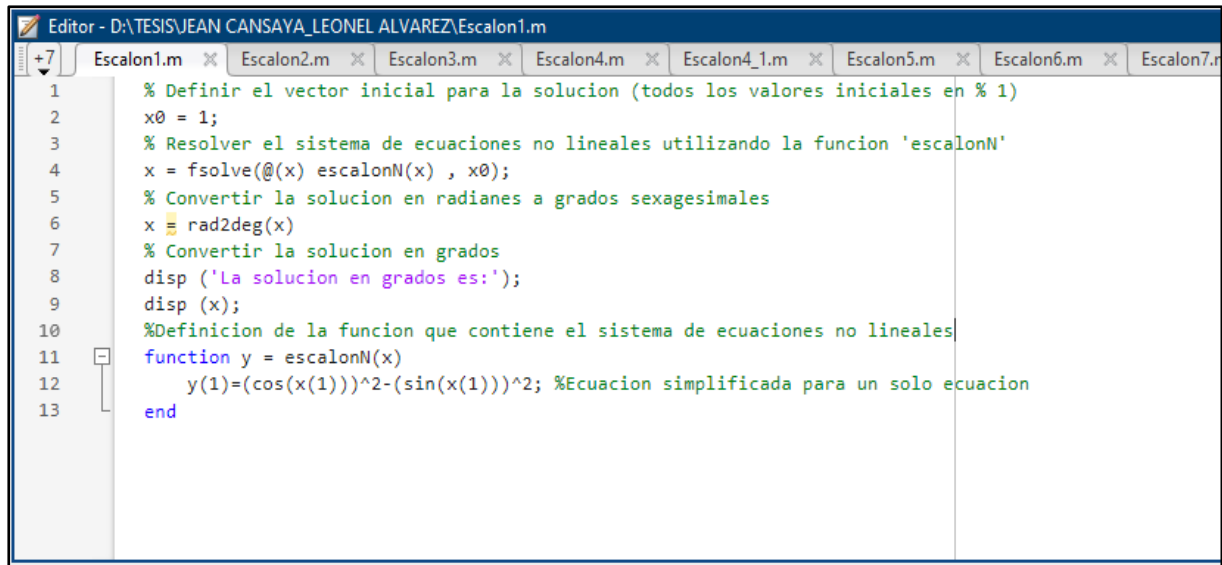
Utilizando la ecuación definida anteriormente calculamos el ángulo α .

Con la finalidad de lograr la solución óptima utilizaremos la herramienta informática Matlab, aplicando la función fsolve la cual se utiliza para encontrar las raíces del sistema, donde se identificará los valores de x que hacen que todas las ecuaciones sean cero.

La figura 11, muestra las instrucciones desarrolladas para el cálculo del primer ángulo óptimo de un escalón.

Figura 11

Instrucciones en Matlab para calcular el ángulo óptimo de un escalón



```

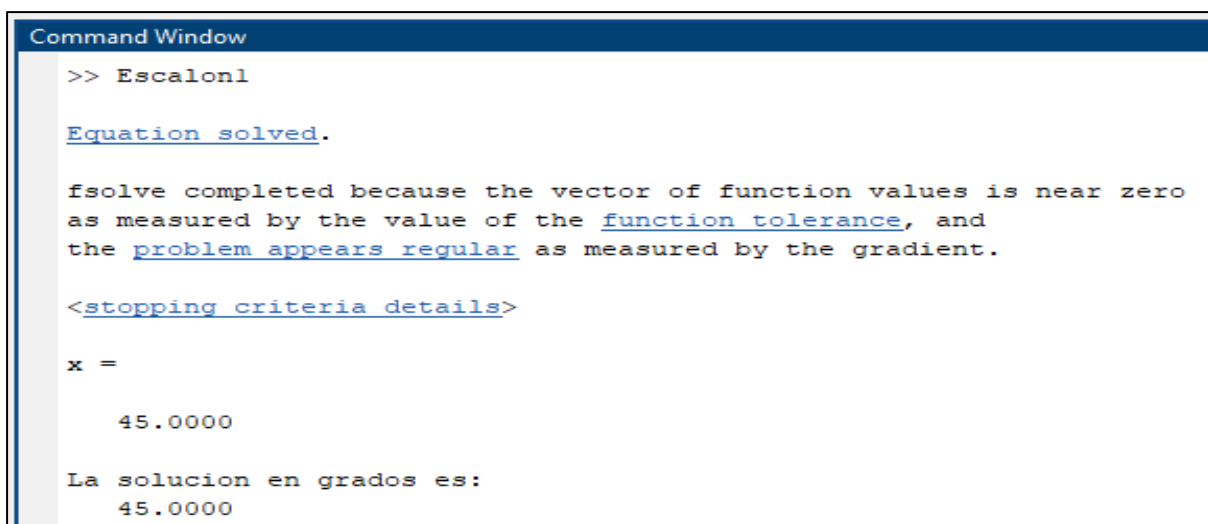
Editor - D:\TESIS\JEAN CANSAYA_LEONEL ALVAREZ\Escalon1.m
Escalon1.m Escalon2.m Escalon3.m Escalon4.m Escalon4_1.m Escalon5.m Escalon6.m Escalon7.m
1 % Definir el vector inicial para la solucion (todos los valores iniciales en % 1)
2 x0 = 1;
3 % Resolver el sistema de ecuaciones no lineales utilizando la funcion 'escalonN'
4 x = fsolve(@(x) escalonN(x), x0);
5 % Convertir la solucion en radianes a grados sexagesimales
6 x = rad2deg(x);
7 % Convertir la solucion en grados
8 disp('La solucion en grados es:');
9 disp(x);
10 %Definicion de la funcion que contiene el sistema de ecuaciones no lineales
11 function y = escalonN(x)
12     y(1)=(cos(x(1)))^2-(sin(x(1)))^2; %Ecuacion simplificada para un solo ecuacion
13 end
  
```

Nota. El algoritmo presentado fue desarrollado utilizando el software MATLAB como herramienta de modelado y visualización.

Al aplicar el programa y convirtiendo estos ángulos que nos arrojan al Matlab de radianes a grados sexagesimales se obtiene según la figura 12:

Figura 12

Solución en Matlab para calcular el ángulo óptimo de un escalón



```

Command Window
>> Escalon1

Equation solved.

fsolve completed because the vector of function values is near zero
as measured by the value of the function tolerance, and
the problem appears regular as measured by the gradient.

<stopping criteria details>

x =

    45.0000

La solucion en grados es:
    45.0000
  
```

Nota. El algoritmo presentado fue desarrollado utilizando el software MATLAB como herramienta de modelado y visualización.

Entonces el ángulo obtenido por MATLAB será:

$$\alpha = 45^\circ$$

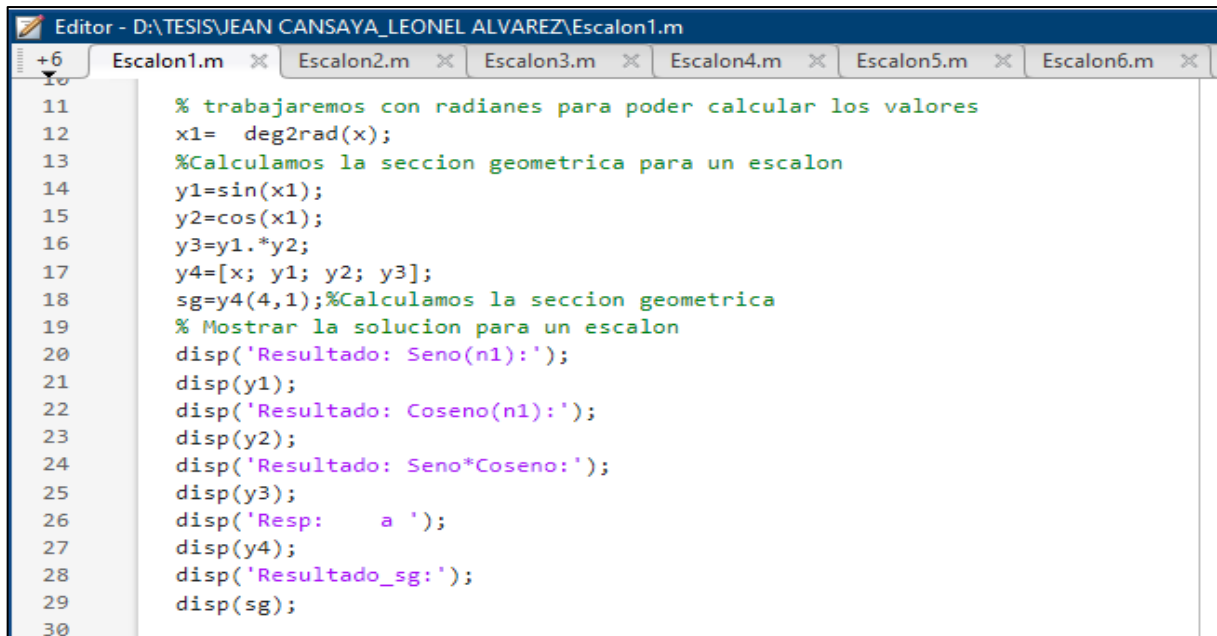
Reemplazando los valores de los ángulos en la sección geométrica en la Ecuación 2

$$Sg = D^2 \cos \alpha * \operatorname{sena}$$

Haremos uso del Matlab para calcular la expresión Sg, para un escalón el cual será.

Figura 13

Código en Matlab para calcular la sección geométrica del núcleo del transformador de un escalón



```

11 % trabajaremos con radianes para poder calcular los valores
12 x1= deg2rad(x);
13 %Calculamos la seccion geometrica para un escalon
14 y1=sin(x1);
15 y2=cos(x1);
16 y3=y1.*y2;
17 y4=[x; y1; y2; y3];
18 sg=y4(4,1);%Calculamos la seccion geometrica
19 % Mostrar la solucion para un escalon
20 disp('Resultado: Seno(n1):');
21 disp(y1);
22 disp('Resultado: Coseno(n1):');
23 disp(y2);
24 disp('Resultado: Seno*Coseno:');
25 disp(y3);
26 disp('Resp:      a ');
27 disp(y4);
28 disp('Resultado_sg:');
29 disp(sg);
30

```

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Figura 14

Solución en Matlab para la sección geométrica del núcleo del transformador de un escalón



```

>> Escalon1

Equation solved.

fsolve completed because the vector of function values is near zero
as measured by the value of the function tolerance, and
the problem appears regular as measured by the gradient.

<stopping criteria details>
La solucion en grados es:
    45.0000

Resultado: Seno (n1) :
    0.7071

Resultado: Coseno (n1) :
    0.7071

Resultado: Seno*Coseno:
    0.5000

Resp:      a
    45.0000
    0.7071
    0.7071
    0.5000

Resultado_sg:
    0.5000

```

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Tabla 4
Resumen de Ángulos para un escalón

	α
Ángulo	45°
Sen	0.707106781
Cos	0.707106781
Cos*Sen	0.5
Sg	$0.5 * D^2$

Nota. Elaboración propia a partir de datos determinados por el software MATLAB (2025)

Con los datos obtenidos mediante el Matlab reemplazamos en la Ec. (2)

$$S_g = 0.5 * D^2 \quad \text{Ec. 5}$$

Teniendo el valor de la sección geométrica podremos calcular fácilmente la sección neta, el factor de utilización y el factor de hierro del núcleo.

sección neta del núcleo:

$$S_n = f_a \times S_g \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

S_n = Sección neta

f_a = Factor de apilamiento

S_g = Sección geométrica

Factor de utilización:

$$f_u = \frac{4 \times S_n}{\pi \times D^2} \quad \text{Ec. 7}$$

Factor de hierro:

$$f_{FE} = \frac{S_n}{D^2} \quad \text{Ec. 8}$$

Hacemos uso del Matlab desarrollando el algoritmo y luego se calculan los datos que muestra la Figura 15.

Figura 15

Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de un escalón para materiales de grano orientado mejorados

```

Editor - D:\TESIS\JEAN CANSAYA_LEONEL ALVAREZ\Escalon1.m
+8 Escalon1.m Escalon2.m Escalon3.m Escalon4.m Escalon5.m Escalon6.m Escalon7.m Escalon8.m
31
32 % calculamos la la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro
33 % del núcleo del transformador de un escalón
34 %Utilizamos el factor de apilamiento para materiales de grano orientado convencionales mejorados(CGO)|
35 % M 105-23 S AM FCE__M 114-27 S AM FCE__M 117-30 S AM FCE__M 125-35 S AMFCE
36 fa=[0.945; 0.950; 0.955; 0.960];
37 %Calculamos la seccion neta del nucleo del transformador para un escalon
38 Sn1=fa(1,1)*sg; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
39 Sn2=fa(2,1)*sg; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
40 Sn3=fa(3,1)*sg; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
41 Sn4=fa(4,1)*sg; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
42 %Calculamos el factor de utilizacion del nucleo del transformador para un escalon
43 fu1=4*Sn1/pi; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
44 fu2=4*Sn2/pi; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
45 fu3=4*Sn3/pi; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
46 fu4=4*Sn4/pi; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
47 %Calculamos el factor de hierro del nucleo del transformador para un escalon
48 ffe1=Sn1; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
49 ffe2=Sn2; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
50 ffe3=Sn3; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
51 ffe4=Sn4; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
52 %Ordenamos los datos calculados
53 Datos=[0.945 Sn1 fu1 ffe1; 0.950 Sn2 fu2 ffe2; 0.955 Sn3 fu3 ffe3; 0.960 Sn4 fu4 ffe4];
54 % Mostrar la solución en los datos calculados
55 disp('Datos: fa sn fu ffe');
56 disp(Datos);

```

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Figura 16

Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de un escalón

Command Window				
Datos: fa	sn	fu	ffe	
0.9450	0.4725	0.6016	0.4725	
0.9500	0.4750	0.6048	0.4750	
0.9550	0.4775	0.6080	0.4775	
0.9600	0.4800	0.6112	0.4800	

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Tabla 5

Cálculo del área neta, factor de utilización y factor del hierro para un núcleo de 1escalón con diferentes tipos de acero eléctrico de grano orientado convencional mejorado

ACERO ELÉCTRICO DE GRANO ORIENTADO CONVENCIONAL MEJORADO	<i>fa</i>	<i>Sn</i>	<i>fu</i>	<i>f_{FE}</i>
M105-23 S AM FCE	0.945	$0.4725 \cdot D^2$	0.60160568	0.4725
M114-27 S AM FCE	0.950	$0.4750 \cdot D^2$	0.60478878	0.4750
M117-30 S AM FCE	0.955	$0.4775 \cdot D^2$	0.60797188	0.4775
M125-35 S AM FCE	0.960	$0.4800 \cdot D^2$	0.61115498	0.4800

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Reemplazando los valores de los ángulos de los escalones en las relaciones siguientes:

Para 1 escalón:

- $b_1 = D \cos \alpha = D \cos(45) = 0.7071D$
- $c_1 = D \sin \alpha = D \sin(45) = 0.7071D$

Hacemos uso de los códigos del Matlab para calcular las expresiones:

Figura 17

Código en Matlab para calcular los valores de los ángulos de nuestros escalones del núcleo del transformador de un escalón

```

Editor - D:\TESIS\JEAN CANSAYA_LEONEL ALVAREZ\Escalon1.m
+8 Escalon1.m Escalon2.m Escalon3.m Escalon4.m Escalon5.m Escalon6.m
54
55 %tabla de los escalones
56 y5=[y1;y2];
57 N_Escalones_base=diag(y5(2,:));
58 N_Escalones_altura=diag(y5(1,:));
59 % Mostrar la solución para dos escalones para la base y altura
60 disp('N_escalones base (b1):');
61 disp(N_Escalones_base);
62 disp('N_escalones altura (c1):');
63 disp(N_Escalones_altura);
64
  
```

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Figura 18

Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de un escalón.

```

Command Window

N_escalones base (b1):
    0.7071

N_escalones altura (c1):
    0.7071
  
```

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

En la siguiente tabla se muestra la altura (c_1) y el ancho (b_1) en función del diámetro D .

Tabla 6

Resultados de base y altura de las chapas magnéticas para un escalón

Nº de escalones	b_1	c_1
1	$0.7071D$	$0.7071D$

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

3.2 Dimensionamiento angular para dos escalones

En forma similar al caso anterior se grafica el área transversal del núcleo del transformador para el caso de 2 escalones, el mismo que está inscrito dentro del círculo y se definen sus dimensiones (b_1 , b_2 ... c_1 , c_2) en función del diámetro D y el ángulo correspondiente α y β .

Donde:

b_1 : Ancho de la lámina magnética del primer escalón

b_2 : Ancho de la lámina magnética del segundo escalón

c_1 : Altura de la lámina magnética del primer escalón

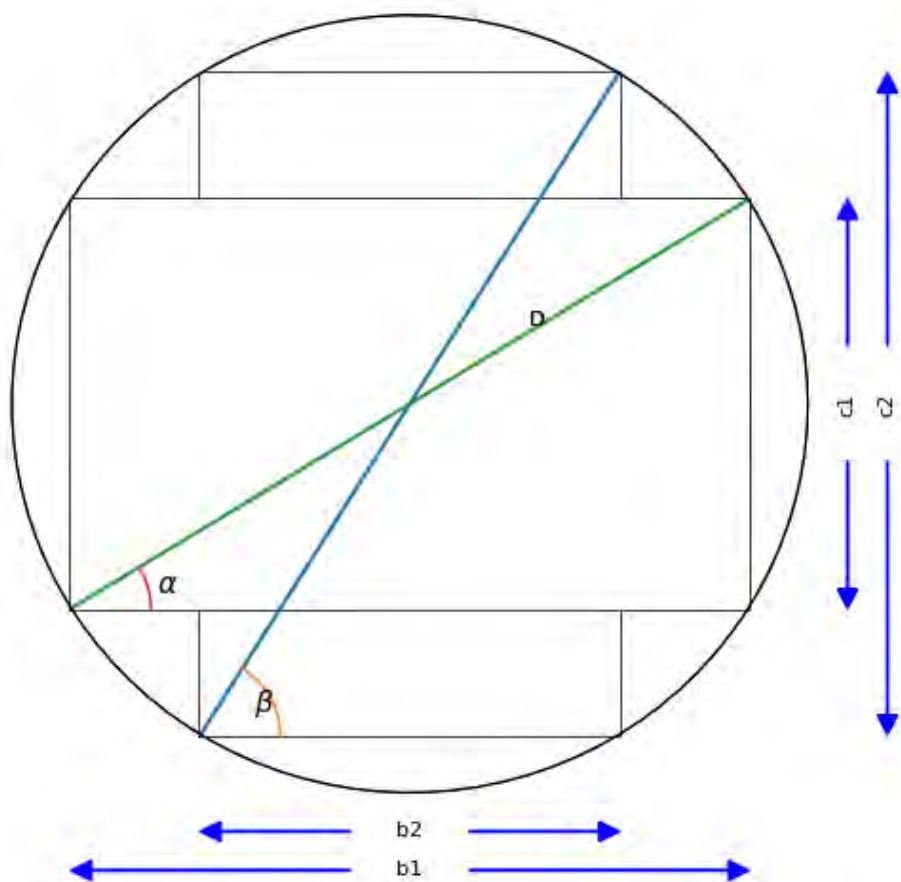
c_2 : Altura de la lámina magnética del segundo escalón

D : Diámetro de la circunferencia

La gráfica se muestra en la figura 19:

Figura 19

Área transversal del núcleo para dos escalones inscrito dentro del círculo



Nota. Elaboración propia para determinar b_1 y b_2 , c_1 y c_2 , y los ángulos de los escalones

Luego la Sección Geométrica (S_g)

$$S_g = b_1 C_1 + b_2 (C_2 - C_1) \quad \text{Ec. 9}$$

- $b_1 = D \cos \alpha$; $c_1 = D \sin \alpha$
- $b_2 = D \cos \beta$; $c_2 = D \sin \beta$

Reemplazando los valores

$$S_g = D^2 \cos \alpha \sin \alpha + D^2 \cos \beta \sin \beta - D^2 \cos \beta \sin \alpha \quad \text{Ec. 10}$$

Aplicando criterio de optimización o maximización del área se cumple:

$$\frac{dS_g}{d\alpha} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\beta} = 0 \quad \text{Ec. 11}$$

Para $\frac{dS_g}{d\alpha} = 0$

Se tiene que: $\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha - \cos \beta \cos \alpha = 0$

Para $\frac{dS_g}{d\beta} = 0$

Se tiene que: $\cos^2 \beta - \sin^2 \beta + \sin \beta \sin \alpha = 0$

Entonces las ecuaciones serán:

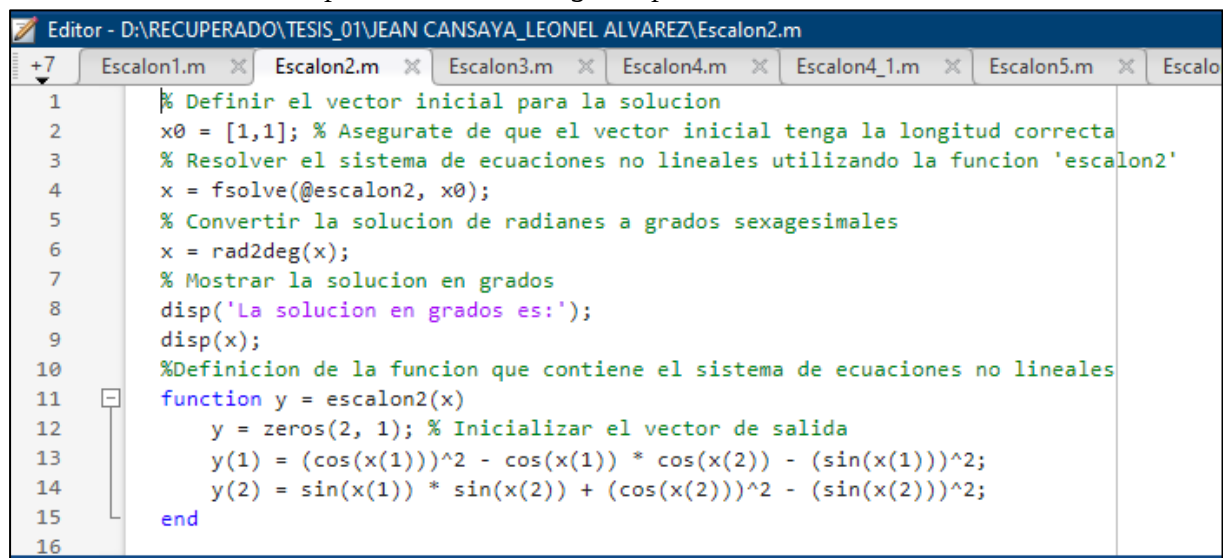
$$Y(1) \Rightarrow \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha - \cos \beta \cos \alpha = 0 \quad \text{Ec. 12}$$

$$Y(2) \Rightarrow \cos^2 \beta - \sin^2 \beta + \sin \beta \sin \alpha = 0 \quad \text{Ec. 13}$$

Con las ecuaciones halladas procedemos a obtener los ángulos α y β . Para ello usaremos MATLAB con el fin de resolver un sistema de ecuaciones no lineales utilizando la función **fsolve** la cual se utiliza para encontrar las raíces del sistema.

Figura 20

Instrucciones en Matlab para calcular el ángulo óptimo de dos escalones



```

Editor - D:\RECUPERADO\TESIS_01\JEAN CANSAYA_LEONEL ALVAREZ\Escalon2.m
+7 Escalon1.m Escalon2.m Escalon3.m Escalon4.m Escalon4_1.m Escalon5.m Escalo
1 % Definir el vector inicial para la solución
2 x0 = [1,1]; % Asegurate de que el vector inicial tenga la longitud correcta
3 % Resolver el sistema de ecuaciones no lineales utilizando la función 'escalon2'
4 x = fsolve(@escalon2, x0);
5 % Convertir la solución de radianes a grados sexagesimales
6 x = rad2deg(x);
7 % Mostrar la solución en grados
8 disp('La solución en grados es:');
9 disp(x);
10 % Definición de la función que contiene el sistema de ecuaciones no lineales
11 function y = escalon2(x)
12     y = zeros(2, 1); % Inicializar el vector de salida
13     y(1) = (cos(x(1)))^2 - cos(x(1)) * cos(x(2)) - (sin(x(1)))^2;
14     y(2) = sin(x(1)) * sin(x(2)) + (cos(x(2)))^2 - (sin(x(2)))^2;
15 end
16

```

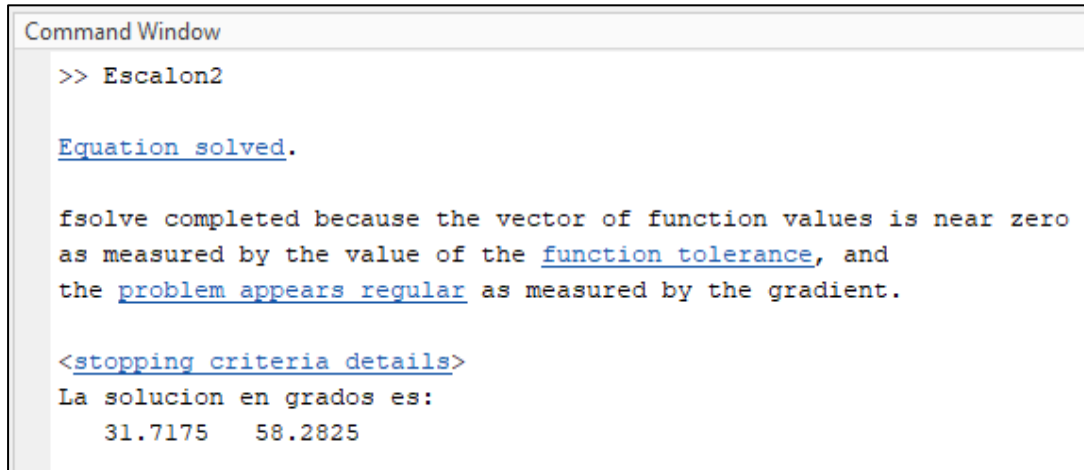
Nota. Elaboración propia y gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Donde los ángulos α y β son $x(1)$ y $x(2)$, respectivamente.

Luego ejecutamos el programa, convirtiendo estos ángulos que nos convierte Matlab de radianes a grados sexagesimales. La conversión cuantificada muestra la figura 21:

Figura 21

Solución en Matlab para calcular el ángulo óptimo de dos escalones



```

Command Window

>> Escalon2

Equation solved.

fsolve completed because the vector of function values is near zero
as measured by the value of the function tolerance, and
the problem appears regular as measured by the gradient.

<stopping criteria details>
La solución en grados es:
    31.7175    58.2825
  
```

Nota. Gráfica capturada a partir de datos del software MATLAB (2025)

Entonces los ángulos obtenidos por el MATLAB serán:

- $\alpha = 31.7175^\circ$
- $\beta = 58.2825^\circ$

Reemplazando los valores de los ángulos en la sección geométrica

$$S_g = b_1 C_1 + b_2 (C_2 - C_1)$$

Se tiene:

$$S_g = D^2 \cos \alpha \sin \alpha + D^2 \cos \beta \sin \beta - D^2 \cos \beta \sin \alpha \quad \text{Ec. 14}$$

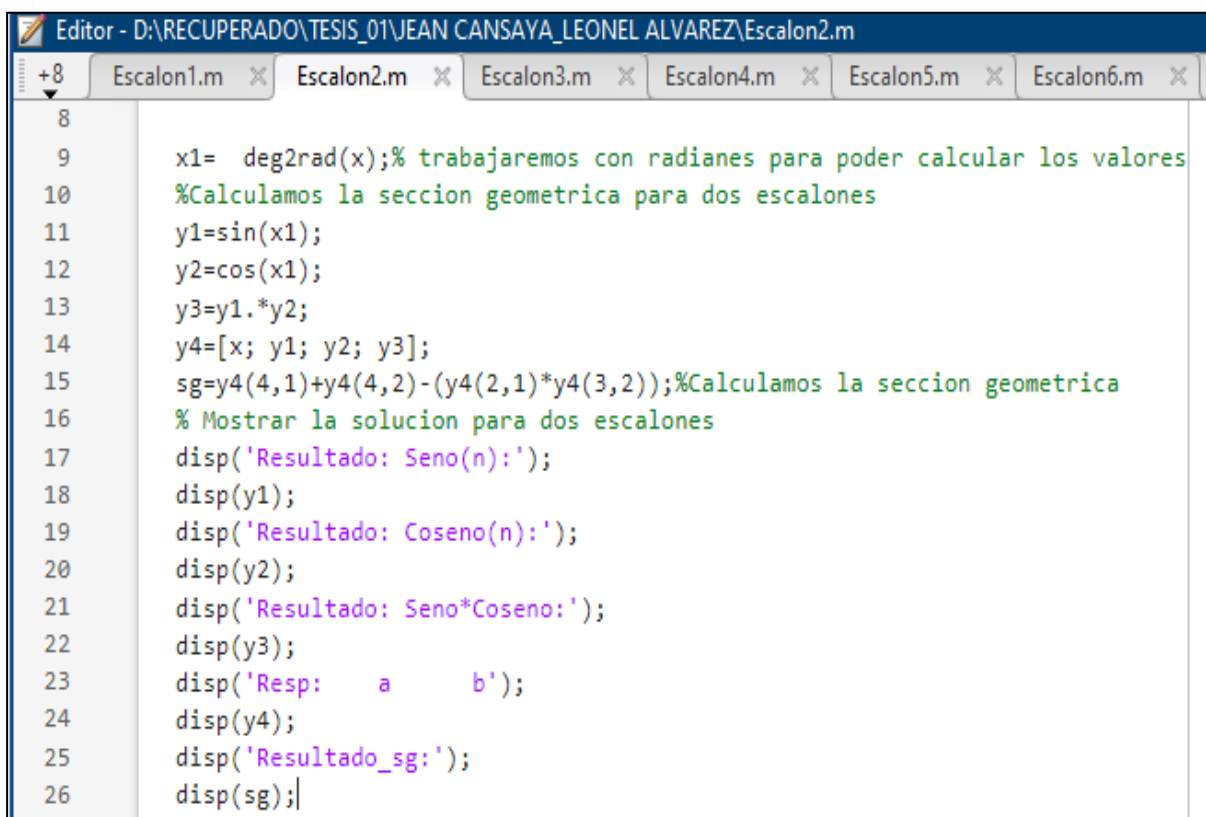
Despejando D^2 se obtiene:

$$S_g = D^2 (\cos \alpha \sin \alpha + \cos \beta \sin \beta - \cos \beta \sin \alpha)$$

Luego haremos uso del Matlab para calcular la expresión S_g , para dos escalones el cual se muestra el algoritmo en la Figura 22 y la solución en la Figura 23..

Figura 22

Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de dos escalones



```

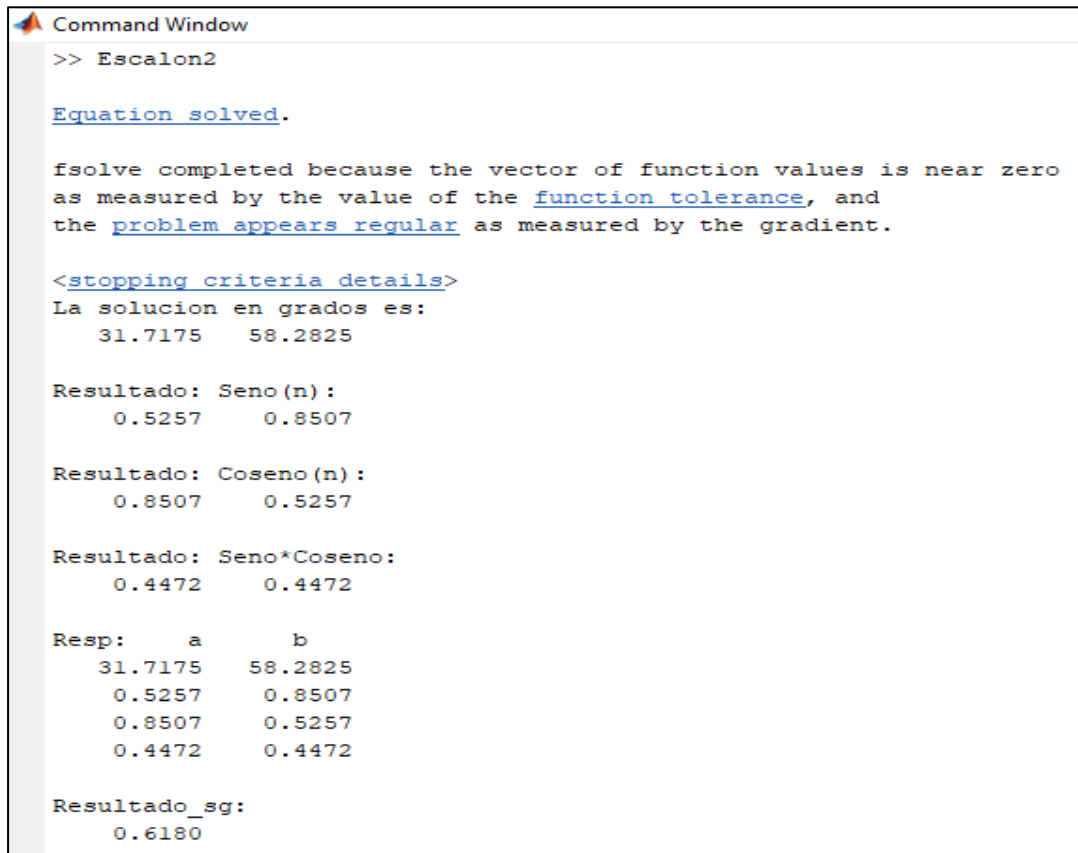
Editor - D:\RECUPERADO\TESIS_01\JEAN CANSAYA_LEONEL ALVAREZ\Escalon2.m
+8 Escalon1.m Escalon2.m Escalon3.m Escalon4.m Escalon5.m Escalon6.m
8
9     x1= deg2rad(x);% trabajaremos con radianes para poder calcular los valores
10    %Calculamos la seccion geometrica para dos escalones
11    y1=sin(x1);
12    y2=cos(x1);
13    y3=y1.*y2;
14    y4=[x; y1; y2; y3];
15    sg=y4(4,1)+y4(4,2)-(y4(2,1)*y4(3,2));%Calculamos la seccion geometrica
16    % Mostrar la solucion para dos escalones
17    disp('Resultado: Seno(n):');
18    disp(y1);
19    disp('Resultado: Coseno(n):');
20    disp(y2);
21    disp('Resultado: Seno*Coseno:');
22    disp(y3);
23    disp('Resp:      a      b');
24    disp(y4);
25    disp('Resultado_sg:');
26    disp(sg);
  
```

Nota. Algoritmo de elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

El código elaborado en Matlab para calcular la sección neta, el factor de utilización y el factor de hierro del núcleo de un transformador de dos escalones constituye una herramienta computacional que automatiza procesos tradicionalmente largos y propensos a error cuando se realizan manualmente. Este tipo de programación permite ingresar los parámetros geométricos y materiales del núcleo para obtener resultados precisos y consistentes. Además, facilita la evaluación simultánea de diferentes configuraciones geométricas, lo que contribuye a optimizar el diseño del núcleo escalonado. La determinación de la sección neta es fundamental para conocer la porción efectiva del material magnético que participa en la conducción del flujo. De igual modo, el cálculo del factor de utilización permite medir qué tan eficientemente se aprovecha la geometría del núcleo frente a su área circunscrita. Por su parte, el factor de hierro proporciona una idea clara del volumen real empleado en relación con el diseño teórico. En conjunto, estas variables permiten analizar el comportamiento magnético y estructural del núcleo. El uso de Matlab agiliza la experimentación numérica, favorece la precisión en los resultados y facilita la toma de decisiones durante la etapa de diseño.

Figura 23

Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de dos escalones



```

>> Escalon2

Equation solved.

fsolve completed because the vector of function values is near zero
as measured by the value of the function tolerance, and
the problem appears regular as measured by the gradient.

<stopping criteria details>
La solución en grados es:
    31.7175    58.2825

Resultado: Seno (n) :
    0.5257    0.8507

Resultado: Coseno (n) :
    0.8507    0.5257

Resultado: Seno*Coseno:
    0.4472    0.4472

Resp:      a      b
    31.7175    58.2825
    0.5257    0.8507
    0.8507    0.5257
    0.4472    0.4472

Resultado_sg:
    0.6180
  
```

Nota. Elaboración propia y gráfica capturada a partir de datos del software MATLAB (2025)

Tabla 7

Ángulos para dos escalones

	α	β
Ángulos	31.7175	58.2825
Sen	0.525731492	0.85065057
Cos	0.850650574	0.52573149
Cos*Sen	0.447213795	0.4472138
Sg	$0.618033989 \cdot D^2$	

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Con los datos obtenidos mediante el software Matlab reemplazamos en la Ec. (10)

$$S_g = 0.618034 \cdot D^2$$

Teniendo el valor de la sección geométrica podremos calcular fácilmente la sección neta, el factor de utilización y el factor de hierro del núcleo. Utilizando las Ecuaciones (6, 7 y 8). Hacemos uso del Matlab para calcular las expresiones:

Figura 24

Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de dos escalones para materiales de grano orientado convencionales mejorados

```

33
34 % calculamos la la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro
35 % del núcleo del transformador de DOS ESCALONES
36 %Utilizamos el factor de apilamiento para materiales de grano orientado convencionales mejorados(CG0)
37 % M 105-23 S AM FCE_M 114-27 S AM FCE_M 117-30 S AM FCE_M 125-35 S AMFCE
38 fa=[0.945; 0.950; 0.955; 0.960];
39 %Calculamos la seccion neta del nucleo del transformador para dos escalones
40 Sn1=fa(1,1)*sg; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
41 Sn2=fa(2,1)*sg; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
42 Sn3=fa(3,1)*sg; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
43 Sn4=fa(4,1)*sg; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
44 %Calculamos el factor de utilizacion del nucleo del transformador para dos escalones
45 fu1=4*Sn1/pi; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
46 fu2=4*Sn2/pi; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
47 fu3=4*Sn3/pi; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
48 fu4=4*Sn4/pi; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
49 %Calculamos el factor de hierro del nucleo del transformador para dos escalones
50 ffe1=Sn1; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
51 ffe2=Sn2; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
52 ffe3=Sn3; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
53 ffe4=Sn4; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
54 %Ordenamos los datos calculados
55 Datos=[0.945 Sn1 fu1 ffe1; 0.950 Sn2 fu2 ffe2; 0.955 Sn3 fu3 ffe3; 0.960 Sn4 fu4 ffe4];
56 disp('Datos: fa sn fu ffe');
57 disp(Datos);
58

```

Nota. Elaboración propia y gráfica capturada a partir de datos del software MATLAB (2025)

Figura 25

Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de dos escalones

Command Window			
Datos: fa	sn	fu	ffe
0.9450	0.5840	0.7436	0.5840
0.9500	0.5871	0.7476	0.5871
0.9550	0.5902	0.7515	0.5902
0.9600	0.5933	0.7554	0.5933

Nota. Elaboración propia y gráfica capturada a partir de datos del software MATLAB (2025)

Luego presentamos los datos obtenidos del factor de apilamiento, el área neta, el factor de utilización y el factor del hierro en la tabla 08

Tabla 8

Resultados obtenidos para diferentes materiales de acero eléctrico de granos orientados convencionales mejorados.

ACERO ELÉCTRICO DE GRANOS ORIENTADOS CONVENCIONALES MEJORADOS	f_a	S_n	f_u	f_{FE}
M105-23 S AM FCE	0.945	$0.5840 \cdot D^2$	0.7436	0.58404212
M114-27 S AM FCE	0.950	$0.5871 \cdot D^2$	0.7476	0.5871
M117-30 S AM FCE	0.955	$0.5902 \cdot D^2$	0.7515	0.59022246
M125-35 S AM FCE	0.960	$0.5933 \cdot D^2$	0.7554	0.5933

Nota. Elaboración propia y resultados obtenidos a partir de datos del software MATLAB.

Reemplazando los valores de los ángulos en las medidas de nuestros escalones, en las relaciones siguientes:

Para el escalón 1:

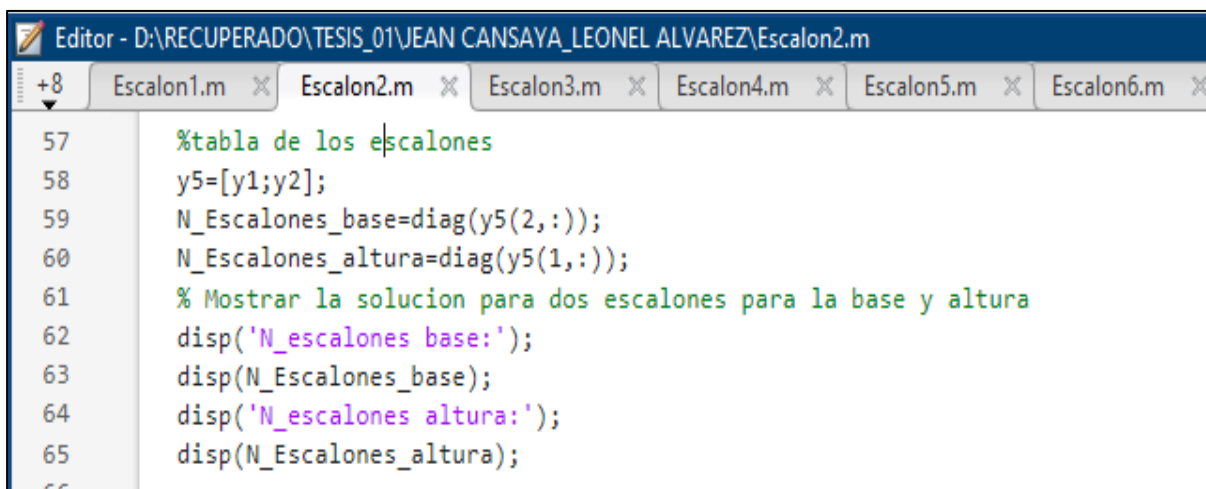
- $b_1 = D \cos \alpha = D \cos(31.7175) = 0.8506D$
- $c_1 = D \sin \alpha = D \sin(31.7175) = 0.5257D$

Para el escalón 2:

- $b_2 = D \cos \beta = D \cos(58.2825) = 0.5257 D$
- $c_2 = D \sin \beta = D \sin(58.2825) = 0.8506D$

Figura 26

Código en Matlab para calcular las dimensiones de los dos escalones del núcleo del transformador



```

Editor - D:\RECUPERADO\TESIS_01\JEAN CANSAYA_LEONEL ALVAREZ\Escalon2.m
Escalon1.m Escalon2.m Escalon3.m Escalon4.m Escalon5.m Escalon6.m
57 %tabla de los escalones
58 y5=[y1;y2];
59 N_Escalones_base=diag(y5(2,:));
60 N_Escalones_altura=diag(y5(1,:));
61 % Mostrar la solucion para dos escalones para la base y altura
62 disp('N_escalones base:');
63 disp(N_Escalones_base);
64 disp('N_escalones altura:');
65 disp(N_Escalones_altura);
66

```

Nota. Elaboración propia y captura de gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Figura 27

Solución en Matlab para calcular las dimensiones de los dos escalones del núcleo del transformador

```

Command Window

N_escalones base (b2) :
    0.8507    0
         0    0.5257

N_escalones altura (c2) :
    0.5257    0
         0    0.8507
  
```

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

En la siguiente tabla se muestra la altura ($c1$, $c2$) y el ancho ($b1$, $b2$) de las chapas magnéticas en relación con el diámetro de la circunferencia (D)

Tabla 9

Resultados de base y altura de las chapas magnéticas para dos escalones

N° de escalones	b1	b2	c1	c2
1	$0.8507 \cdot D$		$0.5257 \cdot D$	
2		$0.5257 \cdot D$		$0.8507 \cdot D$

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

3.3 Dimensionamiento angular para tres escalones

Para desarrollar el dimensionamiento angular para 3 escalones se grafican el área transversal del núcleo del transformador, el mismo que está inscrito dentro del círculo y se identifican sus dimensiones ($b1, b2, b3 \dots c1, c2, c3$) en función del diámetro D y el ángulo correspondiente α , β y γ . Este procedimiento permite determinar con precisión la geometría escalonada que aproxima la sección circular exigida por el diseño electromagnético. Asimismo, posibilita analizar la contribución de cada escalón en la distribución del flujo magnético y en la conformación del área neta efectiva del núcleo

Donde:

$b1, b2, b3$: Ancho de la lámina magnética

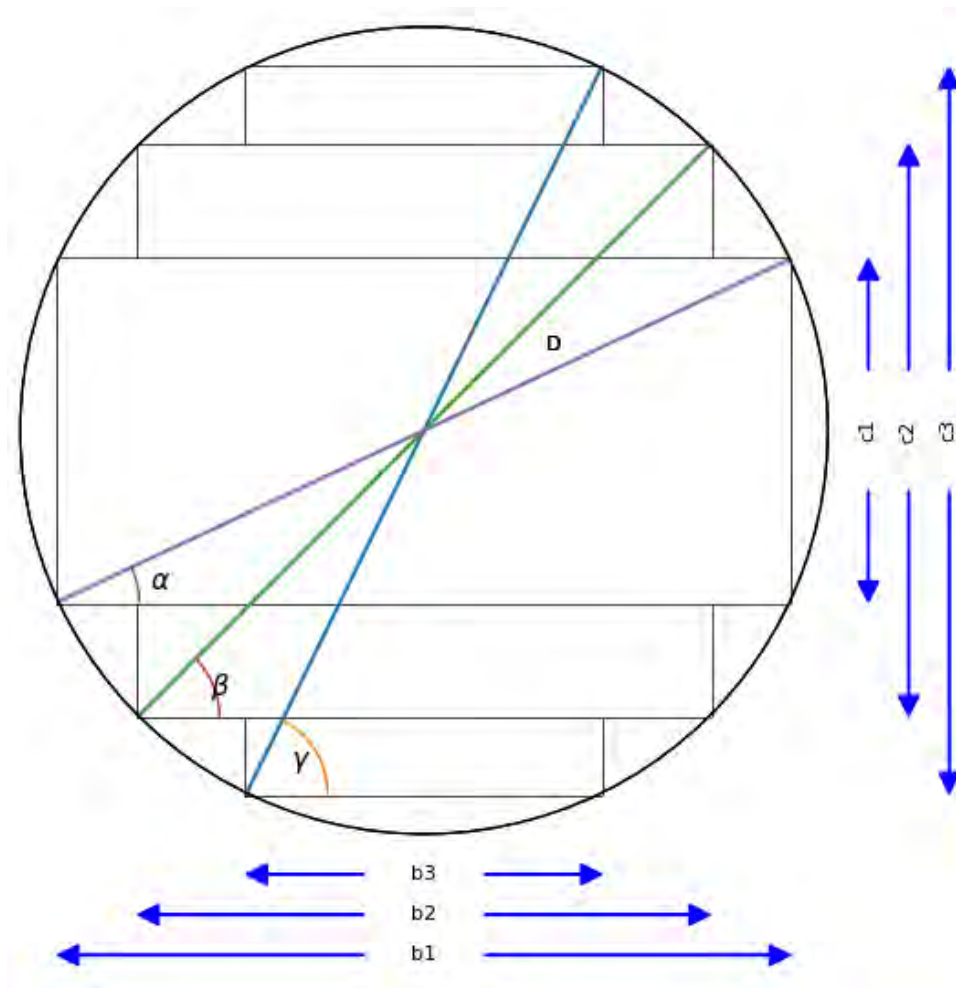
$c1, c2, c3$: Altura de la lámina magnética

D : Diámetro de la circunferencia

La gráfica se muestra en la figura 28.

Figura 28

Área transversal del núcleo para tres escalones inscrito dentro del círculo



Nota. Elaboración propia mediante herramienta gráfica

Sección Geométrica (S_g)

$$S_g = b_1 c_1 + b_2 (c_2 - c_1) + b_3 (c_3 - c_2) \quad \text{Ec. 15}$$

- $b_1 = D \cos \alpha$; $b_2 = D \cos \beta$; $b_3 = D \cos \gamma$
- $c_1 = D \sin \alpha$; $c_2 = D \sin \beta$; $c_3 = D \sin \gamma$

Reemplazando los valores

$$S_g = D^2 \cos \alpha \sin \alpha + D^2 \cos \beta \sin \beta - D^2 \cos \beta \sin \alpha + D^2 \cos \gamma \sin \gamma - D^2 \cos \gamma \sin \beta \quad \text{Ec. 16}$$

Aplicando criterio de maximización del área se tiene las derivadas en función de cada ángulo correspondiente luego igualadas a cero:

$$\frac{dS_g}{d\alpha} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\beta} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\gamma} = 0 \quad \text{Ec. 17}$$

Para $\frac{dS_g}{d\alpha} = 0$

Se tiene: $\cos^2\alpha - \sin^2\alpha - \cos\beta\cos\alpha = 0$

Para $\frac{dS_g}{d\beta} = 0$

Se tiene: $\cos^2\beta - \sin^2\beta + \sin\beta\sin\alpha - \cos\beta\cos\gamma = 0$

Para $\frac{dS_g}{d\gamma} = 0$

Se tiene: $\cos^2\gamma - \sin^2\gamma + \sin\beta\sin\gamma = 0$

Entonces las Ecuaciones serán:

$$\bullet Y(1) \Rightarrow \cos^2\alpha - \sin^2\alpha - \cos\beta\cos\alpha = 0 \quad \text{Ec. 18}$$

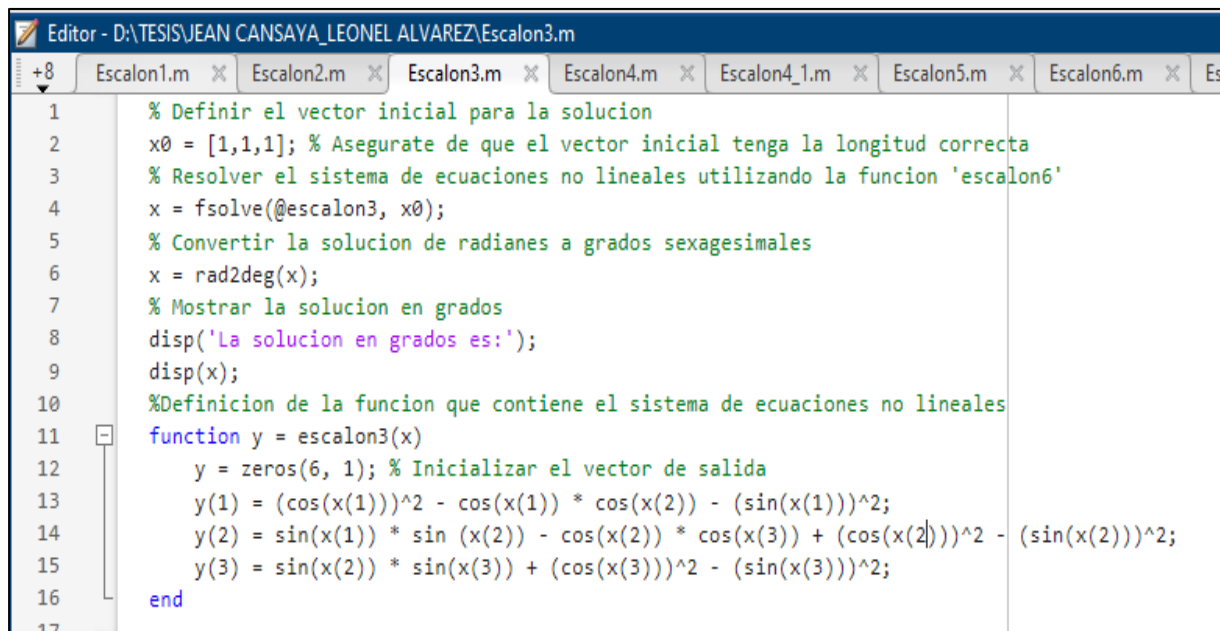
$$\bullet Y(2) \Rightarrow \cos^2\beta - \sin^2\beta + \sin\beta\sin\alpha - \cos\beta\cos\gamma = 0 \quad \text{Ec. 19}$$

$$\bullet Y(3) \Rightarrow \cos^2\gamma - \sin^2\gamma + \sin\beta\sin\gamma = 0 \quad \text{Ec. 20}$$

A partir de las ecuaciones obtenidas, se procede a determinar los ángulos α , β y γ . Para ello, se utilizará **MATLAB**, empleando la función **fsolve** para resolver el sistema de ecuaciones no lineales. Esta función permite encontrar las raíces del sistema, es decir, los valores de las variables que hacen que todas las ecuaciones se anulen simultáneamente

Figura 29

Instrucciones en Matlab para calcular el ángulo óptimo de tres escalones



```

Editor - D:\TESIS\JEAN CANSAYA_LEONEL ALVAREZ\Escalon3.m
+8 Escalon1.m Escalon2.m Escalon3.m Escalon4.m Escalon4_1.m Escalon5.m Escalon6.m Es
1 % Definir el vector inicial para la solución
2 x0 = [1,1,1]; % Asegurate de que el vector inicial tenga la longitud correcta
3 % Resolver el sistema de ecuaciones no lineales utilizando la función 'escalón6'
4 x = fsolve(@escalón3, x0);
5 % Convertir la solución de radianes a grados sexagesimales
6 x = rad2deg(x);
7 % Mostrar la solución en grados
8 disp('La solución en grados es:');
9 disp(x);
10 %Definición de la función que contiene el sistema de ecuaciones no lineales
11 function y = escalón3(x)
12     y = zeros(6, 1); % Inicializar el vector de salida
13     y(1) = (cos(x(1)))^2 - cos(x(1)) * cos(x(2)) - (sin(x(1)))^2;
14     y(2) = sin(x(1)) * sin(x(2)) - cos(x(2)) * cos(x(3)) + (cos(x(2)))^2 - (sin(x(2)))^2;
15     y(3) = sin(x(2)) * sin(x(3)) + (cos(x(3)))^2 - (sin(x(3)))^2;
16 end
17

```

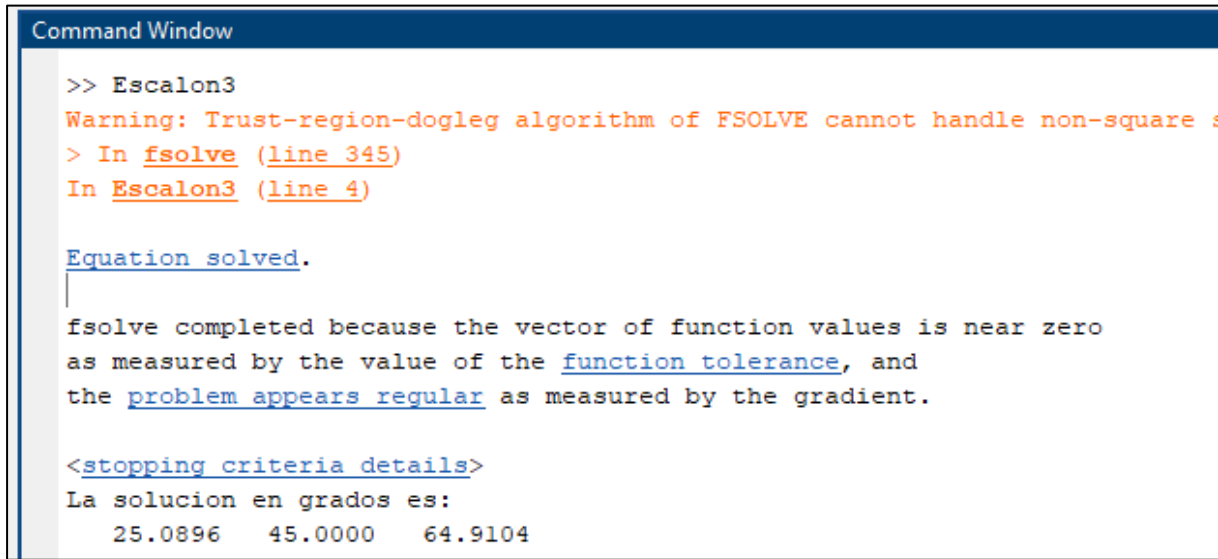
Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Donde los ángulos α , β y γ son $x(1)$, $x(2)$, y $x(3)$ respectivamente.

Ejecutamos el programa y se convierte los ángulos que nos determina Matlab de radianes a grados sexagesimales.

Figura 30

Solución en Matlab para calcular el ángulo óptimo de tres escalones.



```

Command Window

>> Escalon3
Warning: Trust-region-dogleg algorithm of FSOLVE cannot handle non-square s
> In fsolve (line 345)
In Escalon3 (line 4)

Equation solved.

fsolve completed because the vector of function values is near zero
as measured by the value of the function tolerance, and
the problem appears regular as measured by the gradient.

<stopping criteria details>
La solución en grados es:
    25.0896    45.0000    64.9104
  
```

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Entonces los ángulos obtenidos por el MATLAB serán:

- $\alpha = 25.0896^\circ$
- $\beta = 45.000^\circ$
- $\gamma = 64.9104^\circ$

Reemplazando los valores de los ángulos en la sección geométrica S_g :

$$S_g = D^2 \cos \alpha \sin \alpha + D^2 \cos \beta \sin \beta - D^2 \cos \beta \sin \alpha + D^2 \cos \gamma \sin \gamma - D^2 \cos \gamma \sin \beta$$

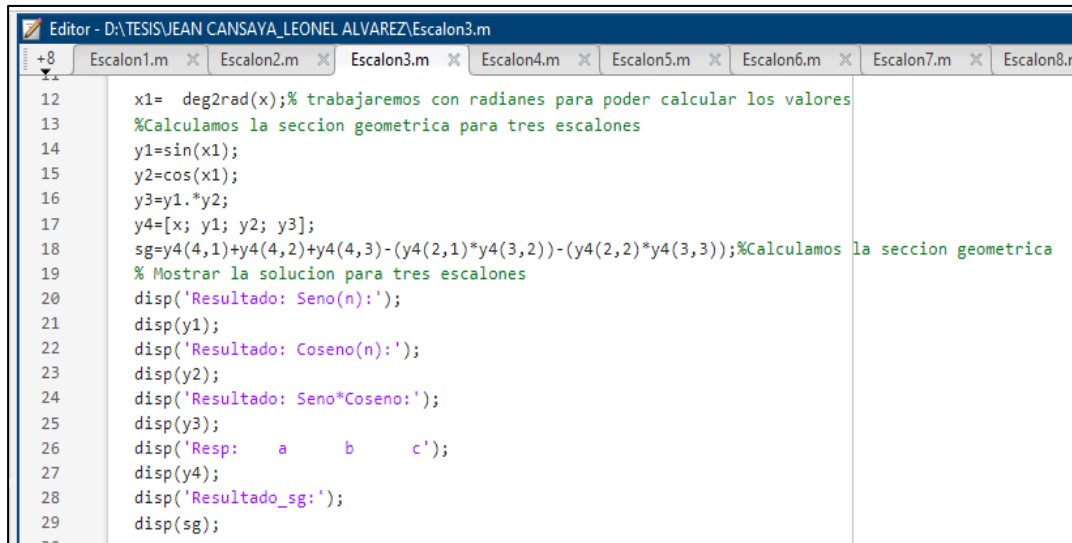
Despejando D^2

$$S_g = D^2 (\cos \alpha \sin \alpha + \cos \beta \sin \beta - \cos \beta \sin \alpha + \cos \gamma \sin \gamma - \cos \gamma \sin \beta)$$

Posteriormente, se empleará el software MATLAB para calcular de manera precisa los valores del área neta del núcleo, el factor de utilización y el factor de hierro. Estos parámetros son fundamentales para el análisis y diseño del transformador, ya que permiten evaluar la eficiencia del uso del material magnético. Asimismo, el uso de MATLAB posibilita automatizar los procedimientos de cálculo, reduciendo significativamente el margen de error asociado a métodos manuales y permitiendo realizar iteraciones rápidas ante cambios en la geometría o en las propiedades del material. De igual modo, facilita la visualización de los resultados y la comparación entre diferentes configuraciones del núcleo, lo cual es indispensable para seleccionar la alternativa más eficiente desde el punto de vista electromagnético y constructivo.

Figura 31

Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de tres escalones



```

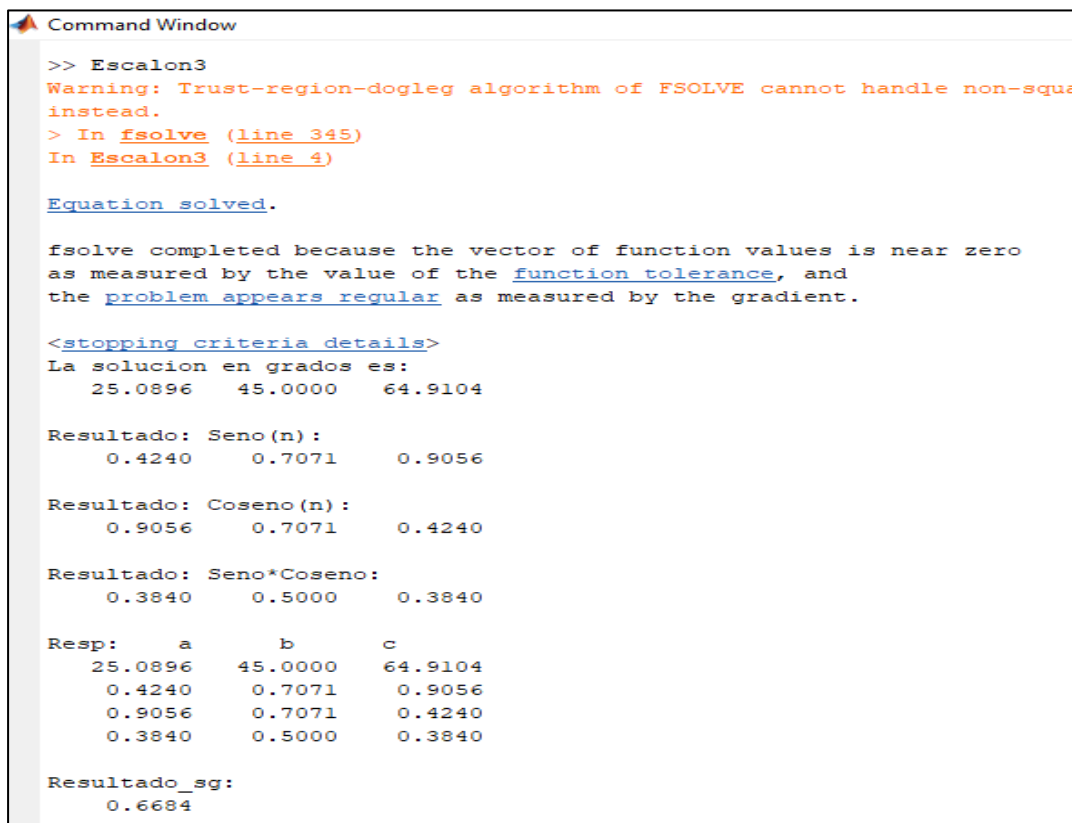
Editor - D:\TESIS\JEAN CANSAYA_LEONEL ALVAREZ\Escalon3.m
+8 Escalon1.m Escalon2.m Escalon3.m Escalon4.m Escalon5.m Escalon6.m Escalon7.m Escalon8.m
12 x1= deg2rad(x);% trabajaremos con radianes para poder calcular los valores
13 %Calculamos la seccion geometrica para tres escalones
14 y1=sin(x1);
15 y2=cos(x1);
16 y3=y1.*y2;
17 y4=[x; y1; y2; y3];
18 sg=y4(4,1)+y4(4,2)+y4(4,3)-(y4(2,1)*y4(3,2))-(y4(2,2)*y4(3,3));%Calculamos la seccion geometrica
19 % Mostrar la solucion para tres escalones
20 disp('Resultado: Seno(n):');
21 disp(y1);
22 disp('Resultado: Coseno(n):');
23 disp(y2);
24 disp('Resultado: Seno*Coseno:');
25 disp(y3);
26 disp('Resp: a b c');
27 disp(y4);
28 disp('Resultado_sg:');
29 disp(sg);

```

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Figura 32

Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de tres escalones.



```

Command Window
>> Escalon3
Warning: Trust-region-dogleg algorithm of FSOLVE cannot handle non-square
instead.
> In fsolve (line 345)
In Escalon3 (line 4)

Equation solved.

fsolve completed because the vector of function values is near zero
as measured by the value of the function tolerance, and
the problem appears regular as measured by the gradient.

<stopping criteria details>
La solucion en grados es:
    25.0896    45.0000    64.9104

Resultado: Seno(n):
    0.4240    0.7071    0.9056

Resultado: Coseno(n):
    0.9056    0.7071    0.4240

Resultado: Seno*Coseno:
    0.3840    0.5000    0.3840

Resp:      a      b      c
    25.0896    45.0000    64.9104
    0.4240    0.7071    0.9056
    0.9056    0.7071    0.4240
    0.3840    0.5000    0.3840

Resultado_sg:
    0.6684

```

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Tabla 10

Ángulos calculados para tres escalones

	α	β	γ
Ángulos	25.0896	45	64.9104
Sen	0.424035042	0.70710678	0.90564578
Cos	0.905645782	0.70710678	0.42403504
Cos*Sen	0.384025547	0.5	0.38402555
Sg	$0.668374987 \cdot D^2$		

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Con los datos obtenidos mediante el uso de MATLAB, se procede a reemplazar en la ecuación 15 para continuar con el desarrollo del análisis

$$S_g = 0.66837 \cdot D^2 \quad \text{Ec. 21}$$

Teniendo el valor de la sección geométrica calculamos fácilmente la sección neta, el factor de utilización y el factor de hierro del núcleo. Aplicando las Ecuaciones 6, 7 y 8. Hacemos uso del Matlab para calcular las expresiones:

Figura 33

Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de tres escalones para acero de grano orientado mejorados.

```

Editor - D:\TESIS\JEAN CANSAYA_LEONEL ALVAREZ\Escalon3.m
+8 Escalon1.m Escalon2.m Escalon3.m Escalon4.m Escalon5.m Escalon6.m Escalon7.m Escalon8.m
31
32 % calculamos la la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro
33 % del núcleo del transformador de TRES ESCALONES
34 %Utilizamos el factor de apilamiento para materiales de grano orientado convencionales mejorados(CGO)
35 % M 105-23 S AM FCE_M 114-27 S AM FCE_M 117-30 S AM FCE_M 125-35 S AMFCE
36 fa=[0.945; 0.950; 0.955; 0.960];
37 %Calculamos la seccion neta del nucleo del transformador para tres escalones
38 Sn1=fa(1,1)*sg; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
39 Sn2=fa(2,1)*sg; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
40 Sn3=fa(3,1)*sg; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
41 Sn4=fa(4,1)*sg; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
42 %Calculamos el factor de utilizacion del nucleo del transformador para tres escalones
43 fu1=4*Sn1/pi; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
44 fu2=4*Sn2/pi; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
45 fu3=4*Sn3/pi; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
46 fu4=4*Sn4/pi; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
47 %Calculamos el factor de hierro del nucleo del transformador para tres escalones
48 ffe1=Sn1; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
49 ffe2=Sn2; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
50 ffe3=Sn3; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
51 ffe4=Sn4; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
52 %Ordenamos los datos calculados
53 Datos=[0.945 Sn1 fu1 ffe1; 0.950 Sn2 fu2 ffe2; 0.955 Sn3 fu3 ffe3; 0.960 Sn4 fu4 ffe4];
54 disp('Datos(3): fa sn fu ffe');
55 disp(Datos);
56
57

```

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Figura 34

Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de tres escalones

Command Window				
Datos(3):	fa	sn	fu	ffe
	0.9450	0.6316	0.8042	0.6316
	0.9500	0.6350	0.8085	0.6350
	0.9550	0.6383	0.8127	0.6383
	0.9600	0.6416	0.8170	0.6416

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Tabla 11

Valores calculados de la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro para núcleo del transformador de tipos de acero de grano orientado convencional mejorado

ACERO DE GRANO ORIENTADO CONVENCIONAL MEJORADO	fa	Sn	fu	f_{FE}
M105-23 S AM FCE	0.945	$0.631614 \cdot D^2$	0.804196	0.631614
M114-27 S AM FCE	0.950	$0.634956 \cdot D^2$	0.808451	0.634956
M117-30 S AM FCE	0.955	$0.638298 \cdot D^2$	0.812706	0.638298
M125-35 S AM FCE	0.960	$0.641640 \cdot D^2$	0.816961	0.641640

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Reemplazando los valores de los ángulos en las medidas de nuestros escalones, en las relaciones siguiente:

1 escalón:

- $b_1 = D \cos \alpha = D \cos(25.0896) = 0.9056D$
- $c_1 = D \sin \alpha = D \sin(25.0896) = 0.4240D$

2 escalón:

- $b_2 = D \cos \beta = D \cos(45) = 0.7071D$
- $c_2 = D \sin \beta = D \sin(45) = 0.7071D$

3 escalón:

- $b_3 = D \cos \gamma = D \cos(64.9104) = 0.4240D$
- $c_3 = D \sin \gamma = D \sin(64.9104) = 0.9056D$

Por consiguiente, tenemos calculados las dimensiones de los escalones del transformador de la figura 28 en función del diámetro circunscrito “D”. Este mismo cálculo se desarrolla en Matlab, mediante el siguiente algoritmo mostrado en la Figura 35.

Figura 35

Código en Matlab para calcular las dimensiones de los escalones del núcleo del transformador para tres escalones

```

Editor - D:\TESIS\JEAN CANSAYA_LEONEL ALVAREZ\Escalon3.m
+8 Escalon1.m Escalon2.m Escalon3.m Escalon4.m Escalon5.m Escalon6.m
56 %tabla de los numeros de escalones
57 y5=[y1;y2];
58 N_Escalones_base=diag(y5(2,:));
59 N_Escalones_altura=diag(y5(1,:));
60 % Mostrar la solucion para tres escalones para la base y altura
61 disp('N_escalones base b(3):');
62 disp(N_Escalones_base);
63 disp('N_escalones altura c(3):');
64 disp(N_Escalones_altura);
65

```

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Figura 36

Solución en Matlab para calcular las dimensiones de los escalones del núcleo del transformador para tres escalones

```

Command Window
N_escalones base b(3) :
    0.9056         0         0
         0    0.7071         0
         0         0    0.4240

N_escalones altura c(3) :
    0.4240         0         0
         0    0.7071         0
         0         0    0.9056

```

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

En la siguiente Tabla 12 se muestra la altura (c) y el ancho o base (b) de las chapas magnéticas en relación con el diámetro de la circunferencia (D), desarrollados en Matlab.

Tabla 12

Resultados del ancho (b) y altura (c) de las chapas magnéticas para tres escalones

Nº de escalones	b1	b2	b3	c1	c2	c3
1	0.9056D			0.4240D		
2		0.7071D			0.7071D	
3			0.4240D			0.9056D

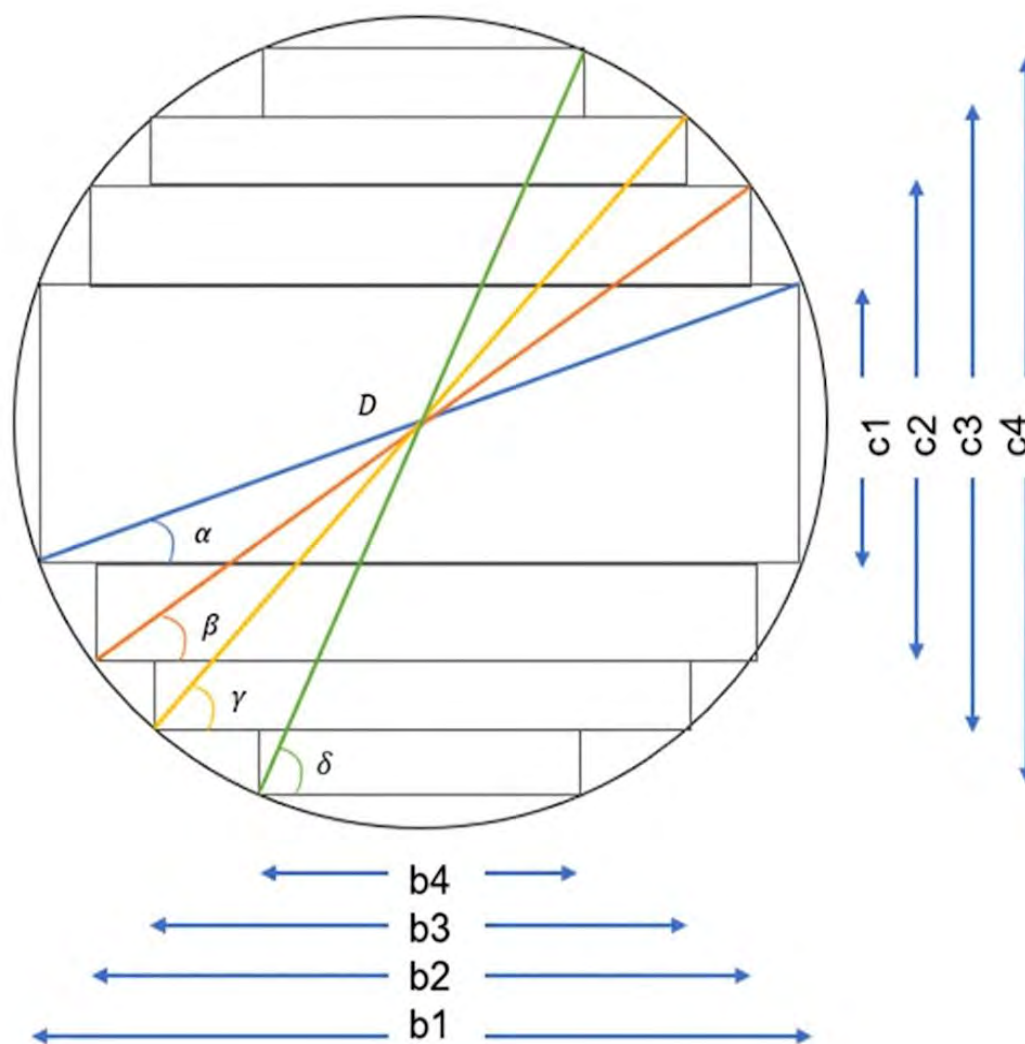
Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

3.4 Dimensionamiento angular para cuatro escalones

Se grafica el área transversal del núcleo del transformador para el caso de cuatro escalones, inscrita en un círculo, y se definen sus dimensiones ($b_1, b_2, b_3, b_4 \dots c_1, c_2, c_3, c_4$) en función del diámetro D y los ángulos correspondientes α, β, γ y δ .

Figura 37

Área transversal del núcleo para cuatro escalones inscrito dentro del círculo



Nota. Elaboración propia mediante herramienta gráfica

Donde:

b_1, b_2, b_3, b_4 : Ancho de la lámina magnética

c_1, c_2, c_3, c_4 : Altura de la lámina magnética

D : Diámetro de la circunferencia

Sección Geométrica (S_g)

$$S_g = b_1 C_1 + b_2(C_2 - C_1) + b_3(C_3 - C_2) + b_4(C_4 - C_3) \quad \text{Ec. 22}$$

- $b_1 = D \cos \alpha$; $b_2 = D \cos \beta$; $b_3 = D \cos \gamma$; $b_4 = D \cos \delta$
- $c_1 = D \sin \alpha$; $c_2 = D \sin \beta$; $c_3 = D \sin \gamma$; $c_4 = D \sin \delta$

Reemplazando los valores

$$S_g = D^2 \cos \alpha \sin \alpha + D^2 \cos \beta \sin \beta - D^2 \cos \beta \sin \alpha + D^2 \cos \gamma \sin \gamma - D^2 \cos \gamma \sin \beta + D^2 \cos \delta \sin \delta - D^2 \cos \delta \sin \gamma \quad \text{Ec. 23}$$

Aplicando criterio de optimización

$$\frac{dS_g}{d\alpha} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\beta} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\gamma} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\delta} = 0 \quad \text{Ec. 24}$$

Para $\frac{dS_g}{d\alpha} = 0$:

Se tiene que: $\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha - \cos \beta \cos \alpha = 0$

Para $\frac{dS_g}{d\beta} = 0$:

Se tiene que: $\cos^2 \beta - \sin^2 \beta + \sin \beta \sin \alpha - \cos \beta \cos \gamma = 0$

Para $\frac{dS_g}{d\gamma} = 0$:

Se tiene que: $\cos^2 \gamma - \sin^2 \gamma + \sin \beta \sin \gamma - \cos \gamma \cos \delta = 0$

Para $\frac{dS_g}{d\delta} = 0$:

Se tiene que: $\cos^2 \delta - \sin^2 \delta + \sin \gamma \sin \delta = 0$

Entonces las Ecuaciones serán:

- $Y(1) \Rightarrow \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha - \cos \beta \cos \alpha = 0 \quad \text{Ec. 25}$

- $Y(2) \Rightarrow \cos^2 \beta - \sin^2 \beta + \sin \beta \sin \alpha - \cos \beta \cos \gamma = 0 \quad \text{Ec. 26}$

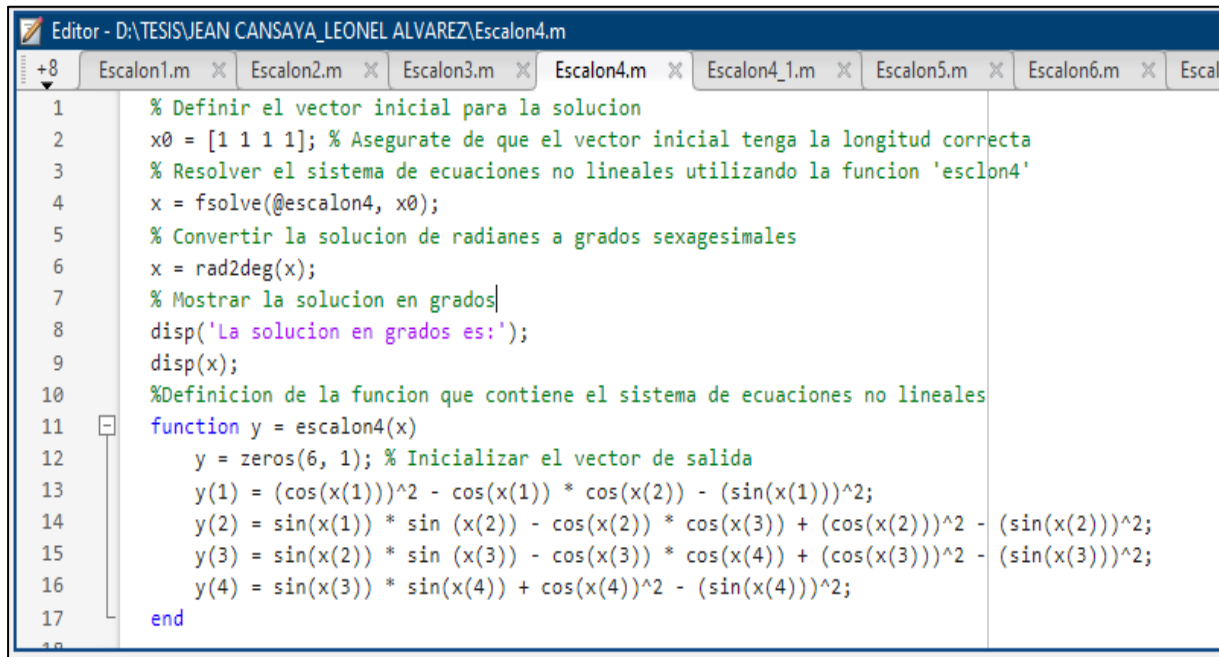
- $Y(3) \Rightarrow \cos^2 \gamma - \sin^2 \gamma + \sin \beta \sin \gamma - \cos \gamma \cos \delta = 0 \quad \text{Ec. 27}$

- $Y(4) \Rightarrow \cos^2 \delta - \sin^2 \delta + \sin \gamma \sin \delta = 0 \quad \text{Ec. 28}$

A partir de las ecuaciones obtenidas, se procede a determinar los ángulos α , β , γ y δ , los cuales son fundamentales para definir la geometría del núcleo escalonado. Para ello, se utilizará el software MATLAB, específicamente la función `fsolve`, que permite resolver sistemas de ecuaciones no lineales de forma numérica. Esta función busca encontrar las raíces del sistema, es decir, los valores de las variables independientes que hacen que todas las ecuaciones simultáneamente se igualen a cero. Su uso resulta especialmente adecuado en este caso, debido a la complejidad algebraica y la imposibilidad de encontrar una solución analítica directa.

Figura 38

Instrucciones en Matlab para calcular el ángulo óptimo de cuatro escalones



```

1 % Definir el vector inicial para la solución
2 x0 = [1 1 1 1]; % Asegurate de que el vector inicial tenga la longitud correcta
3 % Resolver el sistema de ecuaciones no lineales utilizando la función 'escalon4'
4 x = fsolve(@escalon4, x0);
5 % Convertir la solución de radianes a grados sexagesimales
6 x = rad2deg(x);
7 % Mostrar la solución en grados
8 disp('La solución en grados es:');
9 disp(x);
10 %Definición de la función que contiene el sistema de ecuaciones no lineales
11 function y = escalon4(x)
12     y = zeros(6, 1); % Inicializar el vector de salida
13     y(1) = (cos(x(1)))^2 - cos(x(1)) * cos(x(2)) - (sin(x(1)))^2;
14     y(2) = sin(x(1)) * sin(x(2)) - cos(x(2)) * cos(x(3)) + (cos(x(2)))^2 - (sin(x(2)))^2;
15     y(3) = sin(x(2)) * sin(x(3)) - cos(x(3)) * cos(x(4)) + (cos(x(3)))^2 - (sin(x(3)))^2;
16     y(4) = sin(x(3)) * sin(x(4)) + cos(x(4))^2 - (sin(x(4)))^2;
17 end

```

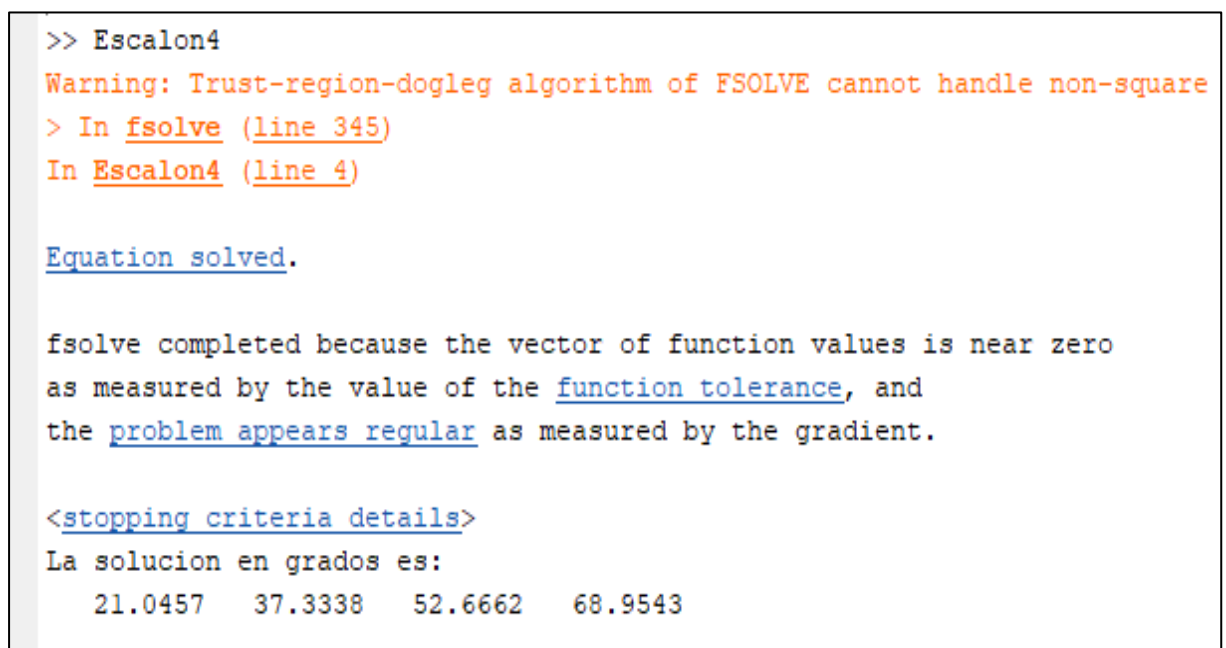
Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Donde los ángulos α, β, γ y δ son $x(1), x(2), x(3)$ y $x(4)$ respectivamente.

Ejecutamos el programa y convirtiendo estos ángulos que nos arrojan al Matlab de radianes a grados sexagesimales tenemos los datos de la Figura 39.

Figura 39

Solución en Matlab para calcular el ángulo óptimo de cuatro escalones



```

>> Escalon4
Warning: Trust-region-dogleg algorithm of FSOLVE cannot handle non-square
> In fsolve (line 345)
In Escalon4 (line 4)

Equation solved.

fsolve completed because the vector of function values is near zero
as measured by the value of the function tolerance, and
the problem appears regular as measured by the gradient.

<stopping criteria details>
La solución en grados es:
    21.0457    37.3338    52.6662    68.9543

```

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Entonces los ángulos obtenidos por el MATLAB serán:

- $\alpha = 21.0457^\circ$
- $\beta = 37.3338^\circ$
- $\gamma = 52.6662^\circ$
- $\delta = 68.9543^\circ$

Reemplazando los valores de los ángulos en la sección geométrica

$$S_g = D^2 \cos \alpha \sin \alpha + D^2 \cos \beta \sin \beta - D^2 \cos \beta \sin \alpha + D^2 \cos \gamma \sin \gamma - D^2 \cos \gamma \sin \beta + D^2 \cos \delta \sin \delta - D^2 \cos \delta \sin \gamma$$

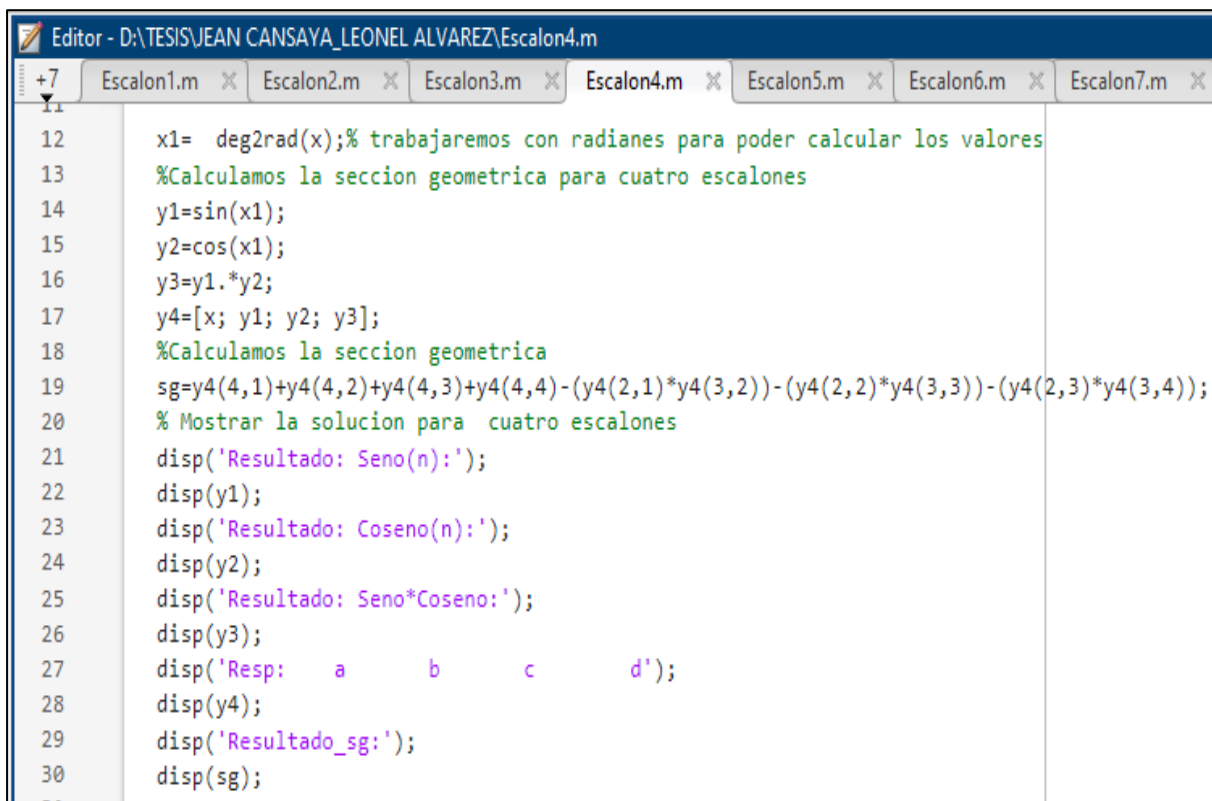
Despejando D^2

$$S_g = D^2 (\cos \alpha \sin \alpha + \cos \beta \sin \beta - \cos \beta \sin \alpha + \cos \gamma \sin \gamma - \cos \gamma \sin \beta + \cos \delta \sin \delta - \cos \delta \sin \gamma)$$

Luego haremos uso del Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de cuatro escalones.

Figura 40

Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de cuatro escalones



```

Editor - D:\TESIS\JEAN CANSAYA_LEONEL ALVAREZ\Escalon4.m
+7 Escalon1.m Escalon2.m Escalon3.m Escalon4.m Escalon5.m Escalon6.m Escalon7.m
12 x1= deg2rad(x);% trabajaremos con radianes para poder calcular los valores
13 %Calculamos la seccion geometrica para cuatro escalones
14 y1=sin(x1);
15 y2=cos(x1);
16 y3=y1.*y2;
17 y4=[x; y1; y2; y3];
18 %Calculamos la seccion geometrica
19 sg=y4(4,1)+y4(4,2)+y4(4,3)+y4(4,4)-(y4(2,1)*y4(3,2))-(y4(2,2)*y4(3,3))-(y4(2,3)*y4(3,4));
20 % Mostrar la solucion para cuatro escalones
21 disp('Resultado: Seno(n):');
22 disp(y1);
23 disp('Resultado: Coseno(n):');
24 disp(y2);
25 disp('Resultado: Seno*Coseno:');
26 disp(y3);
27 disp('Resp:      a      b      c      d');
28 disp(y4);
29 disp('Resultado_sg:');
30 disp(sg);
  
```

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Luego la solución del cálculo de la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro se muestra.

Figura 41

Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo

```

Command Window

>> Escalon4
Warning: Trust-region-dogleg algorithm of FSOLVE cannot handle non-square
> In fsolve (line 345)
In Escalon4 (line 4)

Equation solved.

fsolve completed because the vector of function values is near zero
as measured by the value of the function tolerance, and
the problem appears regular as measured by the gradient.

<stopping criteria details>
La solución en grados es:
    21.0457    37.3338    52.6662    68.9543

Resultado: Seno(n) :
    0.3591    0.6065    0.7951    0.9333

Resultado: Coseno(n) :
    0.9333    0.7951    0.6065    0.3591

Resultado: Seno*Coseno:
    0.3352    0.4822    0.4822    0.3352

Resp:      a      b      c      d
    21.0457   37.3338   52.6662   68.9543
    0.3591    0.6065    0.7951    0.9333
    0.9333    0.7951    0.6065    0.3591
    0.3352    0.4822    0.4822    0.3352

Resultado_sg:
    0.6959

```

Nota. Elaboración propia y captura de gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Tabla 13

Ángulos calculados para cuatro escalones

	α	β	γ	δ
Ángulos	21.0457	37.3338	52.6662	68.9543
Sen	0.3591	0.6065	0.7951	0.9333
Cos	0.9333	0.7951	0.6065	0.3591
Cos*Sen	0.3352	0.4822	0.4822	0.3352
Sg	$0.6959 \cdot D^2$			

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Con los datos obtenidos mediante el Matlab reemplazamos en la Ecuación 23, se tiene:

$$S_g = 0.6959 * D^2 \quad \text{Ec. 29}$$

Teniendo el valor de la sección geométrica podremos calcular fácilmente la sección neta, el factor de utilización y el factor de hierro del núcleo. Utilizando las Ecuaciones (6, 7 y 8).

Hacemos uso del Matlab mostrado en la Figura 42 para calcular las expresiones indicadas:

Figura 42

Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de cuatro escalones para materiales de grano orientado mejorados

```

32
33 % calculamos la la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro
34 % del núcleo del transformador de CUATRO ESCALONES
35 %Utilizamos el factor de apilamiento para materiales de grano orientado convencionales mejorados(CGO)
36 % M 105-23 S AM FCE__M 114-27 S AM FCE__M 117-30 S AM FCE__M 125-35 S AMFCE
37 fa=[0.945; 0.950; 0.955; 0.960];
38 %Calculamos la seccion neta del nucleo del transformador para cuatro escalones
39 Sn1=fa(1,1)*sg; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
40 Sn2=fa(2,1)*sg; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
41 Sn3=fa(3,1)*sg; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
42 Sn4=fa(4,1)*sg; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
43 %Calculamos el factor de utilizacion del nucleo del transformador para cuatro escalones
44 fu1=4*Sn1/pi; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
45 fu2=4*Sn2/pi; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
46 fu3=4*Sn3/pi; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
47 fu4=4*Sn4/pi; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
48 %Calculamos el factor de hierro del nucleo del transformador para cuatro escalones
49 ffe1=Sn1; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
50 ffe2=Sn2; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
51 ffe3=Sn3; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
52 ffe4=Sn4; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
53 %Ordenamos los datos calculados |
54 Datos=[0.945 Sn1 fu1 ffe1; 0.950 Sn2 fu2 ffe2; 0.955 Sn3 fu3 ffe3; 0.960 Sn4 fu4 ffe4];
55 disp('Datos(4): fa sn fu ffe');
56 disp(Datos);
57

```

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Figura 43

Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de cuatro escalones

Command Window				
Datos(4): fa	sn	fu	ffe	
0.9450	0.6576	0.8373	0.6576	
0.9500	0.6611	0.8417	0.6611	
0.9550	0.6645	0.8461	0.6645	
0.9600	0.6680	0.8506	0.6680	

Nota. Elaboración propia y captura de gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Tabla 14

Cálculo de la sección neta, factor de utilización factor de hierro para 4 escalones

ACERO DE GRANO ORIENTADO CONVENCIONAL MEJORADO	f_a	S_n	f_u	f_{FE}
M105-23 S AM FCE	0.945	$0.657588 \cdot D^2$	0.837267	0.657588
M114-27 S AM FCE	0.950	$0.661067 \cdot D^2$	0.841697	0.661067
M117-30 S AM FCE	0.955	$0.664547 \cdot D^2$	0.846127	0.664547
M125-35 S AM FCE	0.960	$0.668026 \cdot D^2$	0.850557	0.668026

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Reemplazando los valores de los ángulos en las medidas de nuestros escalones, en las relaciones siguientes:

1 escalón:

- $b_1 = D \cos \alpha = D \cos(21.0457) = 0.9333D$
- $c_1 = D \sin \alpha = D \sin(21.0457) = 0.3591D$

2 escalón:

- $b_2 = D \cos \beta = D \cos(37.3338) = 0.7951D$
- $c_2 = D \sin \beta = D \sin(37.3338) = 0.6065D$

3 escalón:

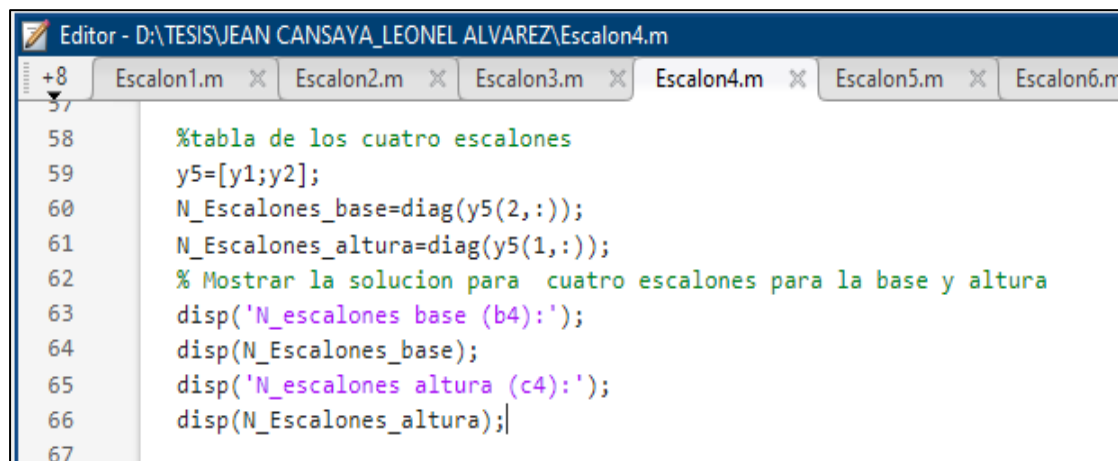
- $b_3 = D \cos \gamma = D \cos(52.6662) = 0.6065D$
- $c_3 = D \sin \gamma = D \sin(52.6662) = 0.7951D$

4 escalón:

- $b_4 = D \cos \delta = D \cos(68.9543) = 0.3591D$
- $c_4 = D \sin \delta = D \sin(68.9543) = 0.9333D$

Figura 44

Código en Matlab para calcular los valores de los ángulos de los 4 escalones



```

Editor - D:\TESIS\JEAN CANSAYA_LEONEL ALVAREZ\Escalon4.m
+8 Escalon1.m Escalon2.m Escalon3.m Escalon4.m Escalon5.m Escalon6.m
57
58 %tabla de los cuatro escalones
59 y5=[y1;y2];
60 N_Escalones_base=diag(y5(2,:));
61 N_Escalones_altura=diag(y5(1,:));
62 % Mostrar la solución para cuatro escalones para la base y altura
63 disp('N_escalones base (b4):');
64 disp(N_Escalones_base);
65 disp('N_escalones altura (c4):');
66 disp(N_Escalones_altura);
67

```

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Figura 45

Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de cuatro escalones

```

Command Window

N_escalones base (b4):
    0.9333         0         0         0
         0    0.7951         0         0
         0         0    0.6065         0
         0         0         0    0.3591

N_escalones altura (c4):
    0.3591         0         0         0
         0    0.6065         0         0
         0         0    0.7951         0
         0         0         0    0.9333
  
```

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

En la siguiente tabla se muestra la altura (c) y el ancho (b) de las chapas magnéticas en relación con el diámetro de la circunferencia (D).

Tabla 15

Cálculo Resultados de base y altura de las chapas magnéticas para cuatro escalones

Nº de escalones	b1	b2	b3	b4	c1	c2	c3	c4
1	0.9333D				0.3591D			
2		0.7951D				0.6065D		
3			0.6065D				0.7951D	
4				0.3591D				0.9333D

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

3.5 Dimensionamiento angular para cinco escalones

Se representa gráficamente el área transversal del núcleo del transformador considerando una configuración de cinco escalones. Esta geometría escalonada se inscribe dentro de un círculo, y sus dimensiones denominadas b_1 , b_2 , b_3 , b_4 , b_5 , c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , c_5 se definen en función del diámetro D del círculo inscrito y de los ángulos correspondientes α , β , γ , δ , ε . Esta construcción permite establecer relaciones geométricas precisas que facilitan el diseño optimizado del núcleo en función de parámetros eléctricos y magnéticos.

Donde:

b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 : Ancho de la lámina magnética

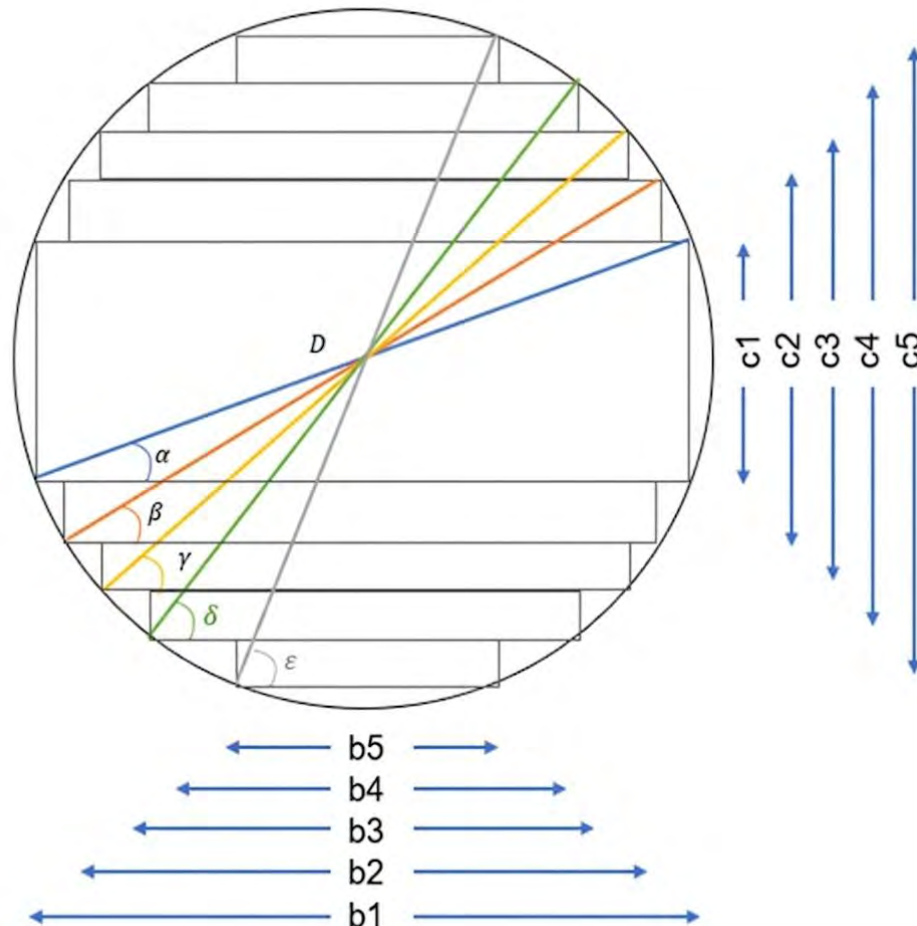
c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 : Altura del acoplamiento de la lámina magnética

D : Diámetro de la circunferencia

La gráfica del núcleo de cinco escalones se muestra en la figura 46.

Figura 46

Área transversal del núcleo para cinco escalones inscrito dentro del círculo



Nota. Elaboración propia mediante herramienta gráfica

Sección Geométrica (S_g)

$$S_g = b_1 C_1 + b_2 (C_2 - C_1) + b_3 (C_3 - C_2) + b_4 (C_4 - C_3) + b_5 (C_5 - C_4) \quad \text{Ec. 30}$$

- $b_1 = D \cos \alpha$; $b_2 = D \cos \beta$; $b_3 = D \cos \gamma$; $b_4 = D \cos \delta$; $b_5 = D \cos \varepsilon$
- $c_1 = D \sin \alpha$; $c_2 = D \sin \beta$; $c_3 = D \sin \gamma$; $c_4 = D \sin \delta$; $c_5 = D \sin \varepsilon$

Reemplazando los valores

$$S_g = D^2 \cos \alpha \sin \alpha + D^2 \cos \beta \sin \beta - D^2 \cos \beta \sin \alpha + D^2 \cos \gamma \sin \gamma - D^2 \cos \gamma \sin \beta + D^2 \cos \delta \sin \delta - D^2 \cos \delta \sin \gamma + D^2 \cos \varepsilon \sin \varepsilon - D^2 \cos \varepsilon \sin \delta$$

Aplicando el criterio de optimización.

$$\frac{dS_g}{d\alpha} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\beta} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\gamma} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\delta} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\varepsilon} = 0 \quad \text{Ec. 31}$$

Para $\frac{dS_g}{d\alpha} = 0$, se tiene: $\cos^2\alpha - \sin^2\alpha - \cos\beta\cos\alpha = 0$

Para $\frac{dS_g}{d\beta} = 0$, se tiene: $\cos^2\beta - \sin^2\beta + \sin\beta\sin\alpha - \cos\beta\cos\gamma = 0$

Para $\frac{dS_g}{d\gamma} = 0$, se tiene: $\cos^2\gamma - \sin^2\gamma + \sin\beta\sin\gamma - \cos\gamma\cos\delta = 0$

Para $\frac{dS_g}{d\delta} = 0$, se tiene: $\cos^2\delta - \sin^2\delta + \sin\gamma\sin\delta - \cos\delta\cos\varepsilon = 0$

Para $\frac{dS_g}{d\varepsilon} = 0$, se tiene: $\cos^2\varepsilon - \sin^2\varepsilon + \sin\delta\sin\varepsilon = 0$

Entonces las Ecuaciones serán:

• $Y(1) \Rightarrow \cos^2\alpha - \sin^2\alpha - \cos\beta\cos\alpha = 0$ Ec. 32

• $Y(2) \Rightarrow \cos^2\beta - \sin^2\beta + \sin\beta\sin\alpha - \cos\beta\cos\gamma = 0$ Ec. 33

• $Y(3) \Rightarrow \cos^2\gamma - \sin^2\gamma + \sin\beta\sin\gamma - \cos\gamma\cos\delta = 0$ Ec. 34

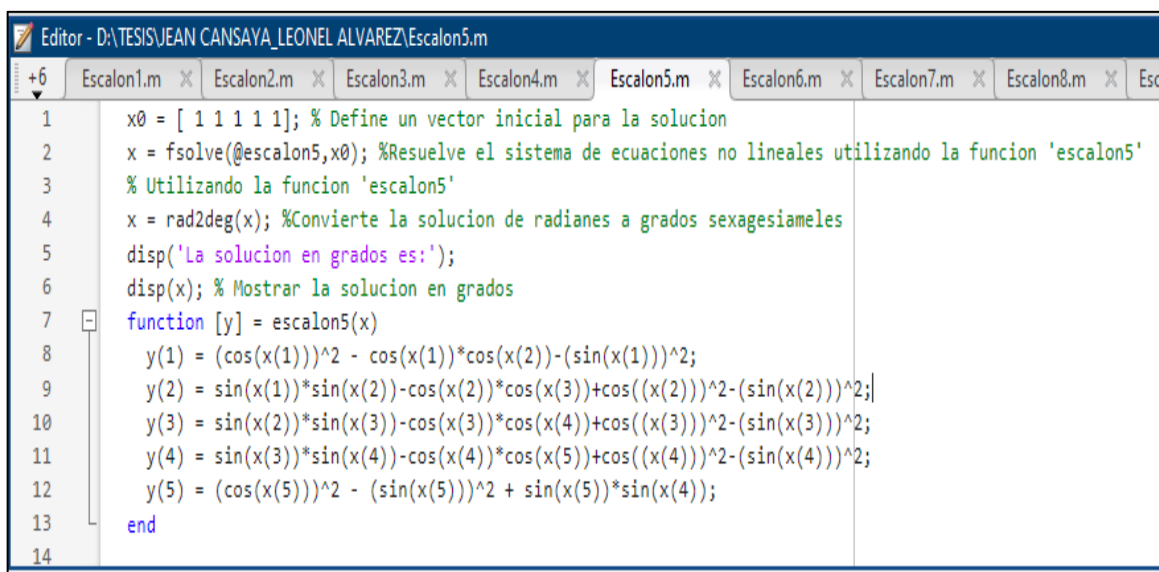
• $Y(4) \Rightarrow \cos^2\delta - \sin^2\delta + \sin\gamma\sin\delta - \cos\delta\cos\varepsilon = 0$ Ec. 35

• $Y(5) \Rightarrow \cos^2\varepsilon - \sin^2\varepsilon + \sin\delta\sin\varepsilon = 0$ Ec. 36

Procedemos a obtener los ángulos $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ y ε elaborando el algoritmo haciendo uso del MATLAB, mostrado en la Figura 47.

Figura 47

Instrucciones en Matlab para determinar las ecuaciones del ángulo óptimo de cinco escalones



```

1  x0 = [ 1 1 1 1 1]; % Define un vector inicial para la solucion
2  x = fsolve(@escalon5,x0); %Resuelve el sistema de ecuaciones no lineales utilizando la funcion 'escalon5'
3  % Utilizando la funcion 'escalon5'
4  x = rad2deg(x); %Convierte la solucion de radianes a grados sexagesimales
5  disp('La solucion en grados es:');
6  disp(x); % Mostrar la solucion en grados
7  function [y] = escalon5(x)
8      y(1) = (cos(x(1)))^2 - cos(x(1))*cos(x(2))-(sin(x(1)))^2;
9      y(2) = sin(x(1))*sin(x(2))-cos(x(2))*cos(x(3))+cos((x(2)))^2-(sin(x(2)))^2;
10     y(3) = sin(x(2))*sin(x(3))-cos(x(3))*cos(x(4))+cos((x(3)))^2-(sin(x(3)))^2;
11     y(4) = sin(x(3))*sin(x(4))-cos(x(4))*cos(x(5))+cos((x(4)))^2-(sin(x(4)))^2;
12     y(5) = (cos(x(5)))^2 - (sin(x(5)))^2 + sin(x(5))*sin(x(4));
13 end
14

```

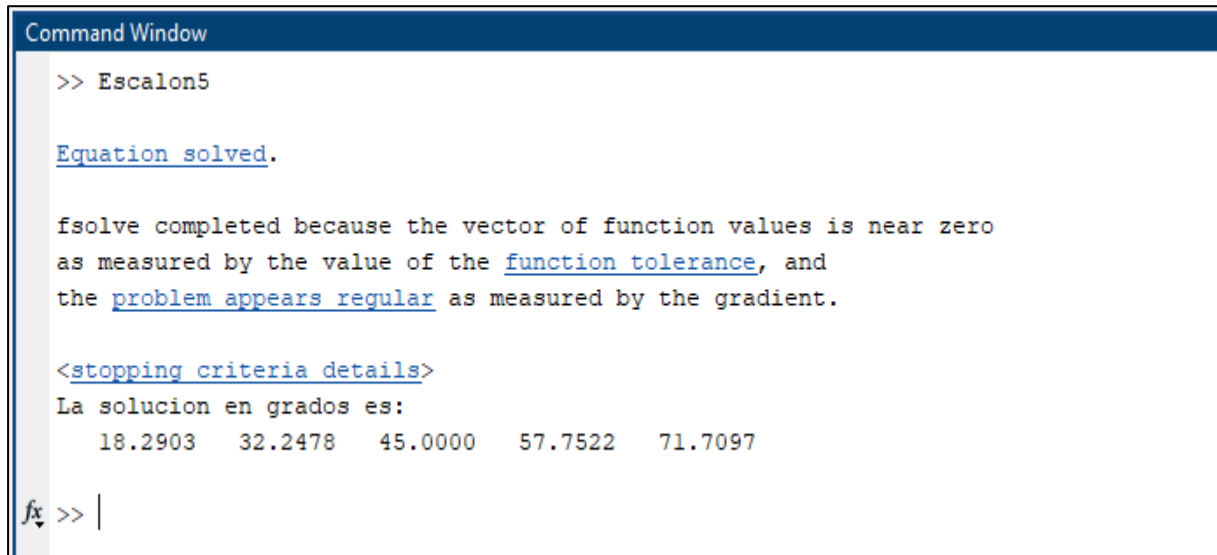
Nota. Elaboración propia con captura de gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Donde los ángulos $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ y ε como $x(1), x(2), x(3), x(4)$ y $x(5)$ respectivamente.

Ejecutamos el programa y convirtiendo estos ángulos obtenemos en Matlab los ángulos convertidos de radianes a grados sexagesimales.

Figura 48

Solución en Matlab para calcular el ángulo óptimo de cinco escalones.



```

Command Window

>> Escalon5

Equation solved.

fsolve completed because the vector of function values is near zero
as measured by the value of the function tolerance, and
the problem appears regular as measured by the gradient.

<stopping criteria details>
La solución en grados es:
    18.2903    32.2478    45.0000    57.7522    71.7097

fx >> |
  
```

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Entonces los ángulos obtenidos por el MATLAB serán:

- $\alpha = 18.2903^\circ$
- $\beta = 32.2478^\circ$
- $\gamma = 45.0000^\circ$
- $\delta = 57.7522^\circ$
- $\varepsilon = 71.7097^\circ$

Remplazando los valores de los ángulos en la sección geométrica S_g .

$$S_g = D^2 \cos \alpha \sin \alpha + D^2 \cos \beta \sin \beta - D^2 \cos \beta \sin \alpha + D^2 \cos \gamma \sin \gamma - D^2 \cos \gamma \sin \beta + D^2 \cos \delta \sin \delta - D^2 \cos \delta \sin \gamma + D^2 \cos \varepsilon \sin \varepsilon - D^2 \cos \varepsilon \sin \delta$$

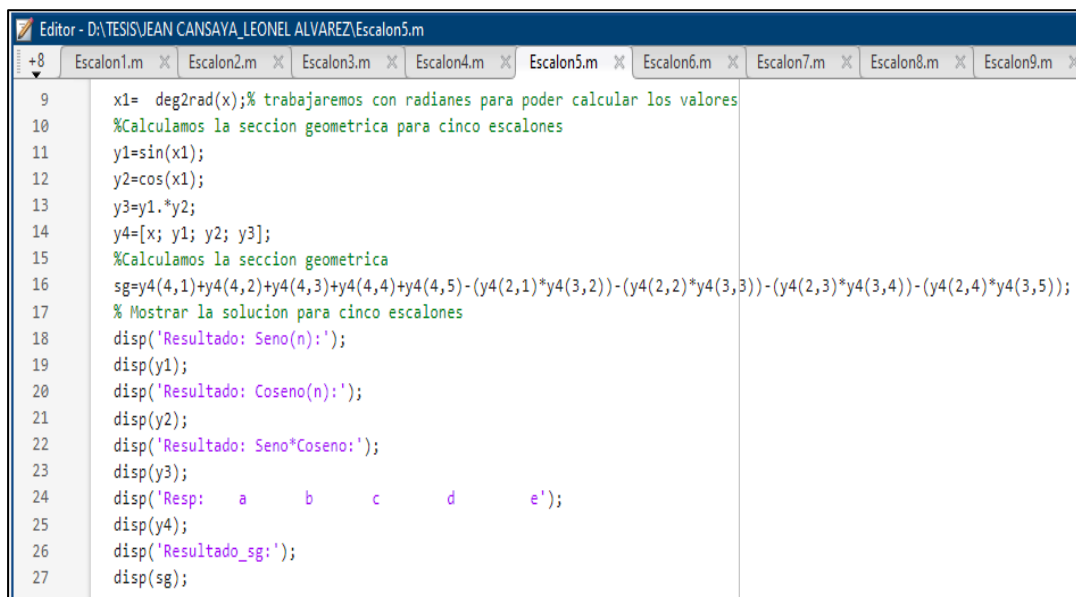
Despejando D^2 .

$$S_g = D^2 (\cos \alpha \sin \alpha + \cos \beta \sin \beta - \cos \beta \sin \alpha + \cos \gamma \sin \gamma - \cos \gamma \sin \beta + \cos \delta \sin \delta - \cos \delta \sin \gamma + \cos \varepsilon \sin \varepsilon - \cos \varepsilon \sin \delta)$$

Haremos uso de Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador, como se muestra en la Figura 49.

Figura 49

Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de cinco escalones



```

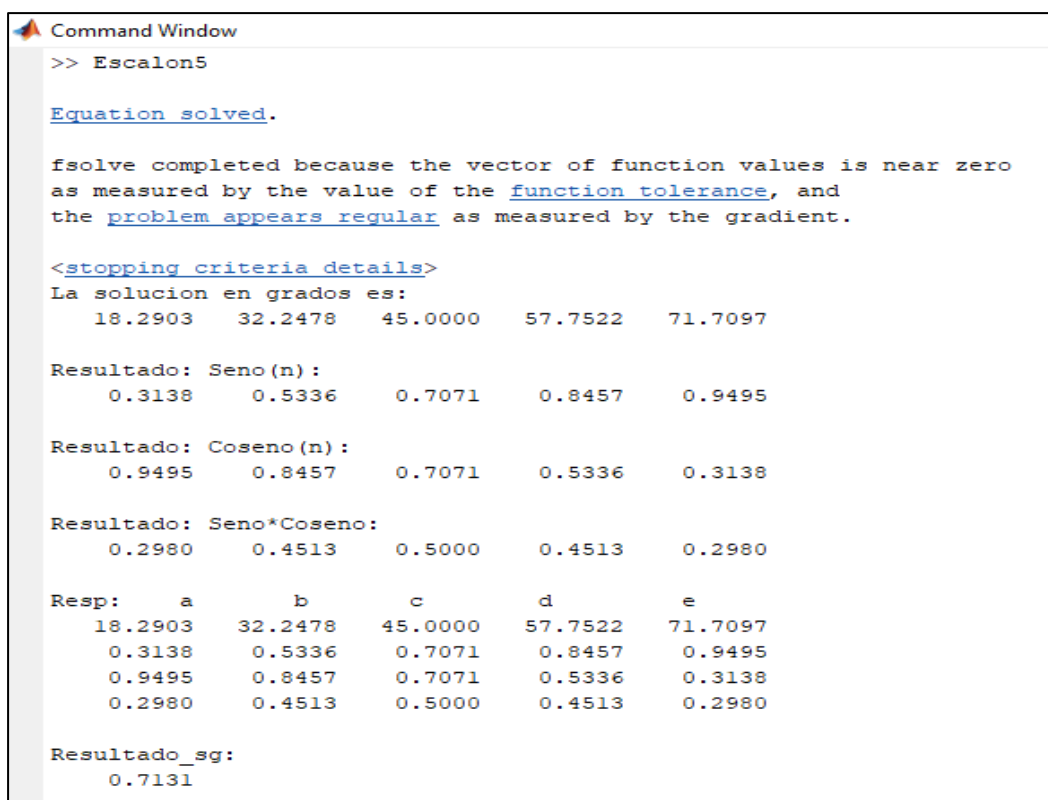
Editor - D:\TESIS\JEAN CANSAYA_LEONEL ALVAREZ\Escalon5.m
+8 Escalon1.m Escalon2.m Escalon3.m Escalon4.m Escalon5.m Escalon6.m Escalon7.m Escalon8.m Escalon9.m
9 x1= deg2rad(x);% trabajaremos con radianes para poder calcular los valores
10 %Calculamos la seccion geometrica para cinco escalones
11 y1=sin(x1);
12 y2=cos(x1);
13 y3=y1.*y2;
14 y4=[x; y1; y2; y3];
15 %Calculamos la seccion geometrica
16 sg=y4(4,1)+y4(4,2)+y4(4,3)+y4(4,4)+y4(4,5)-(y4(2,1)*y4(3,2))-(y4(2,2)*y4(3,3))-(y4(2,3)*y4(3,4))-(y4(2,4)*y4(3,5));
17 % Mostrar la solucion para cinco escalones
18 disp('Resultado: Seno(n):');
19 disp(y1);
20 disp('Resultado: Coseno(n):');
21 disp(y2);
22 disp('Resultado: Seno*Coseno:');
23 disp(y3);
24 disp('Resp: a b c d e');
25 disp(y4);
26 disp('Resultado_sg:');
27 disp(sg);

```

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Figura 50

Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de cinco escalones



```

Command Window
>> Escalon5

Equation solved.

fsolve completed because the vector of function values is near zero
as measured by the value of the function tolerance, and
the problem appears regular as measured by the gradient.

<stopping criteria details>
La solucion en grados es:
    18.2903    32.2478    45.0000    57.7522    71.7097

Resultado: Seno(n):
    0.3138    0.5336    0.7071    0.8457    0.9495

Resultado: Coseno(n):
    0.9495    0.8457    0.7071    0.5336    0.3138

Resultado: Seno*Coseno:
    0.2980    0.4513    0.5000    0.4513    0.2980

Resp:      a      b      c      d      e
    18.2903    32.2478    45.0000    57.7522    71.7097
    0.3138    0.5336    0.7071    0.8457    0.9495
    0.9495    0.8457    0.7071    0.5336    0.3138
    0.2980    0.4513    0.5000    0.4513    0.2980

Resultado_sg:
    0.7131

```

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB

Tabla 16
Ángulos para cinco escalones

	α	β	γ	δ	ϵ
Ángulos	18.2903	32.2478	45	57.7522	71.7097
Sen	0.3138	0.5336	0.7071	0.8457	0.9495
Cos	0.9495	0.8457	0.7071	0.5336	0.3138
Cos*Sen	0.2980	0.4513	0.5000	0.4513	0.2980
Sg	$0.7131 \cdot D^2$				

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Con los datos obtenidos mediante Matlab reemplazamos en la Ecuación 30

$$S_g = 0.7131D^2 \quad \text{Ec. 37}$$

Se emplea nuevamente el software MATLAB para aplicar las ecuaciones (6), (7) y (8), con el fin de calcular las expresiones correspondientes a la sección neta del núcleo, el factor de utilización y el factor de hierro

Figura 51

Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de cinco escalones para materiales de grano orientado convencionales mejorados.

```

Editor - D:\TESIS\JUAN CANSAYA_LEONEL ALVAREZ\Escalon5.m
+8 Escalon2.m Escalon3.m Escalon4.m Escalon5.m Escalon6.m Escalon7.m Escalon8.m Escalon9.m
29
30 % calculamos la la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro
31 % del núcleo del transformador de CINCO ESCALONES
32 %Utilizamos el factor de apilamiento para materiales de grano orientado convencionales mejorados(CG0)
33 % M 105-23 S AM FCE__M 114-27 S AM FCE__M 117-30 S AM FCE__M 125-35 S AMFCE
34 fa=[0.945; 0.950; 0.955; 0.960];
35 %Calculamos la seccion neta del nucleo del transformador para cinco escalones
36 Sn1=fa(1,1)*sg; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
37 Sn2=fa(2,1)*sg; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
38 Sn3=fa(3,1)*sg; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
39 Sn4=fa(4,1)*sg; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
40 %Calculamos el factor de utilizacion del nucleo del transformador para cinco escalones
41 fu1=4*Sn1/pi; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
42 fu2=4*Sn2/pi; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
43 fu3=4*Sn3/pi; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
44 fu4=4*Sn4/pi; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
45 %Calculamos el factor de hierro del nucleo del transformador para cinco escalones
46 ffe1=Sn1; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
47 ffe2=Sn2; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
48 ffe3=Sn3; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
49 ffe4=Sn4; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
50 %Ordenamos los datos calculados
51 Datos=[0.945 Sn1 fu1 ffe1; 0.950 Sn2 fu2 ffe2; 0.955 Sn3 fu3 ffe3; 0.960 Sn4 fu4 ffe4];
52 disp('Datos(5): fa sn fu ffe');
53 disp(Datos);
54

```

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Figura 52

Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de cinco escalones

Command Window				
Datos(5):	fa	sn	fu	ffe
	0.9450	0.6738	0.8580	0.6738
	0.9500	0.6774	0.8625	0.6774
	0.9550	0.6810	0.8670	0.6810
	0.9600	0.6845	0.8716	0.6845

Nota. Elaboración propia y captura de datos a partir de datos del software MATLAB (2025)

Tabla 17

Cálculo de la sección neta, factor de utilización y factor del hierro para materiales magnéticos de hierro de grano orientado convencional mejorado para cinco escalones

ACERO DE GRANO ORIENTADO CONVENCIONAL MEJORADO	fa	Sn	fu	f_{FE}
M105-23 S AM FCE	0.945	$0.673843 \cdot D^2$	0.857963	0.673843
M114-27 S AM FCE	0.950	$0.677408 \cdot D^2$	0.862503	0.677408
M117-30 S AM FCE	0.955	$0.680973 \cdot D^2$	0.867042	0.680973
M125-35 S AM FCE	0.960	$0.684539 \cdot D^2$	0.871582	0.684539

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Reemplazando los valores de los ángulos en las medidas de nuestro escalón, en las relaciones siguientes.

1 escalón:

- $b_1 = D \cos \alpha = D \cos(18.2903) = 0.9495D$
- $c_1 = D \sin \alpha = D \sin(18.2903) = 0.3138D$

2 escalón:

- $b_2 = D \cos \beta = D \cos(32.2478) = 0.8457D$
- $c_2 = D \sin \beta = D \sin(32.2478) = 0.5336D$

3 escalón:

- $b_3 = D \cos \gamma = D \cos(45) = 0.7071D$
- $c_3 = D \sin \gamma = D \sin(45) = 0.7071D$

4 escalon:

- $b_4 = D \cos \delta = D \cos(57.7522) = 0.5336D$
- $c_4 = D \sin \delta = D \sin(57.7522) = 0.8457D$

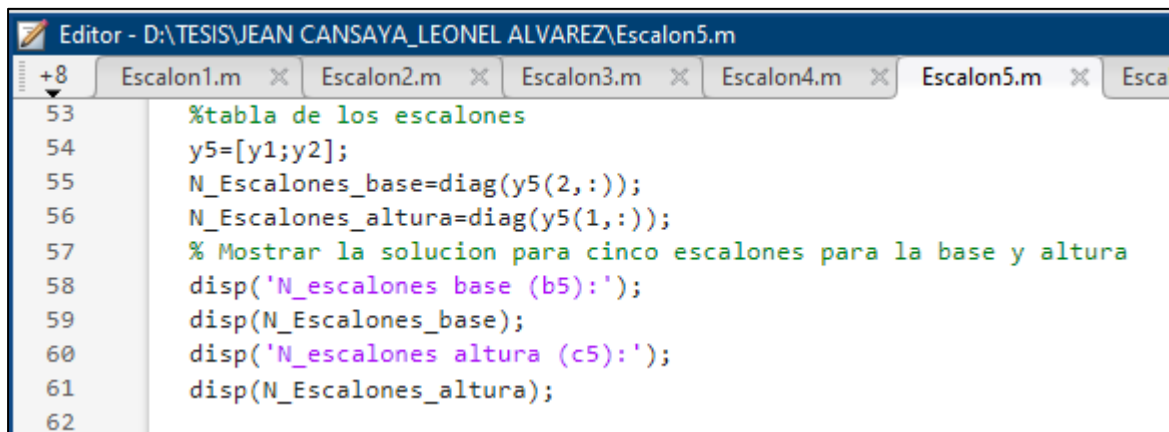
5 escalón:

- $b_5 = D \cos \varepsilon = D \cos(71.7097) = 0.3138 D$
- $c_5 = D \sin \varepsilon = D \sin(71.7097) = 0.9495D$

Se desarrolla el algoritmo en Matlab para determinar las dimensiones de los escalones base y altura de los cinco escalones, la misma se muestra en las Figuras 53 y 54

Figura 53

Código en Matlab para calcular los valores de los ángulos de nuestros escalones del núcleo del transformador de cinco escalones.



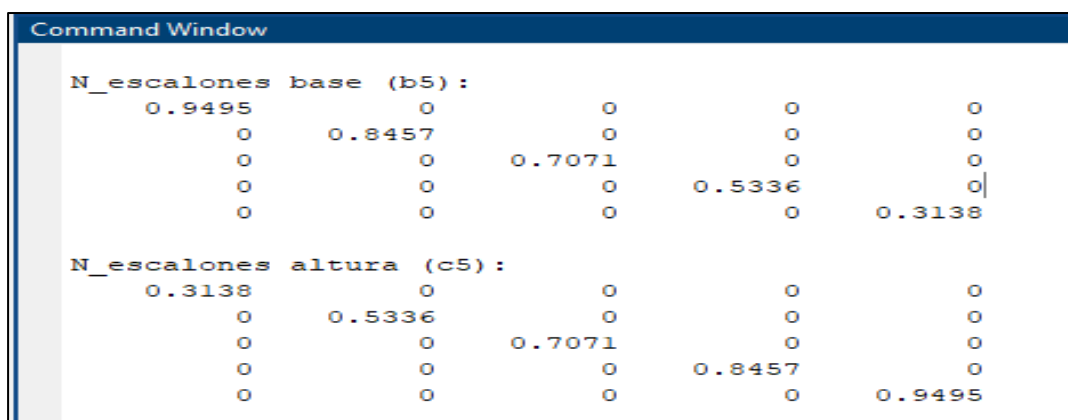
```

Editor - D:\TESIS\JEAN CANSAYA_LEONEL ALVAREZ\Escalon5.m
+8 Escalon1.m Escalon2.m Escalon3.m Escalon4.m Escalon5.m Escal
53 %tabla de los escalones
54 y5=[y1;y2];
55 N_Escalones_base=diag(y5(2,:));
56 N_Escalones_altura=diag(y5(1,:));
57 % Mostrar la solucion para cinco escalones para la base y altura
58 disp('N_escalones base (b5):');
59 disp(N_Escalones_base);
60 disp('N_escalones altura (c5):');
61 disp(N_Escalones_altura);
62
  
```

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Figura 54

Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de cinco escalones.



```

Command Window

N_escalones base (b5):
    0.9495         0         0         0         0
         0    0.8457         0         0         0
         0         0    0.7071         0         0
         0         0         0    0.5336         0
         0         0         0         0    0.3138

N_escalones altura (c5):
    0.3138         0         0         0         0
         0    0.5336         0         0         0
         0         0    0.7071         0         0
         0         0         0    0.8457         0
         0         0         0         0    0.9495
  
```

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

En la siguiente tabla se muestra la altura (c) y el ancho o base (b) de las chapas magnéticas en relación con el diámetro de la circunferencia (D).

Tabla 18*Resultados de base y altura de las chapas magnéticas para cinco escalones.*

N° Escalon	b1	b2	b3	b4	b5	c1	c2	c3	c4	c5
1	0.9495D					0.3138D				
2		0.8457D					0.5336D			
3			0.7071D					0.7071D		
4				0.5336D					0.8457D	
5					0.3138D					0.9495D

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

3.6 Dimensionamiento angular para seis escalones

Se representa gráficamente el área transversal del núcleo del transformador para el caso de **seis escalones**, el cual se encuentra inscrito dentro de un círculo. Las dimensiones del núcleo, identificadas como b1, b2, b3, b4, b5, b6 y c1, c2, c3, c4, c5, c6 se definen en función del **diámetro D** del círculo inscrito y de los ángulos correspondientes α , β , γ , δ , ε , ζ

Donde:

b1, b2, b3, b4, b5, b6: Ancho o base de la lámina magnética

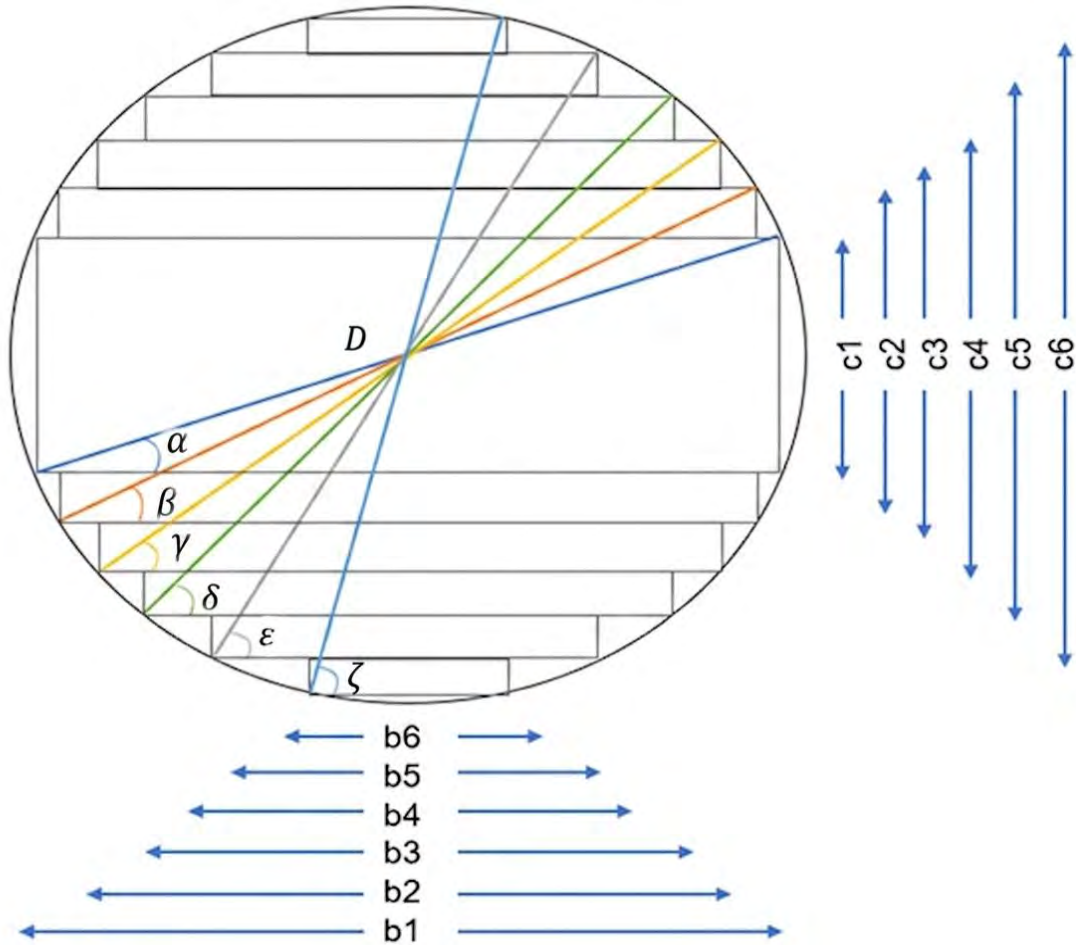
c1, c2, c3, c4, c5, c6: Altura del acoplamiento de la lámina magnética

D: Diámetro de la circunferencia

La gráfica se muestra en la figura 55.

Figura 55

Área transversal del núcleo para seis escalones inscrito dentro del círculo



Nota. Elaboración propia mediante herramienta gráfica

Sección Geométrica (S_g)

$$S_g = b_1 c_1 + b_2 (c_2 - c_1) + b_3 (c_3 - c_2) + b_4 (c_4 - c_3) + b_5 (c_5 - c_4) + b_6 (c_6 - c_5) \quad \text{Ec. 38}$$

- $b_1 = D \cos \alpha$; $b_2 = D \cos \beta$; $b_3 = D \cos \gamma$; $b_4 = D \cos \delta$; $b_5 = D \cos \varepsilon$; $b_6 = D \cos \zeta$
- $c_1 = D \sin \alpha$; $c_2 = D \sin \beta$; $c_3 = D \sin \gamma$; $c_4 = D \sin \delta$; $c_5 = D \sin \varepsilon$; $c_6 = D \sin \zeta$

Reemplazando los valores:

$$S_g = D^2 \cos \alpha \sin \alpha + D^2 \cos \beta \sin \beta - D^2 \cos \beta \sin \alpha + D^2 \cos \gamma \sin \gamma - D^2 \cos \gamma \sin \beta + D^2 \cos \delta \sin \delta - D^2 \cos \delta \sin \gamma + D^2 \cos \varepsilon \sin \varepsilon - D^2 \cos \varepsilon \sin \delta + D^2 \cos \zeta \sin \zeta - D^2 \cos \zeta \sin \varepsilon$$

Aplicando el criterio de optimización:

$$\frac{dS_g}{d\alpha} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\beta} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\gamma} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\delta} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\varepsilon} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\zeta} = 0$$

Ec. 39

Para $\frac{dS_g}{d\alpha} = 0$

$$\cos^2\alpha - \sin^2\alpha - \cos\beta\cos\alpha = 0$$

Para $\frac{dS_g}{d\beta} = 0$

$$\cos^2\beta - \sin^2\beta + \sin\beta\sin\alpha - \cos\beta\cos\gamma = 0$$

Para $\frac{dS_g}{d\gamma} = 0$

$$\cos^2\gamma - \sin^2\gamma + \sin\beta\sin\gamma - \cos\gamma\cos\delta = 0$$

Para $\frac{dS_g}{d\delta} = 0$

$$\cos^2\delta - \sin^2\delta + \sin\gamma\sin\delta - \cos\delta\cos\epsilon = 0$$

Para $\frac{dS_g}{d\epsilon} = 0$

$$\cos^2\epsilon - \sin^2\epsilon + \sin\delta\sin\epsilon - \cos\epsilon\cos\zeta = 0$$

Para $\frac{dS_g}{d\zeta} = 0$

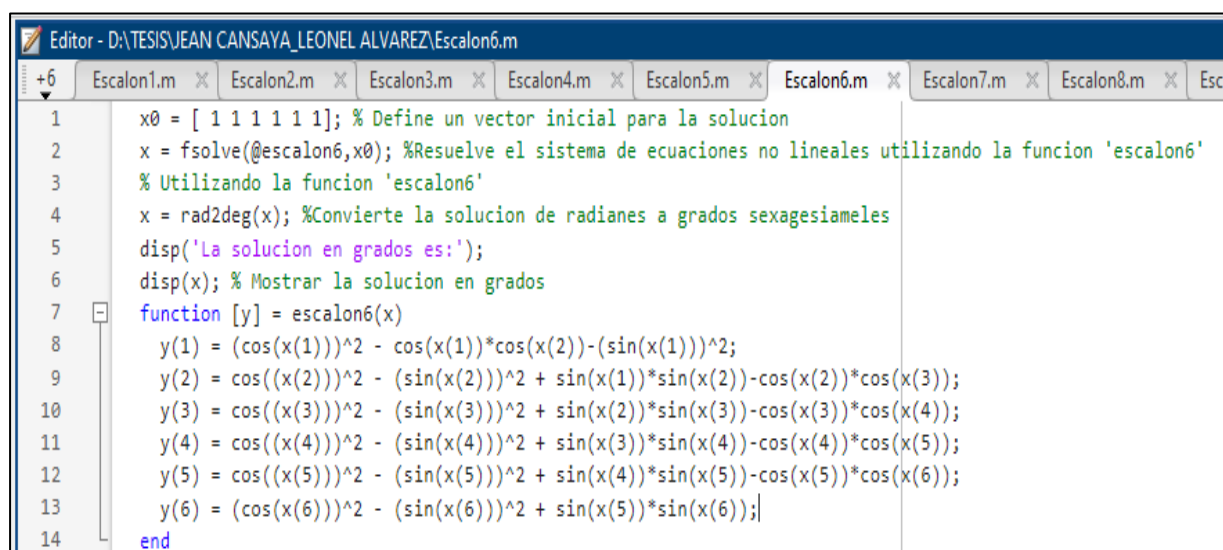
$$\cos^2\zeta - \sin^2\zeta + \sin\epsilon\sin\zeta = 0$$

Entonces las Ecuaciones serán similares a los casos anteriores:

Procedemos a obtener los ángulos α , β , γ , δ , ϵ y ζ haciendo uso del MATLAB.

Figura 56

Instrucciones en Matlab para calcular el ángulo óptimo de seis escalones



```

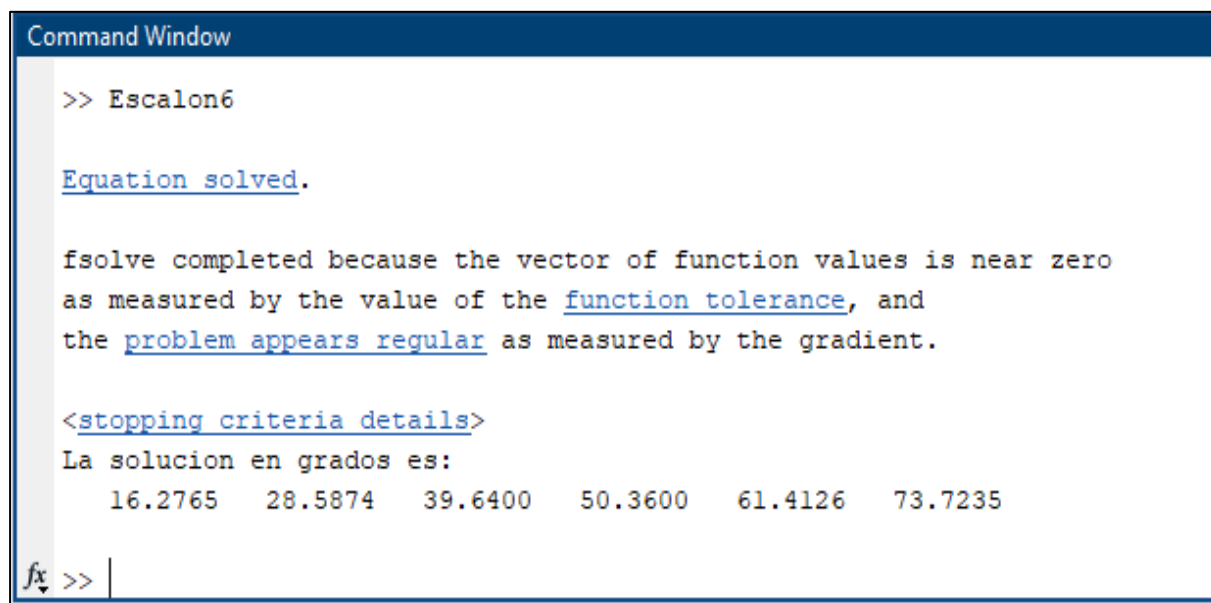
Editor - D:\TESIS\JEAN CANSAYA_LEONEL ALVAREZ\Escalon6.m
+6 Escalon1.m Escalon2.m Escalon3.m Escalon4.m Escalon5.m Escalon6.m Escalon7.m Escalon8.m Esca
1 x0 = [ 1 1 1 1 1 1]; % Define un vector inicial para la solucion
2 x = fsolve(@escalon6,x0); %Resuelve el sistema de ecuaciones no lineales utilizando la funcion 'escalon6'
3 % Utilizando la funcion 'escalon6'
4 x = rad2deg(x); %Convierte la solucion de radianes a grados sexagesimales
5 disp('La solucion en grados es:');
6 disp(x); % Mostrar la solucion en grados
7 function [y] = escalon6(x)
8     y(1) = (cos(x(1)))^2 - cos(x(1))*cos(x(2))-(sin(x(1)))^2;
9     y(2) = cos((x(2)))^2 - (sin(x(2)))^2 + sin(x(1))*sin(x(2))-cos(x(2))*cos(x(3));
10    y(3) = cos((x(3)))^2 - (sin(x(3)))^2 + sin(x(2))*sin(x(3))-cos(x(3))*cos(x(4));
11    y(4) = cos((x(4)))^2 - (sin(x(4)))^2 + sin(x(3))*sin(x(4))-cos(x(4))*cos(x(5));
12    y(5) = cos((x(5)))^2 - (sin(x(5)))^2 + sin(x(4))*sin(x(5))-cos(x(5))*cos(x(6));
13    y(6) = (cos(x(6)))^2 - (sin(x(6)))^2 + sin(x(5))*sin(x(6));
14 end
  
```

Nota. Elaboración propia y captura de gráfico a partir de datos del software MATLAB (2025)

Donde los ángulos α , β , γ , δ , ε y ζ son $x(1)$, $x(2)$, $x(3)$, $x(4)$, $x(5)$ y $x(6)$ respectivamente. Luego ejecutamos el programa y convirtiendo estos ángulos el Matlab convierte radianes a grados sexagesimales.

Figura 57

Solución en Matlab para calcular el ángulo óptimo de seis escalones.



```

Command Window

>> Escalon6

Equation solved.

fsolve completed because the vector of function values is near zero
as measured by the value of the function tolerance, and
the problem appears regular as measured by the gradient.

<stopping criteria details>
La solución en grados es:
    16.2765    28.5874    39.6400    50.3600    61.4126    73.7235

fx >>

```

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Entonces los ángulos obtenidos por el MATLAB serán:

- $\alpha = 16.2765^\circ$
- $\beta = 28.5874^\circ$
- $\gamma = 39.6400^\circ$
- $\delta = 50.3600^\circ$
- $\varepsilon = 61.4126^\circ$
- $\zeta = 73.7235^\circ$

Remplazando los valores de los ángulos en la sección geométrica S_g .

$$S_g = D^2 \cos \alpha \sin \alpha + D^2 \cos \beta \sin \beta - D^2 \cos \beta \sin \alpha + D^2 \cos \gamma \sin \gamma - D^2 \cos \gamma \sin \beta + D^2 \cos \delta \sin \delta - D^2 \cos \delta \sin \gamma + D^2 \cos \varepsilon \sin \varepsilon - D^2 \cos \varepsilon \sin \delta + D^2 \cos \zeta \sin \zeta - D^2 \cos \zeta \sin \varepsilon$$

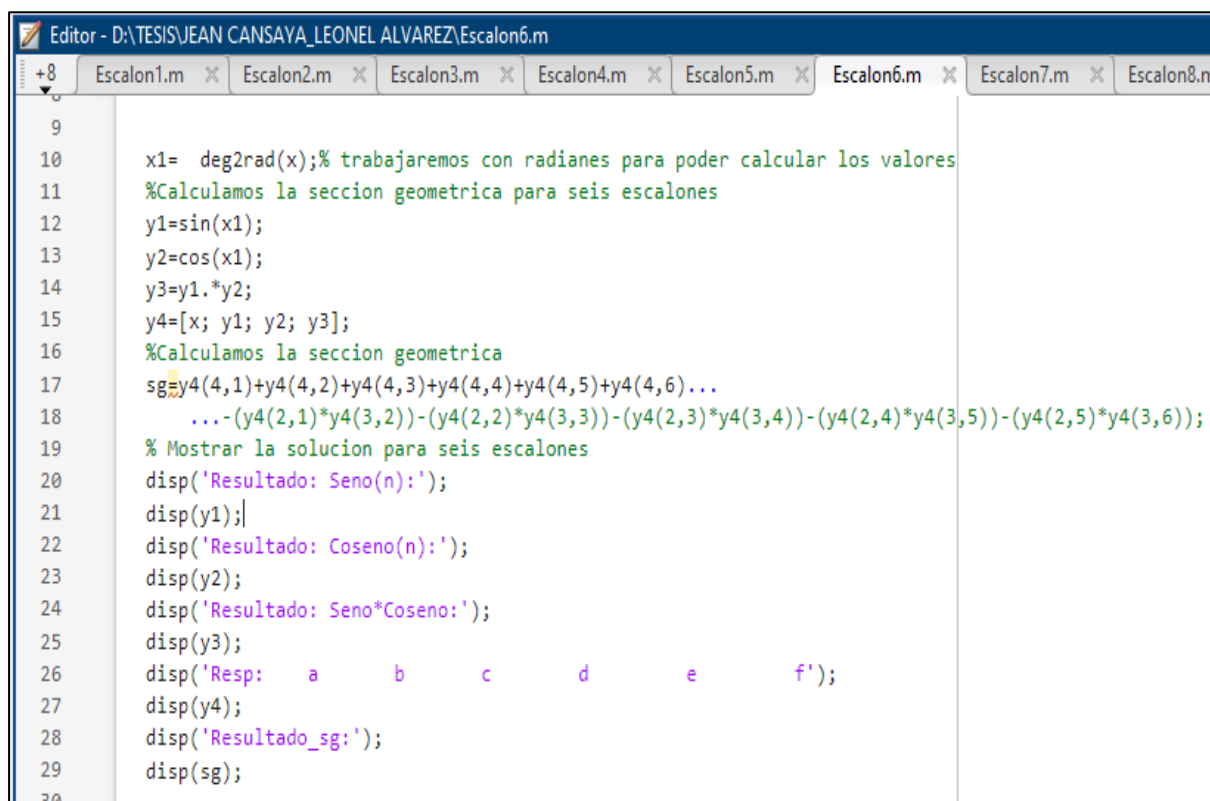
Despejando D^2 .

$$S_g = D^2 (\cos \alpha \sin \alpha + \cos \beta \sin \beta - \cos \beta \sin \alpha + \cos \gamma \sin \gamma - \cos \gamma \sin \beta + \cos \delta \sin \delta - \cos \delta \sin \gamma + \cos \varepsilon \sin \varepsilon - \cos \varepsilon \sin \delta + \cos \zeta \sin \zeta - \cos \zeta \sin \varepsilon)$$

Haremos uso de Matlab para calcular la expresión S_g .

Figura 58

Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de seis escalones.



```

Editor - D:\TESIS\JEAN CANSAYA_LEONEL ALVAREZ\Escalon6.m
+8 Escalon1.m Escalon2.m Escalon3.m Escalon4.m Escalon5.m Escalon6.m Escalon7.m Escalon8.m
9
10 x1= deg2rad(x);% trabajaremos con radianes para poder calcular los valores
11 %Calculamos la seccion geometrica para seis escalones
12 y1=sin(x1);
13 y2=cos(x1);
14 y3=y1.*y2;
15 y4=[x; y1; y2; y3];
16 %Calculamos la seccion geometrica
17 sg=y4(4,1)+y4(4,2)+y4(4,3)+y4(4,4)+y4(4,5)+y4(4,6)...
18 ...-(y4(2,1)*y4(3,2))-(y4(2,2)*y4(3,3))-(y4(2,3)*y4(3,4))-(y4(2,4)*y4(3,5))-(y4(2,5)*y4(3,6));
19 % Mostrar la solucion para seis escalones
20 disp('Resultado: Seno(n):');
21 disp(y1);
22 disp('Resultado: Coseno(n):');
23 disp(y2);
24 disp('Resultado: Seno*Coseno:');
25 disp(y3);
26 disp('Resp: a b c d e f');
27 disp(y4);
28 disp('Resultado_sg:');
29 disp(sg);
30
  
```

Nota. Elaboración propia y captura de grafica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Según Del Vecchio et al., 2010:

El desarrollo de un código en Matlab para calcular la sección neta, el factor de utilización y el factor de hierro del núcleo de un transformador de seis escalones constituye una herramienta esencial en el análisis avanzado de su diseño. Este tipo de programación permite automatizar cálculos complejos asociados a la geometría escalonada, reduciendo errores y mejorando la precisión de los resultados. El uso de seis escalones implica una aproximación más fina a la sección circular ideal, lo que exige un tratamiento numérico cuidadoso para determinar correctamente áreas y proporciones. Matlab facilita este proceso al permitir integrar funciones matemáticas, modelado geométrico y procesamiento de datos en un solo entorno. Además, el código posibilita evaluar el comportamiento magnético del núcleo frente a distintas configuraciones y dimensiones. De esta manera, se optimiza el diseño estructural y electromagnético del transformador. En conjunto, esta herramienta contribuye a mejorar la eficiencia del material magnético y la confiabilidad operativa (p.27)

Figura 59

Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de seis escalones.

```

Command Window

>> Escalon6

Equation solved.

fsolve completed because the vector of function values is near zero
as measured by the value of the function tolerance, and
the problem appears regular as measured by the gradient.

<stopping criteria details>
La solucion en grados es:
    16.2765    28.5874    39.6400    50.3600    61.4126    73.7235

Resultado: Seno(n) :
    0.2803    0.4785    0.6380    0.7701    0.8781    0.9599

Resultado: Coseno(n) :
    0.9599    0.8781    0.7701    0.6380    0.4785    0.2803

Resultado: Seno*Coseno:
    0.2690    0.4202    0.4913    0.4913    0.4202    0.2690

Resp:      a          b          c          d          e          f
    16.2765    28.5874    39.6400    50.3600    61.4126    73.7235
    0.2803    0.4785    0.6380    0.7701    0.8781    0.9599
    0.9599    0.8781    0.7701    0.6380    0.4785    0.2803
    0.2690    0.4202    0.4913    0.4913    0.4202    0.2690

Resultado_sg:
    0.7248

```

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Tabla 19

Ángulos para seis escalones

	α	β	γ	δ	ϵ	ζ
Ángulos	16.2765	28.5874	39.64	50.36	61.4126	73.7235
Sen	0.2803	0.4785	0.6380	0.7701	0.8781	0.9599
Cos	0.9599	0.8781	0.7701	0.6380	0.4785	0.2803
Cos*Sen	0.2690	0.4202	0.4913	0.4913	0.4202	0.2690
Sg	$0.7248 \cdot D^2$					

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

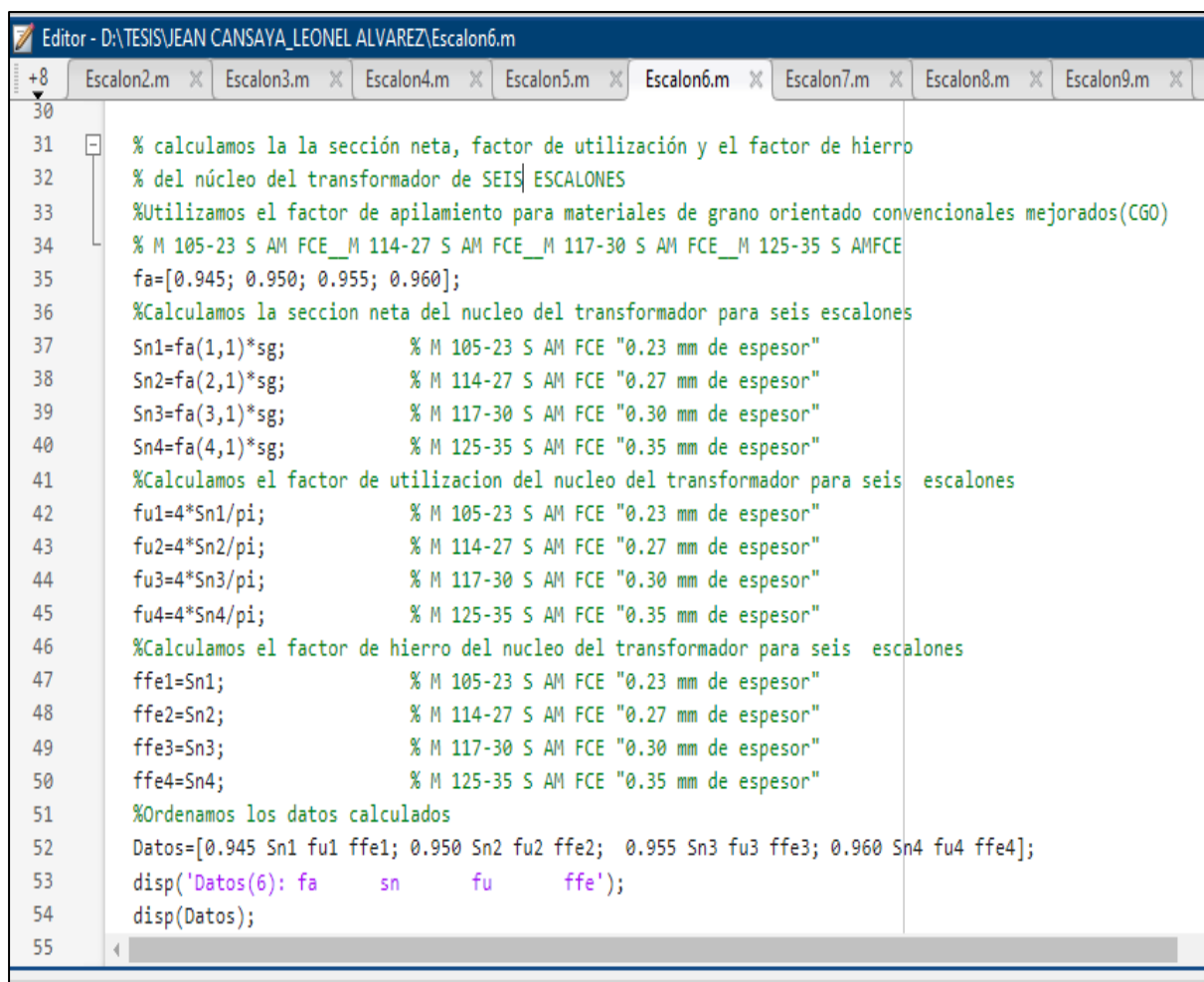
Con los datos obtenidos mediante el Matlab, reemplazamos en la Ecuación 38

$$S_g = 0.7248D^2$$

Hacemos uso del Matlab y las ecuaciones (6, 7 y 8) para calcular las expresiones de la sección neta, el factor de utilización y el factor de hierro del núcleo de 6 escalones.

Figura 60

Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de seis escalones para materiales de grano orientado convencionales mejorados.



```

Editor - D:\TESIS\JEAN CANSAYA_LEONEL ALVAREZ\Escalon6.m
+8 Escalon2.m Escalon3.m Escalon4.m Escalon5.m Escalon6.m Escalon7.m Escalon8.m Escalon9.m E
30
31 % calculamos la la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro
32 % del núcleo del transformador de SEIS ESCALONES
33 %Utilizamos el factor de apilamiento para materiales de grano orientado convencionales mejorados(CGO)
34 % M 105-23 S AM FCE_M 114-27 S AM FCE_M 117-30 S AM FCE_M 125-35 S AMFCE
35 fa=[0.945; 0.950; 0.955; 0.960];
36 %Calculamos la seccion neta del nucleo del transformador para seis escalones
37 Sn1=fa(1,1)*sg; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
38 Sn2=fa(2,1)*sg; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
39 Sn3=fa(3,1)*sg; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
40 Sn4=fa(4,1)*sg; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
41 %Calculamos el factor de utilizacion del nucleo del transformador para seis escalones
42 fu1=4*Sn1/pi; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
43 fu2=4*Sn2/pi; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
44 fu3=4*Sn3/pi; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
45 fu4=4*Sn4/pi; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
46 %Calculamos el factor de hierro del nucleo del transformador para seis escalones
47 ffe1=Sn1; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
48 ffe2=Sn2; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
49 ffe3=Sn3; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
50 ffe4=Sn4; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
51 %Ordenamos los datos calculados
52 Datos=[0.945 Sn1 fu1 ffe1; 0.950 Sn2 fu2 ffe2; 0.955 Sn3 fu3 ffe3; 0.960 Sn4 fu4 ffe4];
53 disp('Datos(6): fa sn fu ffe');
54 disp(Datos);
55

```

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Figura 61

Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de seis escalones

Command Window				
Datos (6):	fa	sn	fu	ffe
	0.9450	0.6849	0.8721	0.6849
	0.9500	0.6886	0.8767	0.6886
	0.9550	0.6922	0.8813	0.6922
	0.9600	0.6958	0.8859	0.6958

Nota. Elaboración propia y captura de gráfico a partir de datos del software MATLAB (2025)

Tabla 20

Cálculo de la sección neta, factor de utilización y factor del hierro en los materiales magnéticos de hierro de grano orientado convencionales mejorados para seis escalones.

ACERO ELÉCTRICO DE GRANO ORIENTADO CONVENCIONAL MEJORADO	fa	Sn	fu	f_{FE}
M105-23 S AM FCE	0.945	$0.684935 \cdot D^2$	0.872086	0.684935
M114-27 S AM FCE	0.950	$0.688559 \cdot D^2$	0.876700	0.688559
M117-30 S AM FCE	0.955	$0.692183 \cdot D^2$	0.881314	0.692183
M125-35 S AM FCE	0.960	$0.695806 \cdot D^2$	0.885928	0.695806

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Reemplazando los valores de los ángulos en las medidas de nuestros escalones, en las siguientes relaciones.

1 escalón:

- $b_1 = D \cos \alpha = D \cos(16.2765) = 0.9599D$
- $c_1 = D \sin \alpha = D \sin(16.2765) = 0.2803D$

2 escalón:

- $b_2 = D \cos \beta = D \cos(28.5874) = 0.8781D$
- $c_2 = D \sin \beta = D \sin(28.5874) = 0.4785D$

3 escalón:

- $b_3 = D \cos \gamma = D \cos(39.64) = 0.7701D$
- $c_3 = D \sin \gamma = D \sin(39.64) = 0.6380D$

4 escalón:

- $b_4 = D \cos \delta = D \cos(50.36) = 0.6380D$
- $c_4 = D \sin \delta = D \sin(50.36) = 0.7701D$

5 escalón:

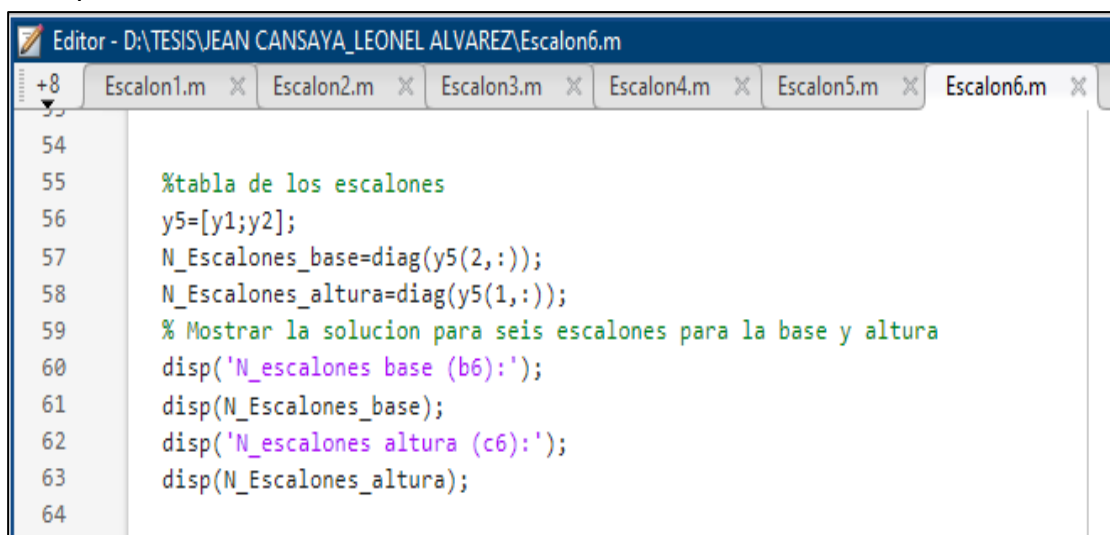
- $b_5 = D \cos \varepsilon = D \cos(61.3126) = 0.4785D$
- $c_5 = D \sin \varepsilon = D \sin(61.3126) = 0.8781D$

6 escalón:

- $b_6 = D \cos \zeta = D \cos(73.7235) = 0.2803D$
- $c_6 = D \sin \zeta = D \sin(73.7235) = 0.9599D$

Figura 62

Código en Matlab para calcular los valores de los ángulos de los escalones del núcleo del transformador de seis escalones



```

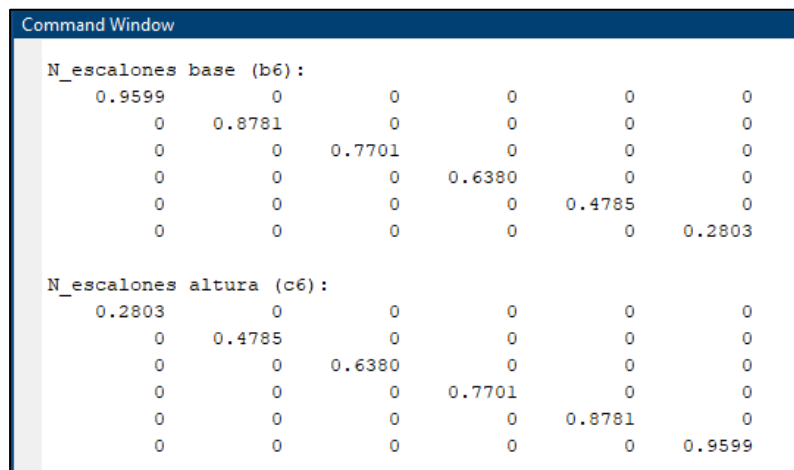
54
55 %tabla de los escalones
56 y5=[y1;y2];
57 N_Escalones_base=diag(y5(2,:));
58 N_Escalones_altura=diag(y5(1,:));
59 % Mostrar la solución para seis escalones para la base y altura
60 disp('N_escalones base (b6):');
61 disp(N_Escalones_base);
62 disp('N_escalones altura (c6):');
63 disp(N_Escalones_altura);
64

```

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Figura 63

Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de seis escalones



```

Command Window

N_escalones base (b6):
    0.9599         0         0         0         0         0
         0    0.8781         0         0         0         0
         0         0    0.7701         0         0         0
         0         0         0    0.6380         0         0
         0         0         0         0    0.4785         0
         0         0         0         0         0    0.2803

N_escalones altura (c6):
    0.2803         0         0         0         0         0
         0    0.4785         0         0         0         0
         0         0    0.6380         0         0         0
         0         0         0    0.7701         0         0
         0         0         0         0    0.8781         0
         0         0         0         0         0    0.9599

```

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

En la siguiente tabla se muestra la altura (c) y el ancho (b) de las chapas magnéticas en relación con el diámetro de la circunferencia (D)

Tabla 21

Resultados del ancho (b) de las láminas magnéticas para seis escalones

Numero de escalones	b1	b2	b3	b4	b5	b6
1	0.9599 D					
2		0.8781 D				
3			0.7701 D			
4				0.9999 D		
5					0.4785 D	
6						0.2803 D

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Tabla 22

Resultados de la altura (c) de las láminas magnéticas para seis escalones

Numero de escalones	c1	c2	c3	c4	c5	c6
1	0.2803 D					
2		0.4785 D				
3			0.6380 D			
4				0.7701 D		
5					0.8781 D	
6						0.9599 D

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

3.7 Dimensionamiento angular para siete escalones

Para el dimensionamiento del núcleo transversal del transformador para siete escalones, se grafica el círculo circunscrito del núcleo y los siete escalones y se definen las dimensiones como son (b1, b2, b3, b4, b5, b6, b7...c1, c2, c3, c4, c5, c6, c7) en función del diámetro D y los ángulos correspondientes para cada escalón $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta$ y η .

Donde:

$b1, b2, b3, b4, b5, b6, b7$: Ancho de la lámina magnética correspondiente a cada escalón

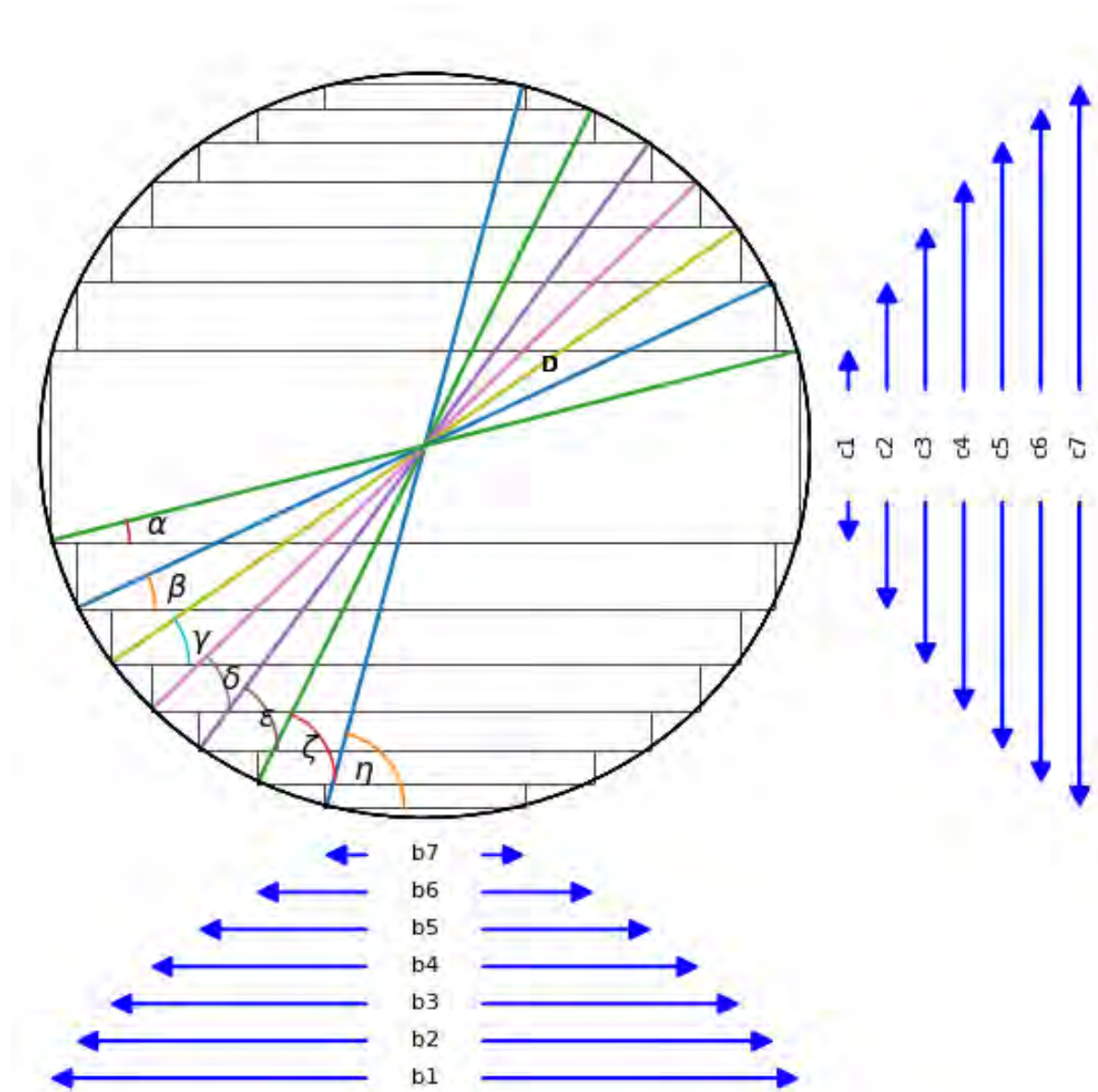
$c1, c2, c3, c4, c5, c6, c7$: Altura del acoplamiento de la lámina magnética de cada escalón

D : Diámetro de la circunferencia

La Figura 64 corresponde al dimensionamiento angular para siete escalones.

Figura 64

Área transversal del núcleo para siete escalones inscrito dentro del círculo



Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Sección geométrica (S_g)

$$S_g = b_1 c_1 + b_2 (c_2 - c_1) + b_3 (c_3 - c_2) + b_4 (c_4 - c_3) + b_5 (c_5 - c_4) + b_6 (c_6 - c_5) + b_7 (c_7 - c_6) \quad \text{Ec. 40}$$

- $b_1 = D \cos \alpha$; $b_2 = D \cos \beta$; $b_3 = D \cos \gamma$; $b_4 = D \cos \delta$; $b_5 = D \cos \varepsilon$; $b_6 = D \cos \zeta$; $b_7 = D \cos \eta$

- $c_1 = D \sin \alpha$; $c_2 = D \sin \beta$; $c_3 = D \sin \gamma$; $c_4 = D \sin \delta$; $c_5 = D \sin \varepsilon$; $c_6 = D \sin \zeta$; $c_7 = D \sin \eta$

Reemplazando los valores

$$S_g = D^2 \cos \alpha \sin \alpha + D^2 \cos \beta \sin \beta - D^2 \cos \beta \sin \alpha + D^2 \cos \gamma \sin \gamma - D^2 \cos \gamma \sin \beta + D^2 \cos \delta \sin \delta - D^2 \cos \delta \sin \gamma + D^2 \cos \varepsilon \sin \varepsilon - D^2 \cos \varepsilon \sin \delta + D^2 \cos \zeta \sin \zeta - D^2 \cos \zeta \sin \varepsilon + D^2 \cos \eta \sin \eta - D^2 \cos \eta \sin \zeta \quad \text{Ec. 41}$$

Aplicando el criterio de optimización

$$\frac{dS_g}{d\alpha} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\beta} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\gamma} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\delta} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\varepsilon} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\zeta} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\eta} = 0 \quad \text{Ec. 42}$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\alpha} = 0$$

$$\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha - \cos \beta \cos \alpha = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\beta} = 0$$

$$\cos^2 \beta - \sin^2 \beta + \sin \beta \sin \alpha - \cos \beta \cos \gamma = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\gamma} = 0$$

$$\cos^2 \gamma - \sin^2 \gamma + \sin \beta \sin \gamma - \cos \gamma \cos \delta = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\delta} = 0$$

$$\cos^2 \delta - \sin^2 \delta + \sin \gamma \sin \delta - \cos \delta \cos \varepsilon = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\varepsilon} = 0$$

$$\cos^2 \varepsilon - \sin^2 \varepsilon + \sin \delta \sin \varepsilon - \cos \varepsilon \cos \zeta = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\zeta} = 0$$

$$\cos^2 \zeta - \sin^2 \zeta + \sin \varepsilon \sin \zeta - \cos \zeta \cos \eta = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\eta} = 0$$

$$\cos^2 \eta - \sin^2 \eta + \sin \zeta \sin \eta = 0$$

Entonces las Ecuaciones serán similares a los casos anteriores:

Procedemos a obtener los ángulos $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta$ y η

Aplicando las instrucciones del Matlab para el cálculo de los ángulos óptimos para un núcleo escalonado de siete escalones se tiene la figura 65 mostrando las correspondientes instrucciones.

Figura 65

Instrucciones en Matlab para calcular el ángulo óptimo de siete escalones

```

1  x0 = [ 1 1 1 1 1 1 1]; % Define un vector inicial para la solución
2  x = fsolve(@escalon7,x0); %Resuelve el sistema de ecuaciones no lineales utilizando la función 'escalon7'
3  % Utilizando la función 'escalon7'
4  x = rad2deg(x); %Convierte la solución de radianes a grados sexagesimales
5  disp('La solución en grados es:');
6  disp(x); % Mostrar la solución en grados
7  function [y] = escalon7(x)
8      y(1) = (cos(x(1)))^2 - cos(x(1))*cos(x(2))-(sin(x(1)))^2;
9      y(2) = cos((x(2)))^2 - (sin(x(2)))^2 + sin(x(1))*sin(x(2))-cos(x(2))*cos(x(3));
10     y(3) = cos((x(3)))^2 - (sin(x(3)))^2 + sin(x(2))*sin(x(3))-cos(x(3))*cos(x(4));
11     y(4) = cos((x(4)))^2 - (sin(x(4)))^2 + sin(x(3))*sin(x(4))-cos(x(4))*cos(x(5));
12     y(5) = cos((x(5)))^2 - (sin(x(5)))^2 + sin(x(4))*sin(x(5))-cos(x(5))*cos(x(6));
13     y(6) = cos((x(6)))^2 - (sin(x(6)))^2 + sin(x(5))*sin(x(6))-cos(x(6))*cos(x(7));
14     y(7) = (cos(x(7)))^2 - (sin(x(7)))^2 + sin(x(6))*sin(x(7));
15 end
16

```

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Donde los ángulos $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta$ y η son $x(1), x(2), x(3), x(4), x(5), x(6)$ Y $x(7)$ respectivamente. Hacemos correr el programa y convirtiendo estos ángulos que determina el Matlab de radianes a grados sexagesimales.

Figura 66

Solución en Matlab para calcular el ángulo óptimo de siete escalones.

```

>> Escalon7

Equation solved.

fsolve completed because the vector of function values is near zero
as measured by the value of the function tolerance, and
the problem appears regular as measured by the gradient.

<stopping criteria details>
La solución en grados es:
    14.7314    25.8066    35.6373    45.0000    54.3627    64.1934    75.2686

```

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Por consiguiente, los ángulos obtenidos por el MATLAB serán:

- $\alpha = 14.7314^\circ$
- $\beta = 25.8066^\circ$
- $\gamma = 35.6373^\circ$
- $\delta = 45.0000^\circ$
- $\varepsilon = 54.3627^\circ$
- $\zeta = 64.1934^\circ$
- $\eta = 75.2686^\circ$

Remplazando los valores de los ángulos en la sección geométrica Sg.

$$Sg = D^2 \cos \alpha \sin \alpha + D^2 \cos \beta \sin \beta - D^2 \cos \beta \sin \alpha + D^2 \cos \gamma \sin \gamma - D^2 \cos \gamma \sin \beta + D^2 \cos \delta \sin \delta - D^2 \cos \delta \sin \gamma + D^2 \cos \varepsilon \sin \varepsilon - D^2 \cos \varepsilon \sin \delta + D^2 \cos \zeta \sin \zeta - D^2 \cos \zeta \sin \varepsilon + D^2 \cos \eta \sin \eta - D^2 \cos \eta \sin \zeta$$

Despejando D^2 :

$$Sg = D^2 (\cos \alpha \sin \alpha + \cos \beta \sin \beta - \cos \beta \sin \alpha + \cos \gamma \sin \gamma - \cos \gamma \sin \beta + \cos \delta \sin \delta - \cos \delta \sin \gamma + \cos \varepsilon \sin \varepsilon - \cos \varepsilon \sin \delta + \cos \zeta \sin \zeta - \cos \zeta \sin \varepsilon + \cos \eta \sin \eta + \cos \eta \sin \zeta)$$

Haremos uso de Matlab para calcular la expresión Sg:

Figura 67

Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de siete escalones

```

9
10 x1= deg2rad(x);% trabajaremos con radianes para poder calcular los valores
11 %Calculamos la seccion geometrica para siete escalones
12 y1=sin(x1);
13 y2=cos(x1);
14 y3=y1.*y2;
15 y4=[x; y1; y2; y3];
16 %Calculamos la seccion geometrica
17 sg=y4(4,1)+y4(4,2)+y4(4,3)+y4(4,4)+y4(4,5)+y4(4,6)+y4(4,7);
18 sg=sg-(y4(2,1)*y4(3,2))-(y4(2,2)*y4(3,3))-(y4(2,3)*y4(3,4))-(y4(2,4)*y4(3,5))-(y4(2,5)*y4(3,6))-(y4(2,6)*y4(3,7));
19 % Mostrar la solucion para siete escalones
20 disp('Resultado: Seno(n):');
21 disp(y1);
22 disp('Resultado: Coseno(n):');
23 disp(y2);
24 disp('Resultado: Seno*Coseno:');
25 disp(y3);
26 disp('Resp:      a      b      c      d      e      f      g');
27 disp(y4);
28 disp('Resultado_sg:');
29 disp(sg);
30

```

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Figura 68

Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de siete escalones

```

Command Window
<Stopping Criteria Details>
La solución en grados es:
    14.7314    25.8066    35.6373    45.0000    54.3627    64.1934    75.2686

Resultado: Seno(n):
    0.2543    0.4353    0.5827    0.7071    0.8127    0.9003    0.9671

Resultado: Coseno(n):
    0.9671    0.9003    0.8127    0.7071    0.5827    0.4353    0.2543

Resultado: Seno*Coseno:
    0.2459    0.3919    0.4735    0.5000    0.4735    0.3919    0.2459

Resp:      a      b      c      d      e      f      g
    14.7314  25.8066  35.6373  45.0000  54.3627  64.1934  75.2686
    0.2543   0.4353   0.5827   0.7071   0.8127   0.9003   0.9671
    0.9671   0.9003   0.8127   0.7071   0.5827   0.4353   0.2543
    0.2459   0.3919   0.4735   0.5000   0.4735   0.3919   0.2459

Resultado_sg:
    0.7333
  
```

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Tabla 23

Ángulos para siete escalones

	α	β	γ	δ	ϵ	ζ	η
Ángulos	14.7314	25.8066	35.6373	45	54.3627	64.1934	75.2686
Sen	0.2543	0.4353	0.5827	0.7071	0.8127	0.9003	0.9671
Cos	0.9671	0.9003	0.8127	0.7071	0.5827	0.4353	0.2543
Cos*Sen	0.2459	0.3919	0.4735	0.5000	0.4735	0.3919	0.2459
Sg	$0.7333 \cdot D^2$						

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Con los datos obtenidos mediante el Excel Reemplazamos en la Ecuación 40

$$S_g = 0.7333D^2$$

Hacemos uso de Excel y las Ecuaciones (6, 7 y 8) para calcular las expresiones de la sección neta, el factor de utilización y el factor de hierro del núcleo para 7 escalones.

Figura 69

Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de siete escalones para materiales de grano orientado mejorados

```

Editor - D:\TESIS\JEAN CANSAYA_LEONEL ALVAREZ\Escalon7.m
+8 Escalon2.m Escalon3.m Escalon4.m Escalon5.m Escalon6.m Escalon7.m Escalon8.m Escalon9.m
31
32 % calculamos la la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro
33 % del núcleo del transformador de SIETE ESCALONES
34 %Utilizamos el factor de apilamiento para materiales de grano orientado convencionales mejorados(CGO)
35 % M 105-23 S AM FCE_M 114-27 S AM FCE_M 117-30 S AM FCE_M 125-35 S AMFCE
36 fa=[0.945; 0.950; 0.955; 0.960];
37 %Calculamos la seccion neta del nucleo del transformador para siete escalones
38 Sn1=fa(1,1)*sg; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
39 Sn2=fa(2,1)*sg; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
40 Sn3=fa(3,1)*sg; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
41 Sn4=fa(4,1)*sg; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
42 %Calculamos el factor de utilizacion del nucleo del transformador para siete escalones
43 fu1=4*Sn1/pi; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
44 fu2=4*Sn2/pi; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
45 fu3=4*Sn3/pi; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
46 fu4=4*Sn4/pi; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
47 %Calculamos el factor de hierro del nucleo del transformador para siete escalones
48 ffe1=Sn1; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
49 ffe2=Sn2; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
50 ffe3=Sn3; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
51 ffe4=Sn4; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
52 %Ordenamos los datos calculados
53 Datos=[0.945 Sn1 fu1 ffe1; 0.950 Sn2 fu2 ffe2; 0.955 Sn3 fu3 ffe3; 0.960 Sn4 fu4 ffe4];
54 disp('Datos(7): fa sn fu ffe');
55 disp(Datos);
  
```

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Figura 70

Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de siete escalones

Command Window			
Datos (7) : fa sn fu ffe			
0.9450	0.6930	0.8823	0.6930
0.9500	0.6966	0.8870	0.6966
0.9550	0.7003	0.8917	0.7003
0.9600	0.7040	0.8963	0.7040

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Tabla 24

Cálculo de los parámetros de las chapas magnéticas según el tipo de aislamiento para siete escalones

Tipo de Aislamiento	f_a	S_n	f_u	f_{FE}
M105-23 S AM FCE	0.945	$0.692970 \cdot D^2$	0.882316	0.692970
M114-27 S AM FCE	0.950	$0.696636 \cdot D^2$	0.886985	0.696636
M117-30 S AM FCE	0.955	$0.700303 \cdot D^2$	0.891653	0.700303
M125-35 S AM FCE	0.960	$0.703969 \cdot D^2$	0.896321	0.703969

Nota. Elaboración propia y captura de gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Reemplazando los valores de los ángulos en las dimensiones de los siete escalones en las relaciones siguiente tenemos:

1 escalón:

- $b_1 = D \cos \alpha = D \cos(25.8066) = 0.9003D$
- $c_1 = D \sin \alpha = D \sin(25.8066) = 0.4353D$

2 escalón:

- $b_2 = D \cos \beta = D \cos(35.6373) = 0.8127 D$
- $c_2 = D \sin \beta = D \sin(35.6373) = 0.5827D$

3 escalón:

- $b_3 = D \cos \gamma = D \cos(35.6373) = 0.8127D$
- $c_3 = D \sin \gamma = D \sin(35.6373) = 0.5827D$

4 escalón:

- $b_4 = D \cos \delta = D \cos(45) = 0.7071D$
- $c_4 = D \sin \delta = D \sin(45) = 0.7071D$

5 escalón:

- $b_5 = D \cos \varepsilon = D \cos(54.3627) = 0.5827D$
- $c_5 = D \sin \varepsilon = D \sin(54.3627) = 0.8127D$

6 escalón:

- $b_6 = D \cos \zeta = D \cos(64.1934) = 0.4353D$
- $c_6 = D \sin \zeta = D \sin(64.1934) = 0.9003D$

7 escalón:

- $b_7 = D \cos \eta = D \cos(75.2686) = 0.2543D$
- $c_7 = D \sin \eta = D \sin(75.2686) = 0.9671D$

Figura 71

Solución Código en Matlab para calcular los valores de los ángulos óptimos de los escalones del núcleo del transformador de siete escalones

```

Editor - D:\TESIS\JEAN CANSAYA_LEONEL ALVAREZ\Escalon7.m
+8 Escalon1.m Escalon2.m Escalon3.m Escalon4.m Escalon5.m Escalon6.m Escalon7.m
55 |
56 %tabla de los escalones
57 y5=[y1;y2];
58 N_Escalones_base=diag(y5(2,:));
59 N_Escalones_altura=diag(y5(1,:));
60 % Mostrar la solución para siete escalones para la base y altura
61 disp('N_escalones base (b7):');
62 disp(N_Escalones_base);
63 disp('N_escalones altura (c7):');
64 disp(N_Escalones_altura);
65

```

Nota. Elaboración propia y captura de gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Figura 72

Respuestas en Matlab del cálculo de la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de siete escalones

```

Command Window
N_escalones base (b7):
    0.9671         0         0         0         0         0         0
         0    0.9003         0         0         0         0         0
         0         0    0.8127         0         0         0         0
         0         0         0    0.7071         0         0         0
         0         0         0         0    0.5827         0         0
         0         0         0         0         0    0.4353         0
         0         0         0         0         0         0    0.2543

N_escalones altura (c7):
    0.2543         0         0         0         0         0         0
         0    0.4353         0         0         0         0         0
         0         0    0.5827         0         0         0         0
         0         0         0    0.7071         0         0         0
         0         0         0         0    0.8127         0         0
         0         0         0         0         0    0.9003         0
         0         0         0         0         0         0    0.9671

```

Nota. Elaboración propia y captura de gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

En la siguiente tabla se muestra la altura (c) y el ancho (b) de las chapas magnéticas en relación con el diámetro de la circunferencia circunscrita (D).

Tabla 25

Resultados de base y altura de las láminas magnéticas de hierro de granos orientados convencionales mejorados para siete escalones.

Numero escalones	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7
1	0.9671D						
2		0.9003D					
3			0.8127D				
4				0.7071D			
5					0.5827D		
6						0.4353D	
7							0.2543D

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Tabla 26

Resultados de base y altura de las láminas magnéticas para siete escalones.

Numero escalones	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7
1	0.2543D						
2		0.4353D					
3			0.5827D				
4				0.7071D			
5					0.8127D		
6						0.9003D	
7							0.9671D

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

3.8 Dimensionamiento angular para ocho escalones

Se grafica el área transversal y la configuración del núcleo del transformador para el caso de 8 escalones, el mismo que está inscrito dentro del círculo y se definen sus dimensiones (b1, b2, b3, b4, b5, b6, b7, b8...c1, c2, c3, c4, c5, c6, c7, c8) en función del diámetro D y el ángulo correspondiente $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta, \eta$ y θ .

Donde:

$b1, b2, b3, b4, b5, b6, b7, b8$: Ancho de la lámina magnética

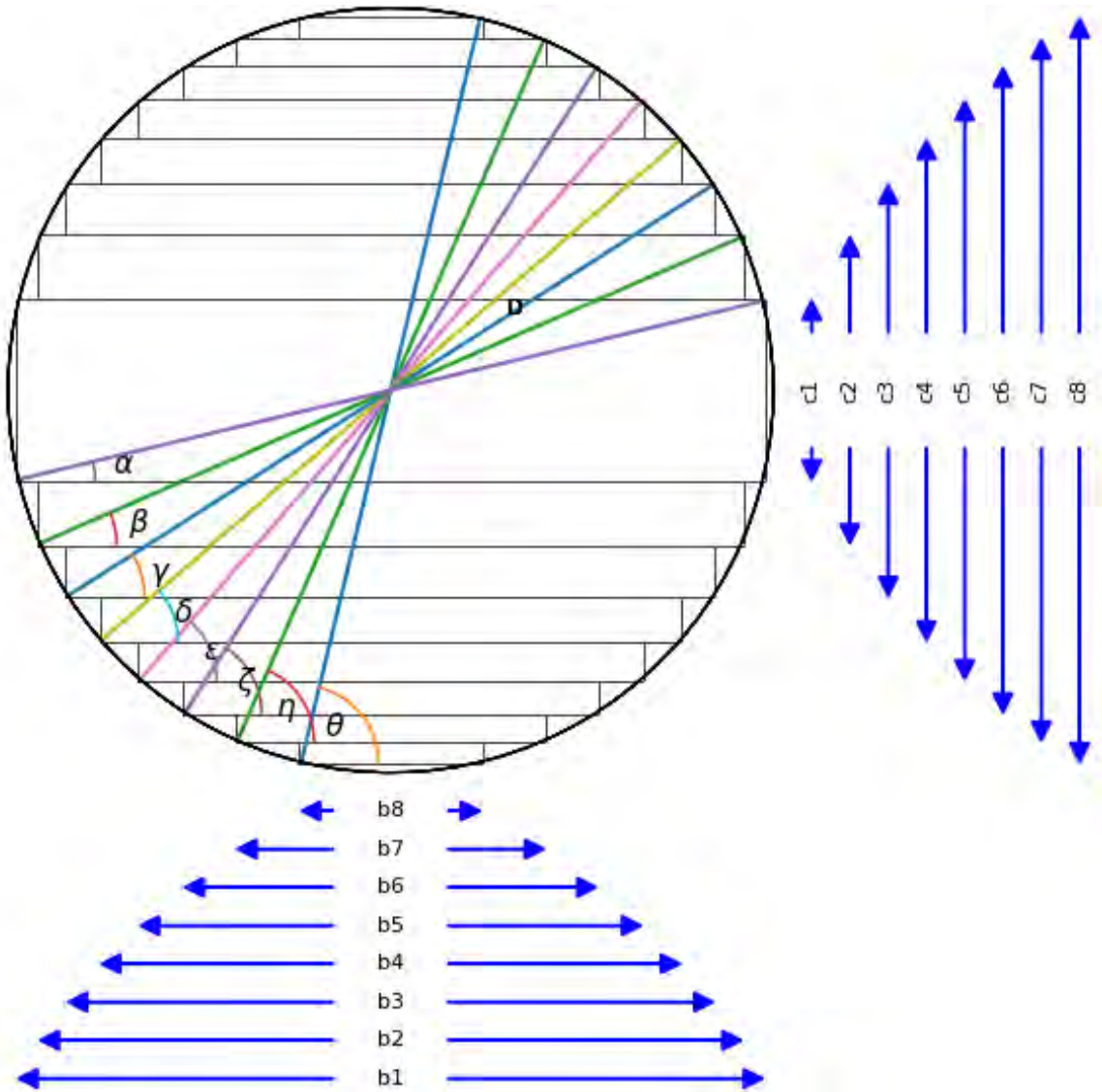
$c1, c2, c3, c4, c5, c6, c7, c8$: Altura del acoplamiento de las láminas magnéticas

D : Diámetro de la circunferencia circunscrita

La gráfica del núcleo de ocho escalones se muestra en la figura 73.

Figura 73

Área transversal del núcleo para ocho escalones inscrito dentro del círculo



Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Sección geométrica (S_g)

$$S_g = b_1 c_1 + b_2(c_2 - c_1) + b_3(c_3 - c_2) + b_4(c_4 - c_3) + b_5(c_5 - c_4) + b_6(c_6 - c_5) + b_7(c_7 - c_6) + b_8(c_8 - c_7) \quad \text{Ec. 43}$$

- $b_1 = D \cos \alpha$; $b_2 = D \cos \beta$; $b_3 = D \cos \gamma$; $b_4 = D \cos \delta$; $b_5 = D \cos \varepsilon$; $b_6 = D \cos \zeta$; $b_7 = D \cos \eta$; $b_8 = D \cos \theta$
- $c_1 = D \sin \alpha$; $c_2 = D \sin \beta$; $c_3 = D \sin \gamma$; $c_4 = D \sin \delta$; $c_5 = D \sin \varepsilon$; $c_6 = D \sin \zeta$; $c_7 = D \sin \eta$; $c_8 = D \sin \theta$

Reemplazando los valores

$$S_g = D^2 \cos \alpha \sin \alpha + D^2 \cos \beta \sin \beta - D^2 \cos \beta \sin \alpha + D^2 \cos \gamma \sin \gamma - D^2 \cos \gamma \sin \beta + \\ D^2 \cos \delta \sin \delta - D^2 \cos \delta \sin \gamma + D^2 \cos \varepsilon \sin \varepsilon - D^2 \cos \varepsilon \sin \delta + D^2 \cos \zeta \sin \zeta - \\ D^2 \cos \zeta \sin \varepsilon + D^2 \cos \eta \sin \eta - D^2 \cos \eta \sin \zeta + D^2 \cos \theta \sin \theta - D^2 \cos \theta \sin \eta)$$

Derivando la sección geométrica en función de cada ángulo e igualando a cero para lograr el ángulo óptimo se tiene:

$$\left(\frac{dS_g}{d\alpha} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\gamma} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\delta} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\varepsilon} = 0 \right. \\ \left. \frac{dS_g}{d\zeta} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\eta} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\theta} = 0 \right) \quad \text{Ec. 44}$$

Desarrollando para cada uno de los ángulos indicados:

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\alpha} = 0$$

$$\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha - \cos \beta \cos \alpha = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\beta} = 0$$

$$\cos^2 \beta - \sin^2 \beta + \sin \beta \sin \alpha - \cos \beta \cos \gamma = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\gamma} = 0$$

$$\cos^2 \gamma - \sin^2 \gamma + \sin \beta \sin \gamma - \cos \gamma \cos \delta = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\delta} = 0$$

$$\cos^2 \delta - \sin^2 \delta + \sin \gamma \sin \delta - \cos \delta \cos \varepsilon = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\varepsilon} = 0$$

$$\cos^2 \varepsilon - \sin^2 \varepsilon + \sin \delta \sin \varepsilon - \cos \varepsilon \cos \zeta = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\zeta} = 0$$

$$\cos^2 \zeta - \sin^2 \zeta + \sin \varepsilon \sin \zeta - \cos \zeta \cos \eta = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\eta} = 0$$

$$\cos^2 \eta - \sin^2 \eta + \sin \zeta \sin \eta - \cos \eta \cos \theta = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\theta} = 0$$

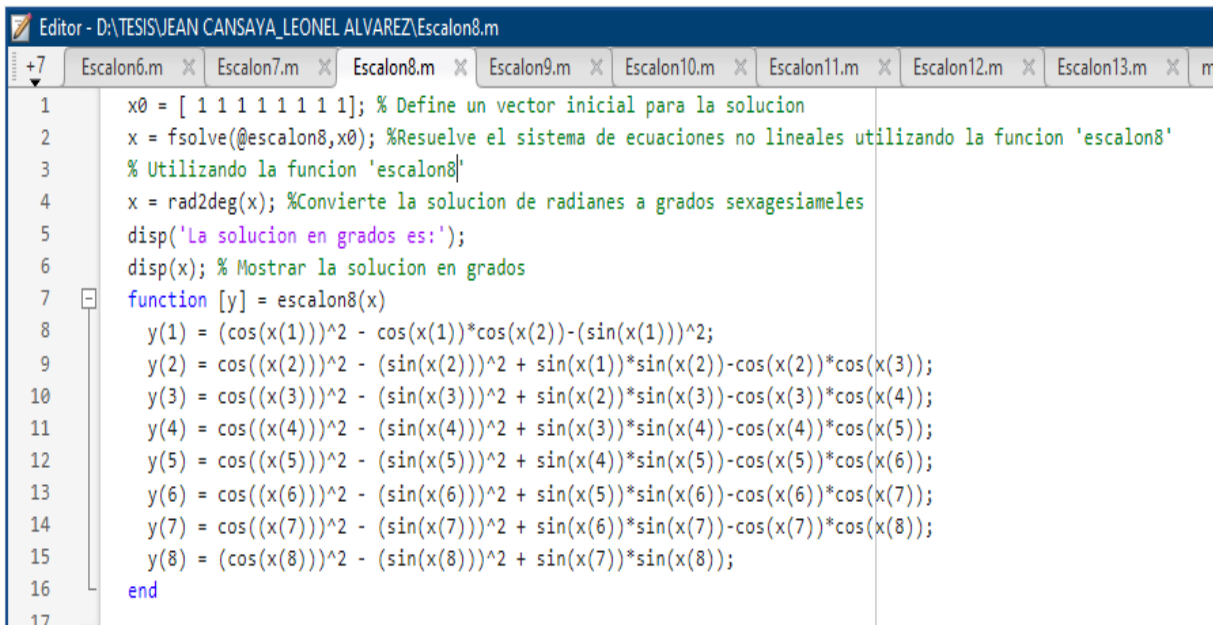
$$\cos^2 \theta - \sin^2 \theta + \sin \eta \sin \theta = 0$$

Con el objetivo de determinar los ángulos óptimos correspondientes a un núcleo escalonado de siete niveles, se desarrollaron las instrucciones respectivas en el entorno de programación MATLAB.

A continuación, se procede a aplicar las ecuaciones, las cuales mantienen una estructura análoga a los casos analizados previamente. De esta manera, se calculan los ángulos óptimos para cada uno de los escalones del núcleo, identificados como: α , β , γ , δ , ε , ζ , η y Θ

Figura 74

Instrucciones en Matlab para calcular el ángulo óptimo para ocho escalones



```

Editor - D:\TESIS\JEAN CANSAYA_LEONEL ALVAREZ\Escalon8.m
Escalon6.m Escalon7.m Escalon8.m Escalon9.m Escalon10.m Escalon11.m Escalon12.m Escalon13.m m
1 x0 = [ 1 1 1 1 1 1 1 1]; % Define un vector inicial para la solucion
2 x = fsolve(@escalon8,x0); %Resuelve el sistema de ecuaciones no lineales utilizando la funcion 'escalon8'
3 % Utilizando la funcion 'escalon8'
4 x = rad2deg(x); %Convierte la solucion de radianes a grados sexagesimales
5 disp('La solucion en grados es:');
6 disp(x); % Mostrar la solucion en grados
7 function [y] = escalon8(x)
8     y(1) = (cos(x(1)))^2 - cos(x(1))*cos(x(2))-(sin(x(1)))^2;
9     y(2) = cos((x(2)))^2 - (sin(x(2)))^2 + sin(x(1))*sin(x(2))-cos(x(2))*cos(x(3));
10    y(3) = cos((x(3)))^2 - (sin(x(3)))^2 + sin(x(2))*sin(x(3))-cos(x(3))*cos(x(4));
11    y(4) = cos((x(4)))^2 - (sin(x(4)))^2 + sin(x(3))*sin(x(4))-cos(x(4))*cos(x(5));
12    y(5) = cos((x(5)))^2 - (sin(x(5)))^2 + sin(x(4))*sin(x(5))-cos(x(5))*cos(x(6));
13    y(6) = cos((x(6)))^2 - (sin(x(6)))^2 + sin(x(5))*sin(x(6))-cos(x(6))*cos(x(7));
14    y(7) = cos((x(7)))^2 - (sin(x(7)))^2 + sin(x(6))*sin(x(7))-cos(x(7))*cos(x(8));
15    y(8) = (cos(x(8)))^2 - (sin(x(8)))^2 + sin(x(7))*sin(x(8));
16 end
17

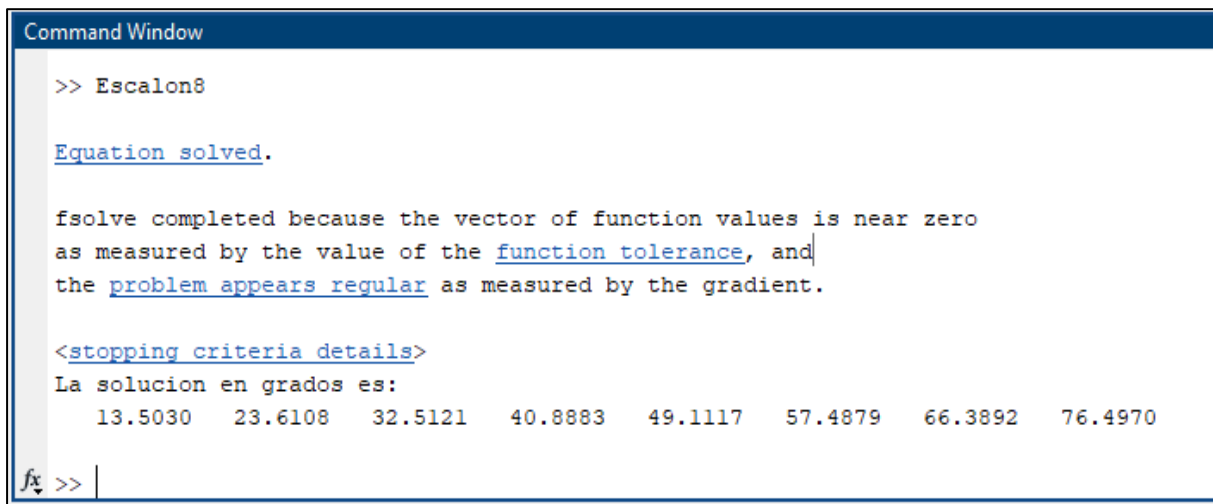
```

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Donde los ángulos α , β , γ , δ , ε , ζ , η y θ son $x(1)$, $x(2)$, $x(3)$, $x(4)$, $x(5)$, $x(6)$, $x(7)$ y $x(8)$ respectivamente. Luego ejecutamos el programa donde los ángulos son convertidos de radianes a grados sexagesimales.

Figura 75

Solución en Matlab para calcular el ángulo óptimo de ocho escalones



```

Command Window
>> Escalon8

Equation solved.

fsolve completed because the vector of function values is near zero
as measured by the value of the function tolerance, and
the problem appears regular as measured by the gradient.

<stopping criteria details>
La solucion en grados es:
    13.5030    23.6108    32.5121    40.8883    49.1117    57.4879    66.3892    76.4970
fx >>

```

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Entonces los ángulos obtenidos por el MATLAB serán:

- $\alpha = 13.5030^\circ$
- $\beta = 23.6108^\circ$
- $\gamma = 32.5121^\circ$
- $\delta = 40.8883^\circ$
- $\varepsilon = 49.1117^\circ$
- $\zeta = 57.4079^\circ$
- $\eta = 66.3892^\circ$
- $\theta = 76.4970^\circ$

Remplazando los valores de los ángulos en la sección geométrica

$$Sg = D^2 \cos \alpha \sin \alpha + D^2 \cos \beta \sin \beta - D^2 \cos \beta \sin \alpha + D^2 \cos \gamma \sin \gamma - D^2 \cos \gamma \sin \beta + D^2 \cos \delta \sin \delta - D^2 \cos \delta \sin \gamma + D^2 \cos \varepsilon \sin \varepsilon - D^2 \cos \varepsilon \sin \delta + D^2 \cos \zeta \sin \zeta - D^2 \cos \zeta \sin \varepsilon + D^2 \cos \eta \sin \eta - D^2 \cos \eta \sin \zeta + D^2 \cos \theta \sin \theta - D^2 \cos \theta \sin \eta$$

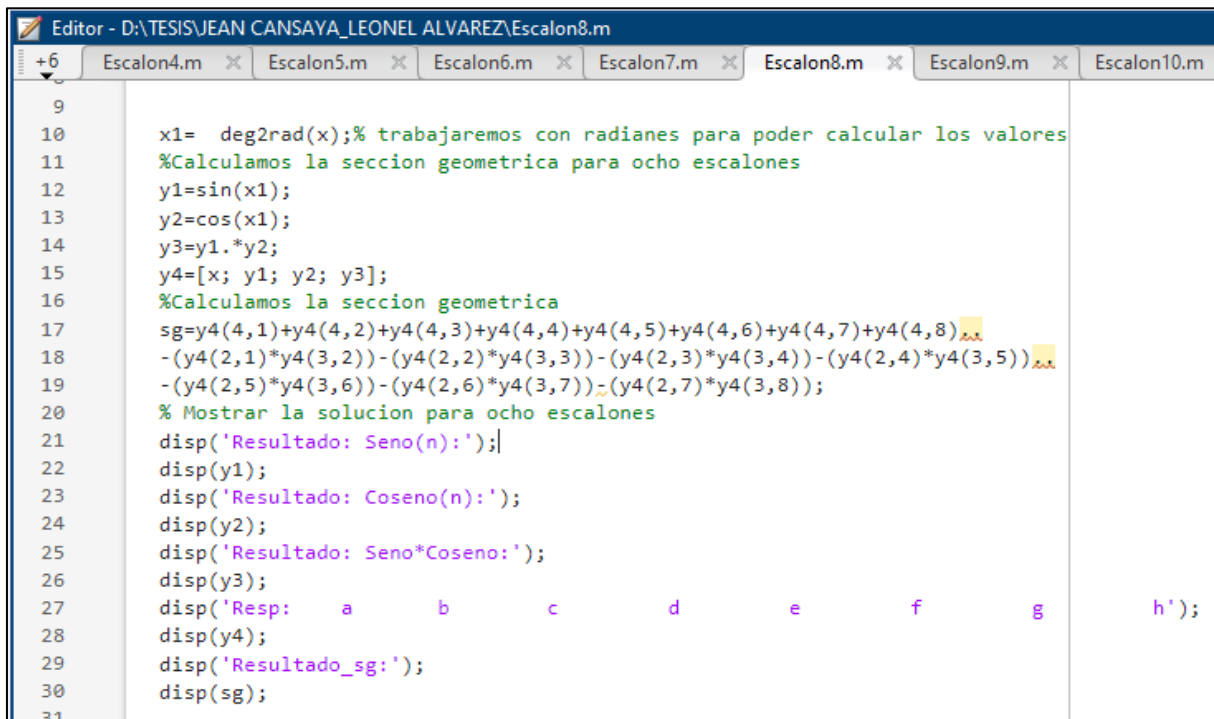
Despejando D^2

$$Sg = D^2 (\cos \alpha \sin \alpha + \cos \beta \sin \beta - \cos \beta \sin \alpha + \cos \gamma \sin \gamma - \cos \gamma \sin \beta + \cos \delta \sin \delta - \cos \delta \sin \gamma + \cos \varepsilon \sin \varepsilon - \cos \varepsilon \sin \delta + \cos \zeta \sin \zeta - \cos \zeta \sin \varepsilon + \cos \eta \sin \eta + \cos \eta \sin \zeta + \cos \theta \sin \theta - \cos \theta \sin \eta)$$

Haremos uso de Matlab para calcular la expresión Sg

Figura 76

Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de ocho escalones



```

9
10     x1= deg2rad(x);% trabajaremos con radianes para poder calcular los valores
11     %Calculamos la seccion geometrica para ocho escalones
12     y1=sin(x1);
13     y2=cos(x1);
14     y3=y1.*y2;
15     y4=[x; y1; y2; y3];
16     %Calculamos la seccion geometrica
17     sg=y4(4,1)+y4(4,2)+y4(4,3)+y4(4,4)+y4(4,5)+y4(4,6)+y4(4,7)+y4(4,8)+
18     -(y4(2,1)*y4(3,2))-(y4(2,2)*y4(3,3))-(y4(2,3)*y4(3,4))-(y4(2,4)*y4(3,5))+
19     -(y4(2,5)*y4(3,6))-(y4(2,6)*y4(3,7))-(y4(2,7)*y4(3,8));
20     % Mostrar la solucion para ocho escalones
21     disp('Resultado: Seno(n):');|
22     disp(y1);
23     disp('Resultado: Coseno(n):');
24     disp(y2);
25     disp('Resultado: Seno*Coseno:');
26     disp(y3);
27     disp('Resp:      a      b      c      d      e      f      g      h');
28     disp(y4);
29     disp('Resultado_sg:');
30     disp(sg);
31

```

Nota. Elaboración propia y captura de gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Figura 77

Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de ocho escalones.

```

Command Window
La solución en grados es:
    13.5030    23.6108    32.5121    40.8883    49.1117    57.4879    66.3892    76.4970

Resultado: Seno(n) :
    0.2335    0.4005    0.5375    0.6546    0.7560    0.8433    0.9163    0.9724

Resultado: Coseno(n) :
    0.9724    0.9163    0.8433    0.7560    0.6546    0.5375    0.4005    0.2335

Resultado: Seno*Coseno:
    0.2270    0.3670    0.4532    0.4949    0.4949    0.4532    0.3670    0.2270

Resp:      a      b      c      d      e      f      g      h
    13.5030    23.6108    32.5121    40.8883    49.1117    57.4879    66.3892    76.4970
    0.2335    0.4005    0.5375    0.6546    0.7560    0.8433    0.9163    0.9724
    0.9724    0.9163    0.8433    0.7560    0.6546    0.5375    0.4005    0.2335
    0.2270    0.3670    0.4532    0.4949    0.4949    0.4532    0.3670    0.2270

Resultado_sg:
    0.7397
  
```

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Tabla 27

Ángulos para seis escalones

	α	β	γ	δ	ϵ	ζ
Ángulos	13.503	23.6108	32.5121	40.8883	49.1117	76.497
Sen	0.233496277	0.40052176	0.53747771	0.65458645	0.75598715	0.9723577
Cos	0.972357696	0.91628725	0.84327796	0.75598715	0.65458645	0.23349628
Cos*Sen	0.227041902	0.36699298	0.4532431	0.49485895	0.49485895	0.2270419
Sg	$0.739736297 \cdot D^2$					

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Tabla 28

Ángulos para dos escalones

	η	θ
Ángulos	66.3892	76.497
Sen	0.91628725	0.9723577
Cos	0.40052176	0.23349628
Cos*Sen	0.36699298	0.2270419
Sg	$0.739736297 \cdot D^2$	

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

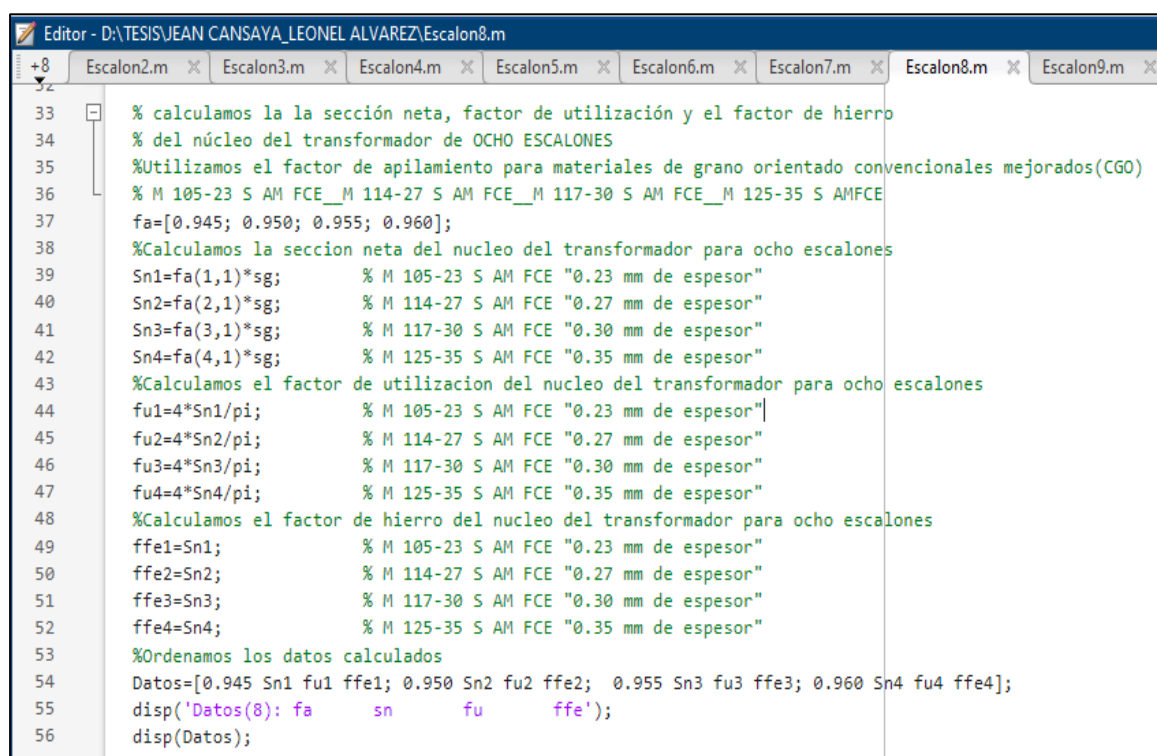
Con los datos obtenidos el Matlab nos determina el área geométrica la misma que es reemplazada en la Ecuación 43

$$S_g = 0.7397D^2$$

Utilizando el entorno de programación MATLAB, junto con las ecuaciones (6), (7) y (8), se procedió al cálculo de las expresiones correspondientes a la sección neta del núcleo, el factor de utilización y el factor de hierro para un diseño de núcleo con ocho escalones. Para ello, se elaboró un programa computacional cuya estructura y lógica de desarrollo se presenta en la figura 78.

Figura 78

Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de ocho escalones para materiales de grano orientado convencionales mejorados



```

Editor - D:\TESIS\JEAN CANSAYA_LEONEL ALVAREZ\Escalon8.m
+8 Escalon2.m Escalon3.m Escalon4.m Escalon5.m Escalon6.m Escalon7.m Escalon8.m Escalon9.m
33 % calculamos la la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro
34 % del núcleo del transformador de OCHO ESCALONES
35 %Utilizamos el factor de apilamiento para materiales de grano orientado convencionales mejorados(CG0)
36 % M 105-23 S AM FCE __M 114-27 S AM FCE __M 117-30 S AM FCE __M 125-35 S AMFCE
37 fa=[0.945; 0.950; 0.955; 0.960];
38 %Calculamos la seccion neta del nucleo del transformador para ocho escalones
39 Sn1=fa(1,1)*sg; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
40 Sn2=fa(2,1)*sg; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
41 Sn3=fa(3,1)*sg; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
42 Sn4=fa(4,1)*sg; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
43 %Calculamos el factor de utilizacion del nucleo del transformador para ocho escalones
44 fu1=4*Sn1/pi; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
45 fu2=4*Sn2/pi; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
46 fu3=4*Sn3/pi; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
47 fu4=4*Sn4/pi; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
48 %Calculamos el factor de hierro del nucleo del transformador para ocho escalones
49 ffe1=Sn1; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
50 ffe2=Sn2; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
51 ffe3=Sn3; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
52 ffe4=Sn4; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
53 %Ordenamos los datos calculados
54 Datos=[0.945 Sn1 fu1 ffe1; 0.950 Sn2 fu2 ffe2; 0.955 Sn3 fu3 ffe3; 0.960 Sn4 fu4 ffe4];
55 disp('Datos(8): fa sn fu ffe');
56 disp(Datos);

```

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Los resultados obtenidos por el Matlab referidos a la sección neta, el factor de utilización y el factor del hierro para ocho escalones se muestran en la figura 79. Estos valores permiten analizar el comportamiento geométrico y magnético del núcleo a medida que aumenta el número de escalones, mejorando la aproximación a la sección circular ideal. Además, facilitan la comparación del rendimiento del material magnético y la eficiencia estructural del diseño frente a otras configuraciones evaluadas.

Figura 79

Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de ocho escalones.

Command Window				
Datos(8):	fa	sn	fu	ffe
	0.9450	0.6991	0.8901	0.6991
	0.9500	0.7027	0.8948	0.7027
	0.9550	0.7064	0.8995	0.7064
	0.9600	0.7101	0.9042	0.7101

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Tabla 29

Cálculo de los parámetros de las láminas magnéticas de acero de grano orientado convencional mejorado para ocho escalones

Tipo de lámina magnético	fa	Sn	fu	f_{FE}
M105-23 S AM FCE	0.945	$0.699050 \cdot D^2$	0.890058	0.699050
M114-27 S AM FCE	0.950	$0.702748 \cdot D^2$	0.894767	0.702748
M117-30 S AM FCE	0.955	$0.706447 \cdot D^2$	0.899476	0.706447
M125-35 S AM FCE	0.960	$0.710146 \cdot D^2$	0.904186	0.710146

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Reemplazando los valores de los ángulos en las medidas de nuestros escalones en las relaciones siguientes.

1 escalón:

- $b_1 = D \cos \alpha = D \cos(13.503) = 0.9724D$
- $c_1 = D \sin \alpha = D \sin(13.5030) = 0.2335D$

2 escalón:

- $b_2 = D \cos \beta = D \cos(23.6108) = 0.9163D$
- $c_2 = D \sin \beta = D \sin(23.6108) = 0.4005D$

3 escalón:

- $b_3 = D \cos \gamma = D \cos(32.5121) = 0.8433D$
- $c_3 = D \sin \gamma = D \sin(32.5121) = 0.5375D$

4 escalón:

- $b_4 = D \cos \delta = D \cos(40.8883) = 0.756D$

- $c_4 = Dsen\delta = Dsen(40.8883) = 0.6546D$

5 escalón:

- $b_5 = Dcos\varepsilon = Dcos(49.1117) = 0.06546D$
- $c_5 = Dsen\varepsilon = Dsen(49.1117) = 0.756D$

6 escalón:

- $b_6 = Dcos\zeta = Dcos(57.4879) = 0.5375D$
- $c_6 = Dsen\zeta = Dsen(57.4879) = 0.8433D$

7 escalón:

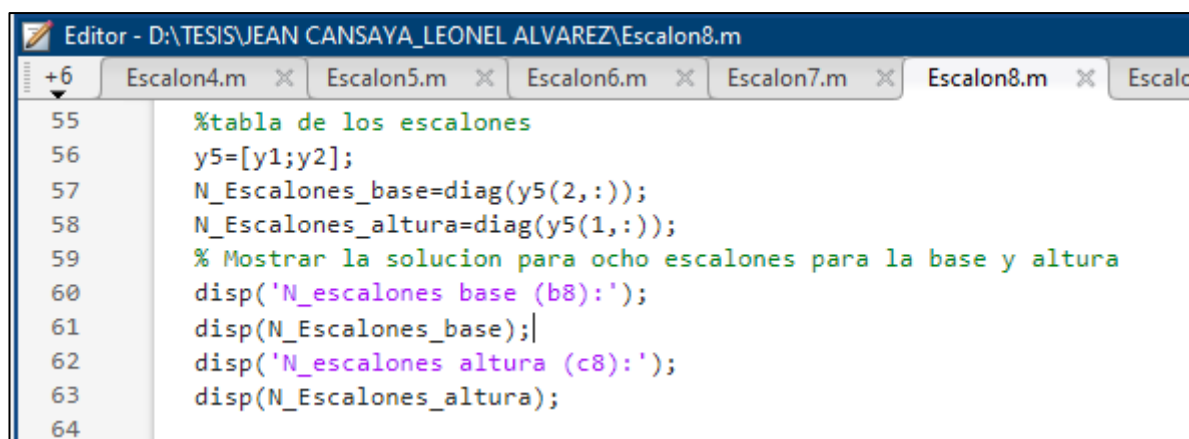
- $b_7 = Dcos\eta = Dcos(66.3892) = 0.4005D$
- $c_7 = Dsen\eta = Dsen(66.3892) = 0.9163D$

8 escalón:

- $b_8 = Dcos\theta = Dcos(76.497) = 0.2335D$
- $c_8 = Dsen\theta = Dsen(76.497) = 0.9724D$

Figura 80

Código en Matlab para calcular los valores de los ángulos de nuestros escalones del núcleo del transformador de ocho escalones



```

55 %tabla de los escalones
56 y5=[y1;y2];
57 N_Escalones_base=diag(y5(2,:));
58 N_Escalones_altura=diag(y5(1,:));
59 % Mostrar la solución para ocho escalones para la base y altura
60 disp('N_escalones base (b8):');
61 disp(N_Escalones_base);
62 disp('N_escalones altura (c8):');
63 disp(N_Escalones_altura);
64

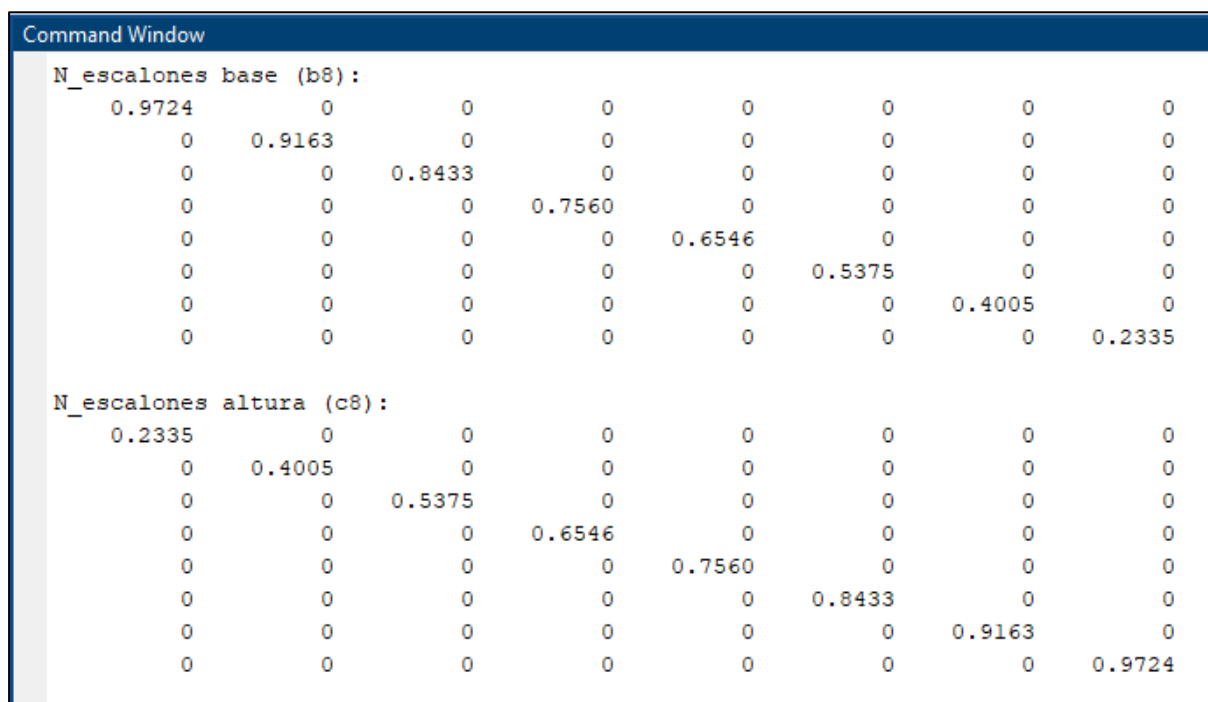
```

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Aplicando el software Matlab para calcular los ángulos de los escalones, se obtienen los resultados mostrados en la Figura 81 para cada uno de los ángulos señalados α , β , γ , δ , ε , ζ , η y Θ

Figura 81

Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de ocho escalones.



Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

En la siguiente tabla se muestra la solución en Matlab de las alturas (c) los anchos (b) de las láminas magnéticas de acero de grano orientado convencional mejorados en relación con el diámetro de la circunferencia circunscrita (D) en un núcleo de ocho escalones

Tabla 30

Resultados de base de las chapas magnéticas para ocho escalones

Numero de escalones	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7	b8
1	0.233D							
2		0.401D						
3			0.537D					
4				0.655D				
5					0.756D			
6						0.843D		
7							0.916D	
8								0.972D

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Tabla 31

Resultados altura de las chapas magnéticas para ocho escalones.

Numero de escalones	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8
1	0.972D							
2		0.916D						
3			0.843D					
4				0.756D				
5					0.655D			
6						0.537D		
7							0.401D	
8								0.233D

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

3.9 Dimensionamiento angular para nueve escalones

Se grafica del área transversal del núcleo del transformador para el caso de 9 escalones, el mismo que está inscrito dentro del círculo y se definen sus dimensiones ($b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_9$) en función del diámetro D y los ángulos correspondientes $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta, \eta, \theta$ y ι .

Donde:

$b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9$: Ancho de la lámina magnética

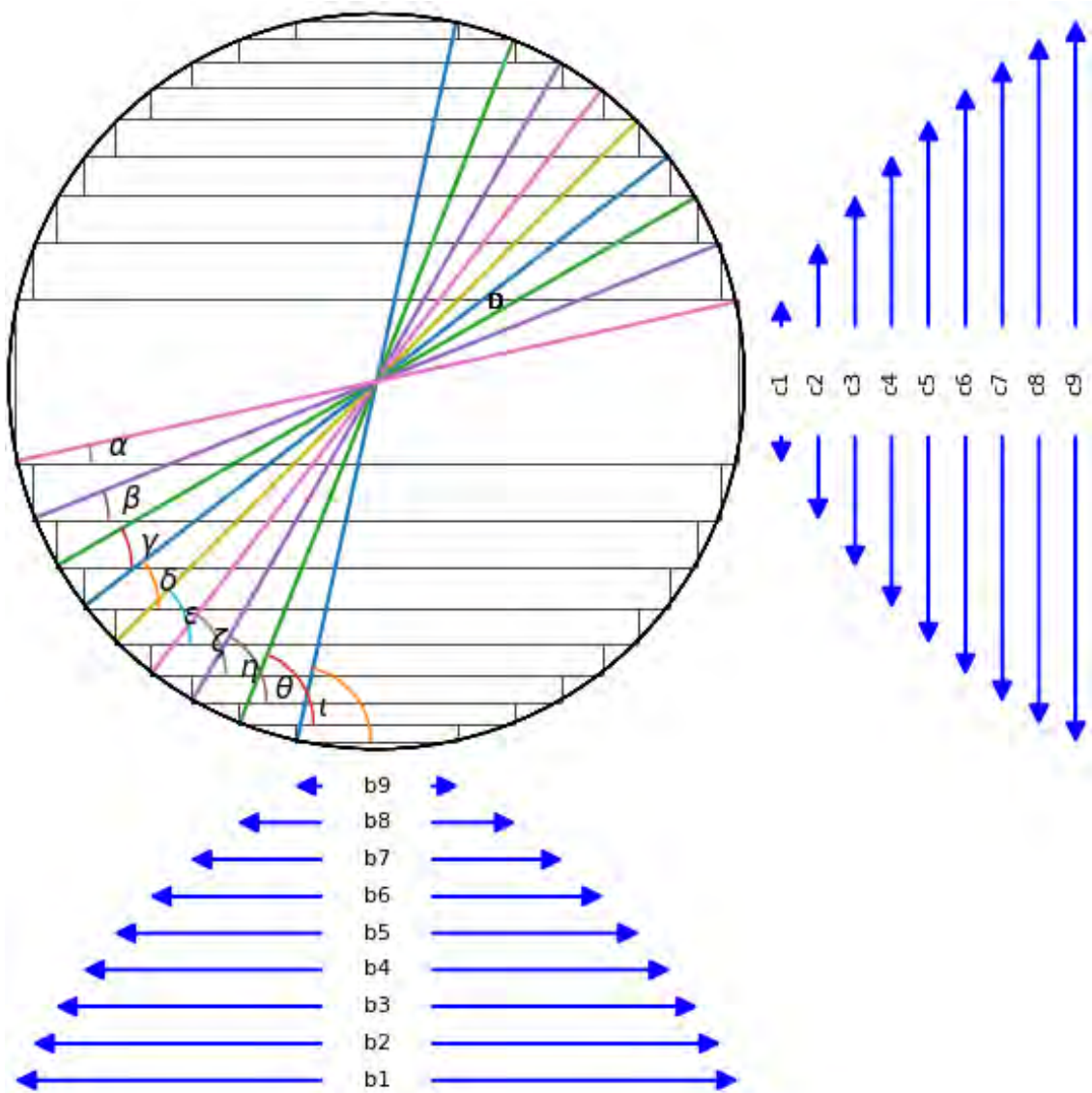
$c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_9$: Altura del acoplamiento de la lámina magnética

D : Diámetro de la circunferencia

El dimensionamiento angular para nueve escalones se muestra en la figura 82, implica representar la sección transversal del núcleo del transformador inscrita dentro de un círculo de diámetro D . En este proceso se determinan las dimensiones b_1 al b_9 y c_1 al c_9 , que corresponden a los lados de cada escalón que aproximan la forma circular. Cada uno de estos segmentos depende directamente de los ángulos $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta, \eta, \theta$ e ι , los cuales definen la geometría angular del núcleo. Este método permite obtener una aproximación más fina a la sección circular ideal, mejorando la distribución del flujo magnético. A medida que aumenta el número de escalones, se incrementa la precisión del diseño y la uniformidad de la densidad de flujo. El análisis geométrico también favorece la estimación de la sección neta efectiva del núcleo. Asimismo, proporciona información clave para calcular el factor de utilización y evaluar el rendimiento del material magnético. En conjunto, este dimensionamiento permite optimizar la eficiencia en la utilización del material magnético.

Figura 82

Área transversal del núcleo para nueve escalones inscrito dentro del círculo



Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Sección Geométrica (S_g)

$$S_g = b_1 c_1 + b_2(c_2 - c_1) + b_3(c_3 - c_2) + b_4(c_4 - c_3) + b_5(c_5 - c_4) + b_6(c_6 - c_5) + b_7(c_7 - c_6) + b_8(c_8 - c_7) + b_9(c_9 - c_8) \quad \text{Ec. 45}$$

- $b_1 = D \cos \alpha$; $b_2 = D \cos \beta$; $b_3 = D \cos \gamma$; $b_4 = D \cos \delta$; $b_5 = D \cos \varepsilon$; $b_6 = D \cos \zeta$; $b_7 = D \cos \eta$; $b_8 = D \cos \theta$; $b_9 = D \cos \iota$
- $c_1 = D \sin \alpha$; $c_2 = D \sin \beta$; $c_3 = D \sin \gamma$; $c_4 = D \sin \delta$; $c_5 = D \sin \varepsilon$; $c_6 = D \sin \zeta$; $c_7 = D \sin \eta$; $c_8 = D \sin \theta$; $c_9 = D \sin \iota$

Reemplazando los valores

$$S_g = D^2 \cos \alpha \sin \alpha + D^2 \cos \beta \sin \beta - D^2 \cos \beta \sin \alpha + D^2 \cos \gamma \sin \gamma - D^2 \cos \gamma \sin \beta + \\ D^2 \cos \delta \sin \delta - D^2 \cos \delta \sin \gamma + D^2 \cos \varepsilon \sin \varepsilon - D^2 \cos \varepsilon \sin \delta + D^2 \cos \zeta \sin \zeta - D^2 \cos \zeta \sin \varepsilon + \\ D^2 \cos \eta \sin \eta - D^2 \cos \eta \sin \zeta + D^2 \cos \theta \sin \theta - D^2 \cos \theta \sin \eta + D^2 \cos \iota \sin \iota - D^2 \cos \iota \sin \theta$$

Aplicando el concepto de optimización máxima de área:

$$\frac{dS_g}{d\alpha} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\beta} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\gamma} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\delta} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\varepsilon} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\zeta} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\eta} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\theta} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\iota} = 0 \quad \text{Ec. 46}$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\alpha} = 0$$

$$\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha - \cos \beta \cos \alpha = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\beta} = 0$$

$$\cos^2 \beta - \sin^2 \beta + \sin \alpha \sin \beta - \cos \beta \cos \gamma = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\gamma} = 0$$

$$\cos^2 \gamma - \sin^2 \gamma + \sin \gamma \sin \beta - \cos \gamma \cos \delta = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\delta} = 0$$

$$\cos^2 \delta - \sin^2 \delta + \sin \delta \sin \gamma - \cos \delta \cos \varepsilon = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\varepsilon} = 0$$

$$\cos^2 \varepsilon - \sin^2 \varepsilon + \sin \delta \sin \varepsilon - \cos \delta \cos \zeta = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\zeta} = 0$$

$$\cos^2 \zeta - \sin^2 \zeta + \sin \zeta \sin \varepsilon - \cos \zeta \cos \eta = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\eta} = 0$$

$$\cos^2 \eta - \sin^2 \eta + \sin \eta \sin \zeta - \cos \eta \cos \theta = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\theta} = 0$$

$$\cos^2 \theta - \sin^2 \theta + \sin \theta \sin \eta - \cos \theta \cos \iota = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\iota} = 0$$

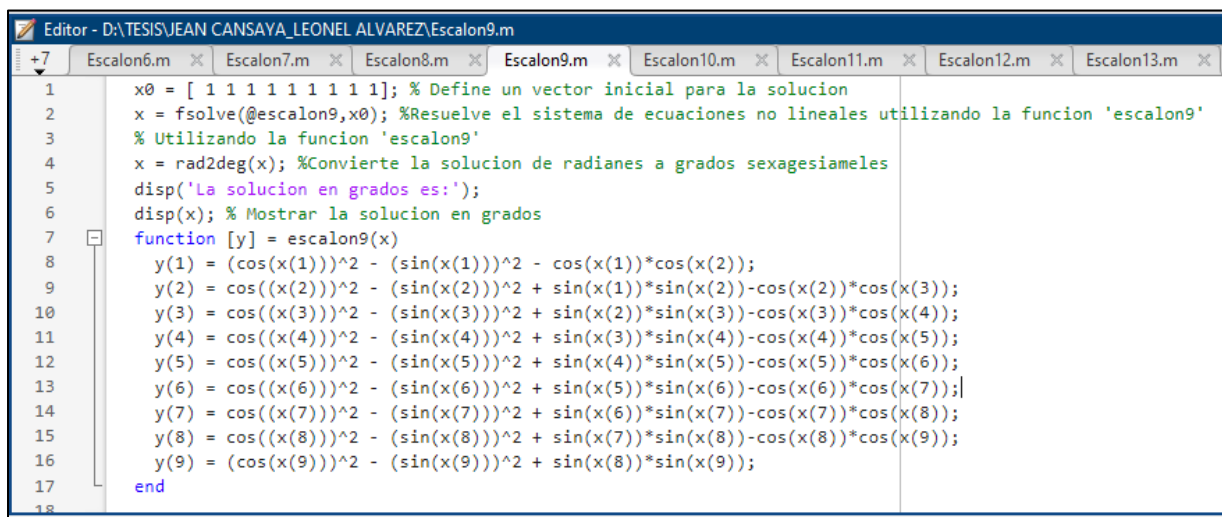
$$\cos^2 \iota - \sin^2 \iota + \sin \theta \sin \iota = 0$$

En este punto del análisis, se cuenta con un sistema de nueve ecuaciones no lineales, cada una formulada en función de uno de los nueve ángulos definidos geoméricamente en el diseño del núcleo escalonado mostradas en la Figura 83. Dichos ángulos constituyen las incógnitas del sistema, ya que su determinación resulta fundamental para optimizar la configuración geométrica del núcleo. Para resolver este sistema complejo, se empleó el entorno de programación MATLAB, en el cual se definieron las instrucciones necesarias y se

implementó el algoritmo correspondiente para el tratamiento numérico de las ecuaciones. A través de este procedimiento computacional, se logró obtener los valores óptimos de los nueve ángulos buscados, que se identifican como: $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta, \eta, \theta$ y ι .

Figura 83

Instrucciones en Matlab para calcular el ángulo óptimo de nueve escalones



```

1  x0 = [ 1 1 1 1 1 1 1 1 1]; % Define un vector inicial para la solucion
2  x = fsolve(@Escalon9,x0); %Resuelve el sistema de ecuaciones no lineales utilizando la funcion 'Escalon9'
3  % Utilizando la funcion 'Escalon9'
4  x = rad2deg(x); %Convierte la solucion de radianes a grados sexagesimales
5  disp('La solucion en grados es:');
6  disp(x); % Mostrar la solucion en grados
7  function [y] = Escalon9(x)
8      y(1) = (cos(x(1)))^2 - (sin(x(1)))^2 - cos(x(1))*cos(x(2));
9      y(2) = cos((x(2)))^2 - (sin(x(2)))^2 + sin(x(1))*sin(x(2))-cos(x(2))*cos(x(3));
10     y(3) = cos((x(3)))^2 - (sin(x(3)))^2 + sin(x(2))*sin(x(3))-cos(x(3))*cos(x(4));
11     y(4) = cos((x(4)))^2 - (sin(x(4)))^2 + sin(x(3))*sin(x(4))-cos(x(4))*cos(x(5));
12     y(5) = cos((x(5)))^2 - (sin(x(5)))^2 + sin(x(4))*sin(x(5))-cos(x(5))*cos(x(6));
13     y(6) = cos((x(6)))^2 - (sin(x(6)))^2 + sin(x(5))*sin(x(6))-cos(x(6))*cos(x(7));
14     y(7) = cos((x(7)))^2 - (sin(x(7)))^2 + sin(x(6))*sin(x(7))-cos(x(7))*cos(x(8));
15     y(8) = cos((x(8)))^2 - (sin(x(8)))^2 + sin(x(7))*sin(x(8))-cos(x(8))*cos(x(9));
16     y(9) = (cos(x(9)))^2 - (sin(x(9)))^2 + sin(x(8))*sin(x(9));
17 end

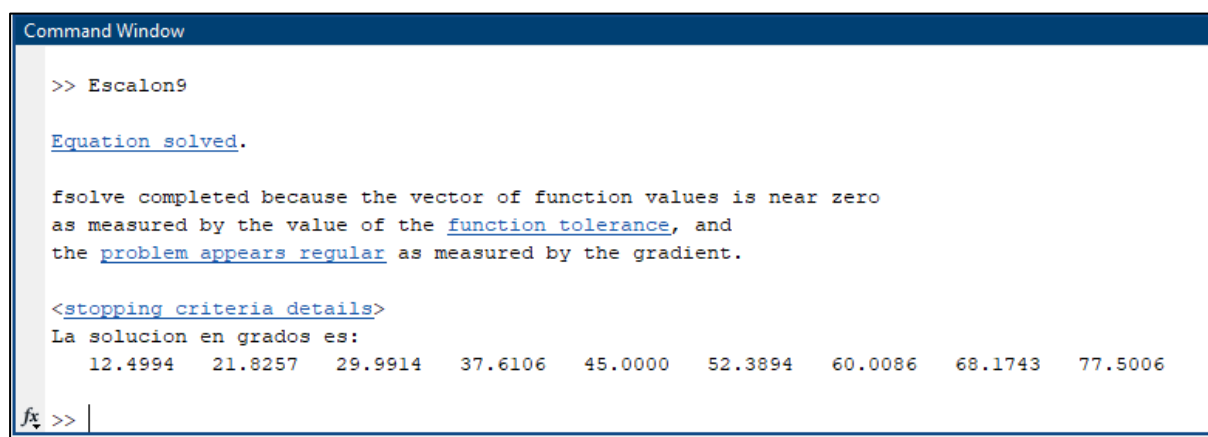
```

Nota. Elaboración propia y captura de gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Donde los ángulos $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta, \eta, \theta$ y ι son $x(1), x(2), x(3), x(4), x(5), x(6), x(7), x(8)$ y $x(9)$, respectivamente. Hacemos correr el programa y convirtiendo estos ángulos que nos arroja el Matlab de radianes a grados sexagesimales.

Figura 84

Solución en Matlab para calcular el ángulo óptimo de nueve escalones



```

>> Escalon9

Equation solved.

fsolve completed because the vector of function values is near zero
as measured by the value of the function tolerance, and
the problem appears regular as measured by the gradient.

<stopping criteria details>
La solucion en grados es:
    12.4994    21.8257    29.9914    37.6106    45.0000    52.3894    60.0086    68.1743    77.5006
fx >>

```

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Entonces los ángulos obtenidos por el MATLAB serán:

- $\alpha = 12.4994^\circ$
- $\beta = 21.8257^\circ$

- $\gamma = 29.9914^\circ$
- $\delta = 37.6106^\circ$
- $\varepsilon = 45^\circ$
- $\zeta = 52.3894^\circ$
- $\eta = 60.0086^\circ$
- $\theta = 68.1743^\circ$
- $\iota = 77.5006^\circ$

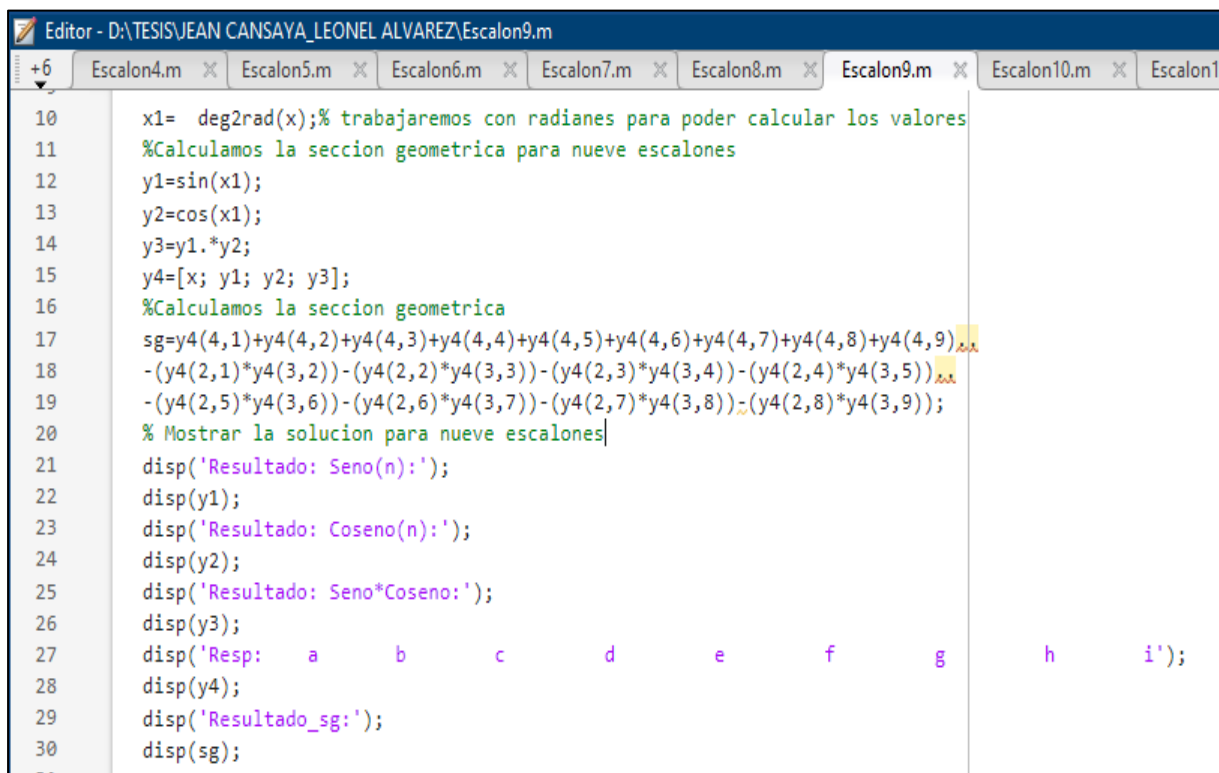
Remplazando los valores de los ángulos en la sección geométrica Sg.

$$S_g = D^2 \cos \alpha \sin \alpha + D^2 \cos \beta \sin \beta - D^2 \cos \beta \sin \alpha + D^2 \cos \tau \sin \tau - D^2 \cos \gamma \sin \beta + D^2 \cos \delta \sin \delta - D^2 \cos \delta \sin \gamma + D^2 \cos \varepsilon \sin \varepsilon - D^2 \cos \varepsilon \sin \delta + D^2 \cos \zeta \sin \zeta - D^2 \cos \zeta \sin \varepsilon + D^2 \cos \eta \sin \eta - D^2 \cos \eta \sin \zeta + D^2 \cos \theta \sin \theta - D^2 \cos \theta \sin \eta + D^2 \cos \iota \sin \iota - D^2 \cos \iota \sin \theta$$

Aplicando el software Matlab para calcular la expresión Sg tenemos la figura 85.

Figura 85

Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de nueve escalones



```

Editor - D:\TESIS\JEAN CANSAYA_LEONEL ALVAREZ\Escalon9.m
+6 Escalon4.m Escalon5.m Escalon6.m Escalon7.m Escalon8.m Escalon9.m Escalon10.m Escalon11.m
10 x1= deg2rad(x);% trabajaremos con radianes para poder calcular los valores
11 %Calculamos la seccion geometrica para nueve escalones
12 y1=sin(x1);
13 y2=cos(x1);
14 y3=y1.*y2;
15 y4=[x; y1; y2; y3];
16 %Calculamos la seccion geometrica
17 sg=y4(4,1)+y4(4,2)+y4(4,3)+y4(4,4)+y4(4,5)+y4(4,6)+y4(4,7)+y4(4,8)+y4(4,9)+
18 -(y4(2,1)*y4(3,2))-(y4(2,2)*y4(3,3))-(y4(2,3)*y4(3,4))-(y4(2,4)*y4(3,5))+
19 -(y4(2,5)*y4(3,6))-(y4(2,6)*y4(3,7))-(y4(2,7)*y4(3,8))-(y4(2,8)*y4(3,9));
20 % Mostrar la solucion para nueve escalones
21 disp('Resultado: Seno(n):');
22 disp(y1);
23 disp('Resultado: Coseno(n):');
24 disp(y2);
25 disp('Resultado: Seno*Coseno:');
26 disp(y3);
27 disp('Resp: a b c d e f g h i');
28 disp(y4);
29 disp('Resultado_sg:');
30 disp(sg);

```

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Figura 86

Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de nueve escalones.

Command Window									
\<stopping Criteria details>									
La solución en grados es:									
	12.4994	21.8257	29.9914	37.6106	45.0000	52.3894	60.0086	68.1743	77.5006
Resultado: Seno(n):									
	0.2164	0.3718	0.4999	0.6103	0.7071	0.7922	0.8661	0.9283	0.9763
Resultado: Coseno(n):									
	0.9763	0.9283	0.8661	0.7922	0.7071	0.6103	0.4999	0.3718	0.2164
Resultado: Seno*Coseno:									
	0.2113	0.3451	0.4329	0.4835	0.5000	0.4835	0.4329	0.3451	0.2113
Resp:	a	b	c	d	e	f	g	h	i
	12.4994	21.8257	29.9914	37.6106	45.0000	52.3894	60.0086	68.1743	77.5006
	0.2164	0.3718	0.4999	0.6103	0.7071	0.7922	0.8661	0.9283	0.9763
	0.9763	0.9283	0.8661	0.7922	0.7071	0.6103	0.4999	0.3718	0.2164
	0.2113	0.3451	0.4329	0.4835	0.5000	0.4835	0.4329	0.3451	0.2113
Resultado_sg:									
	0.7448								

Nota. Elaboración propia y captura de gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Tabla 32

Ángulos para nueve escalones

	α	β	γ	δ	ϵ
Ángulos	12.4994	21.8257	29.9914	37.6106	45
Sen	0.21642939	0.37178427	0.49987001	0.61029173	0.70710678
Cos	0.976298274	0.92831916	0.86610044	0.79217675	0.70710678
Cos*Sen	0.21129964	0.34513446	0.43293763	0.48345892	0.5
Sg	$0.7448 \cdot D^2$				

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Tabla 33

Ángulos para nueve escalones

	ζ	η	θ	ι
Ángulos	52.3894	60.0086	68.1743	77.5006
Sen	0.67416576	0.86610044	0.92831916	0.97629827
Cos	0.73858008	0.49987001	0.37178427	0.21642939
Cos*Sen	0.4979254	0.43293763	0.34513446	0.21129964
Sg	$0.7448 \cdot D^2$			

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Con los datos obtenidos se calcula los valores de la sección geométrica y reemplazando en la Ecuación 45:

$$S_g = 0.7448D^2$$

Luego utilizamos Matlab y las ecuaciones (6, 7 y 8) para calcular las expresiones de Sección neta, el factor de utilización y el factor de hierro del núcleo de 9 escalones. El código se muestra en la Figura siguiente:

Figura 87

Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de nueve escalones para materiales de grano orientado convencionales mejorados

```

Editor - D:\TESIS\JEAN CANSAYA_LEONEL ALVAREZ\Escalon9.m
Escalon2.m Escalon3.m Escalon4.m Escalon5.m Escalon6.m Escalon7.m Escalon8.m Escalon9.m
30
31 % calculamos la la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro
32 % del núcleo del transformador de NUEVE ESCALONES
33 %Utilizamos el factor de apilamiento para materiales de grano orientado convencionales mejorados(CG0)
34 % M 105-23 S AM FCE__M 114-27 S AM FCE__M 117-30 S AM FCE__M 125-35 S AMFCE
35 fa=[0.945; 0.950; 0.955; 0.960];
36 %Calculamos la seccion neta del nucleo del transformador para nueve escalones
37 Sn1=fa(1,1)*sg; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
38 Sn2=fa(2,1)*sg; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
39 Sn3=fa(3,1)*sg; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
40 Sn4=fa(4,1)*sg; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
41 %Calculamos el factor de utilizacion del nucleo del transformador para nueve escalones
42 fu1=4*Sn1/pi; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
43 fu2=4*Sn2/pi; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
44 fu3=4*Sn3/pi; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
45 fu4=4*Sn4/pi; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
46 %Calculamos el factor de hierro del nucleo del transformador para nueve escalones
47 ffe1=Sn1; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
48 ffe2=Sn2; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
49 ffe3=Sn3; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
50 ffe4=Sn4; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
51 %Ordenamos los datos calculados
52 Datos=[0.945 Sn1 fu1 ffe1; 0.950 Sn2 fu2 ffe2; 0.955 Sn3 fu3 ffe3; 0.960 Sn4 fu4 ffe4];
53 disp('Datos(9): fa sn fu ffe');
54 disp(Datos);

```

Nota. Elaboración propia y captura de gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Figura 88

Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de nueve escalones

Command Window				
Datos(9): fa	sn	fu	ffe	
0.9450	0.7038	0.8961	0.7038	
0.9500	0.7075	0.9009	0.7075	
0.9550	0.7113	0.9056	0.7113	
0.9600	0.7150	0.9103	0.7150	

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Tabla 34

Cálculo de los parámetros de las láminas magnéticas de acero de grano orientado convencional mejorado para nueve escalones

Tipo de Aislamiento	f_a	S_n	f_u	f_{FE}
M105-23 S AM FCE	0.945	$0.703848 \cdot D^2$	0.885982	0.695848
M114-27 S AM FCE	0.950	$0.707530 \cdot D^2$	0.890669	0.699530
M117-30 S AM FCE	0.955	$0.711312 \cdot D^2$	0.895357	0.703212
M125-35 S AM FCE	0.960	$0.715000 \cdot D^2$	0.900045	0.706893

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Reemplazando los valores de los ángulos en las medidas de nuestros escalones en las relaciones siguientes.

1 escalón:

$$b_1 = D \cos \alpha = D \cos(12.4994) = 0.976D$$

$$c_1 = D \sin \alpha = D \sin(12.4994) = 0.216D$$

2 escalón:

$$b_2 = D \cos \beta = D \cos(21.8257) = 0.928D$$

$$c_2 = D \sin \beta = D \sin(21.8257) = 0.372 D$$

3 escalón:

$$b_3 = D \cos \gamma = D \cos(29.9914) = 0.866 D$$

$$c_3 = D \sin \gamma = D \sin(29.9914) = 0.499D$$

4 escalón:

$$b_4 = D \cos \delta = D \cos(37.6106) = 0.7922D$$

$$c_4 = D \sin \delta = D \sin(37.6106) = 0.6103D$$

5 escalón:

$$b_5 = D \cos \varepsilon = D \cos(45) = 0.7071D$$

$$c_5 = D \sin \varepsilon = D \sin(45) = 0.7071D$$

6 escalón:

$$b_6 = D \cos \zeta = D \cos(42.3894) = 0.7385D$$

$$c_6 = D \sin \zeta = D \sin(42.3894) = 0.6742D$$

7 escalón:

$$b_7 = D \cos \eta = D \cos(60.0086) = 0.50D$$

$$c_7 = D \sin \eta = D \sin(60.0086) = 0.866D$$

8 escalón:

$$b_8 = D \cos \theta = D \cos(68.1743) = 0.372D$$

$$c_8 = D \sin \theta = D \sin(68.1743) = 0.928D$$

9 escalón:

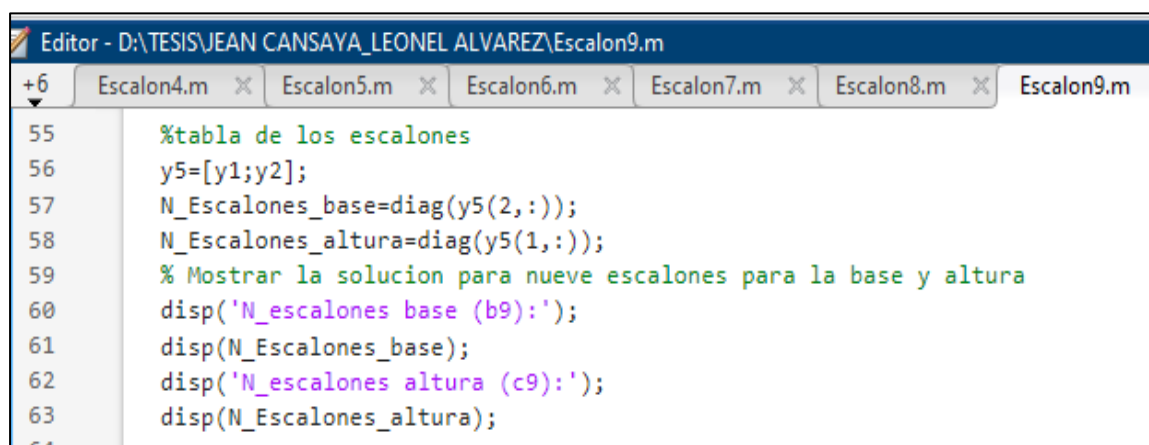
$$b_8 = D \cos i = D \cos(77.5006) = 0.216D$$

$$c_8 = D \sin i = D \sin(77.5006) = 0.976D$$

En la siguiente tabla se muestra las alturas (c) y los anchos (b) de las chapas magnéticas en relación con el diámetro de la circunferencia (D). Se muestra en la figura 89.

Figura 89

Código en Matlab para calcular los valores de los ángulos de nuestros escalones del núcleo del transformador de nueve escalones



```

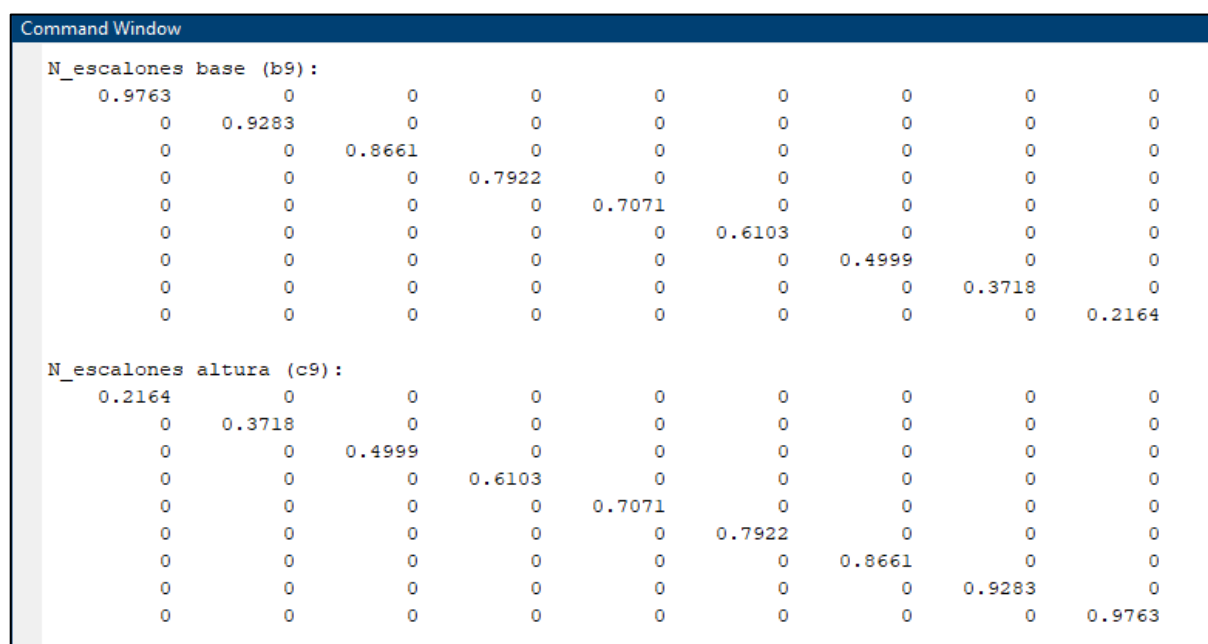
55 %tabla de los escalones
56 y5=[y1;y2];
57 N_Escalones_base=diag(y5(2,:));
58 N_Escalones_altura=diag(y5(1,:));
59 % Mostrar la solución para nueve escalones para la base y altura
60 disp('N_escalones base (b9):');
61 disp(N_Escalones_base);
62 disp('N_escalones altura (c9):');
63 disp(N_Escalones_altura);
64

```

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Figura 90

Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de nueve escalones



```

Command Window

N_escalones base (b9):
0.9763    0    0    0    0    0    0    0    0
    0    0.9283    0    0    0    0    0    0    0
    0    0    0.8661    0    0    0    0    0    0
    0    0    0    0.7922    0    0    0    0    0
    0    0    0    0    0.7071    0    0    0    0
    0    0    0    0    0    0.6103    0    0    0
    0    0    0    0    0    0    0.4999    0    0
    0    0    0    0    0    0    0    0.3718    0
    0    0    0    0    0    0    0    0    0.2164

N_escalones altura (c9):
0.2164    0    0    0    0    0    0    0    0
    0    0.3718    0    0    0    0    0    0    0
    0    0    0.4999    0    0    0    0    0    0
    0    0    0    0.6103    0    0    0    0    0
    0    0    0    0    0.7071    0    0    0    0
    0    0    0    0    0    0.7922    0    0    0
    0    0    0    0    0    0    0.8661    0    0
    0    0    0    0    0    0    0    0.9283    0
    0    0    0    0    0    0    0    0    0.9763

```

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Las secciones netas, los factores de utilización y el factor del hierro fueron calculados para cuatro tipos de materiales magnéticos los aceros de grano orientado convencionales mejorados que muestran características adecuadas para el diseño de transformadores de distribución y consideran en su aislamiento óxidos de alta calidad que permiten factores de apilamiento elevados, así como pérdidas en el núcleo relativamente bajos.

Tabla 35

Resultados de dimensiones de base de las chapas magnéticas para nueve escalones

Numero de escalones	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7	b8	b9
1	0.216D								
2		0.372D							
3			0.500D						
4				0.610D					
5					0.707D				
6						0.674D			
7							0.866D		
8								0.928D	
9									0.976D

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Tabla 36

Resultados de las dimensiones altura de las chapas magnéticas para nueve escalones

Numero de escalones	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
1	0.976D								
2		0.928D							
3			0.866D						
4				0.792D					
5					0.707D				
6						0.610D			
7							0.500D		
8								0.372D	
9									0.216D

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

3.10 Dimensionamiento angular para diez escalones

En la Figura 91 se muestra el área transversal del núcleo del transformador para el caso de 10 escalones, el mismo que está inscrito dentro del círculo y se definen sus dimensiones (b1, b2, b3, b4, b5, b6, b7, b8, b9, b10...c1, c2, c3, c4, c5, c6, c7, c8, c9, c10) en función del diámetro D y los ángulos correspondientes $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon, \zeta, \eta, \theta, \iota$ y k .

Donde:

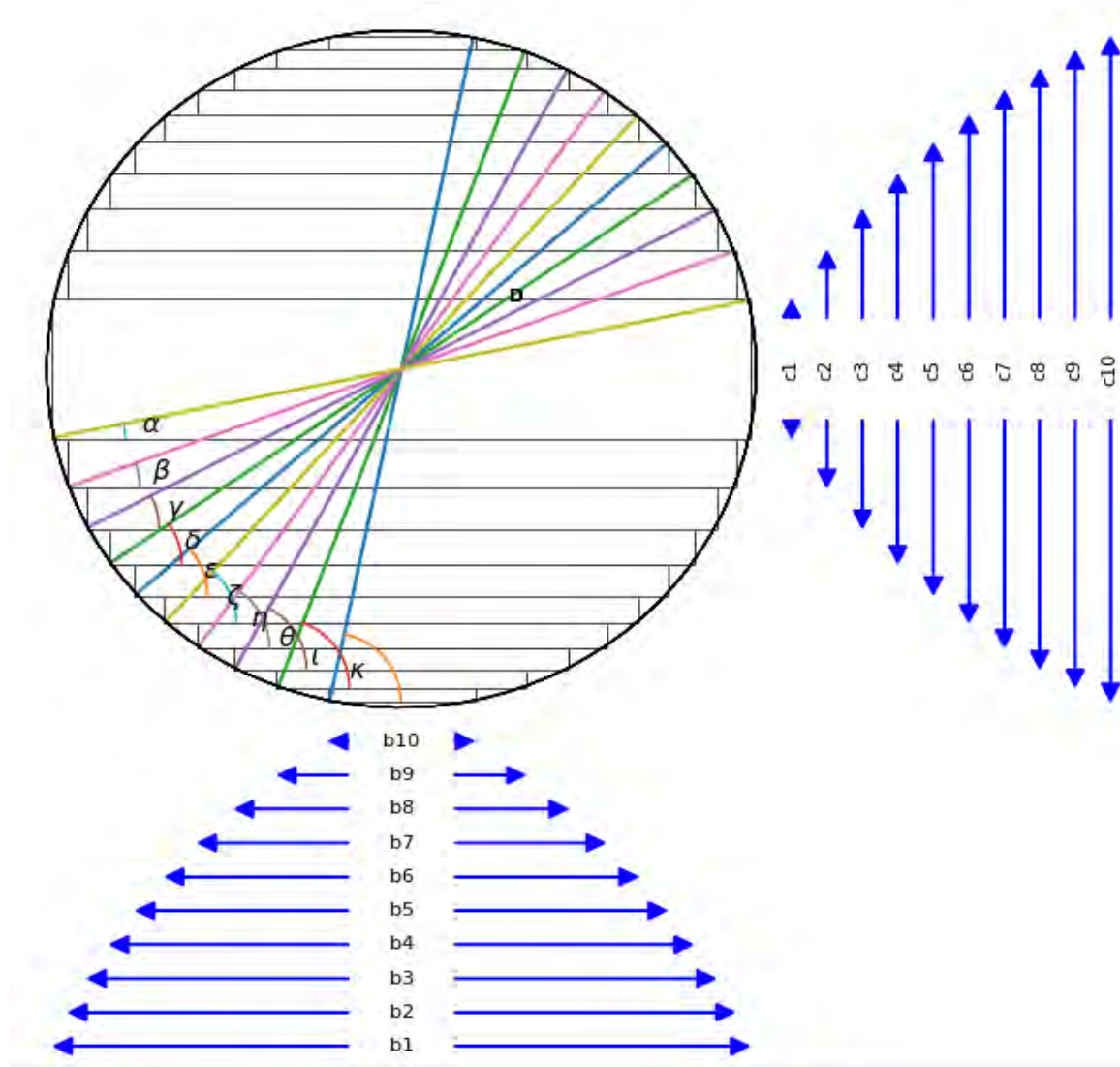
$b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8, b_9, b_{10}$: Ancho o base de la lámina magnética

$c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_9, c_{10}$: Altura de apilamiento de las láminas magnéticas.

D : Diámetro de la circunferencia

Figura 91

Área transversal del núcleo para diez escalones inscrito dentro del círculo



Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Sección geométrica (S_g)

$$S_g = b_1c_1 + b_2(c_2 - c_1) + b_3(c_3 - c_2) + b_4(c_4 - c_3) + b_5(c_5 - c_4) + b_6(c_6 - c_5) + b_7(c_7 - c_6) + b_8(c_8 - c_7) + b_9(c_9 - c_8) + b_{10}(c_{10} - c_9) \quad \text{Ec. 47}$$

- $b_1 = D \cos \alpha$; $b_2 = D \cos \beta$; $b_3 = D \cos \gamma$; $b_4 = D \cos \delta$; $b_5 = D \cos \varepsilon$; $b_6 = D \cos \zeta$; $b_7 = D \cos \eta$; $b_8 = D \cos \theta$; $b_9 = D \cos \iota$; $b_{10} = D \cos \kappa$

- $c_1 = D \operatorname{sen} \alpha$; $c_2 = D \operatorname{sen} \beta$; $c_3 = D \operatorname{sen} \gamma$; $c_4 = D \operatorname{sen} \delta$; $c_5 = D \operatorname{sen} \varepsilon$; $c_6 = D \operatorname{sen} \zeta$; $c_7 = D \operatorname{sen} \eta$; $c_8 = D \operatorname{sen} \theta$; $c_9 = D \operatorname{sen} \iota$; $c_{10} = D \operatorname{sen} \kappa$

Reemplazando los valores

$$S_g = D^2 \cos \alpha \operatorname{sen} \alpha + D^2 \cos \beta \operatorname{sen} \beta - D^2 \cos \beta \operatorname{sen} \alpha + D^2 \cos \gamma \operatorname{sen} \gamma - D^2 \cos \gamma \operatorname{sen} \beta + \\ D^2 \cos \delta \operatorname{sen} \delta - D^2 \cos \delta \operatorname{sen} \gamma + D^2 \cos \varepsilon \operatorname{sen} \varepsilon - D^2 \cos \varepsilon \operatorname{sen} \delta + D^2 \cos \zeta \operatorname{sen} \zeta - D^2 \cos \zeta \operatorname{sen} \varepsilon + \\ D^2 \cos \eta \operatorname{sen} \eta - D^2 \cos \eta \operatorname{sen} \zeta + D^2 \cos \theta \operatorname{sen} \theta - D^2 \cos \theta \operatorname{sen} \eta + D^2 \cos \iota \operatorname{sen} \iota - D^2 \cos \iota \operatorname{sen} \theta + \\ D^2 \cos \kappa \operatorname{sen} \kappa - D^2 \cos \kappa \operatorname{sen} \iota$$

Aplicando el método de optimización de áreas, se tiene:

$$\frac{dS_g}{d\alpha} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\beta} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\gamma} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\delta} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\varepsilon} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\zeta} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\eta} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\theta} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\iota} = 0 \quad \frac{dS_g}{d\kappa} = 0 \quad \text{Ec. 48}$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\alpha} = 0$$

$$\cos^2 \alpha - \operatorname{sen}^2 \alpha - \cos \beta \cos \alpha = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\beta} = 0$$

$$\cos^2 \beta - \operatorname{sen}^2 \beta + \operatorname{sen} \beta \operatorname{sen} \alpha - \cos \beta \cos \gamma = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\gamma} = 0$$

$$\cos^2 \gamma - \operatorname{sen}^2 \gamma + \operatorname{sen} \gamma \operatorname{sen} \beta - \cos \gamma \cos \delta = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\delta} = 0$$

$$\cos^2 \delta - \operatorname{sen}^2 \delta + \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \gamma - \cos \delta \cos \varepsilon = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\varepsilon} = 0$$

$$\cos^2 \varepsilon - \operatorname{sen}^2 \varepsilon + \operatorname{sen} \varepsilon \operatorname{sen} \delta - \cos \varepsilon \cos \zeta = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\zeta} = 0$$

$$\cos^2 \zeta - \operatorname{sen}^2 \zeta + \operatorname{sen} \zeta \operatorname{sen} \varepsilon - \cos \zeta \cos \eta = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\eta} = 0$$

$$\cos^2 \eta - \operatorname{sen}^2 \eta + \operatorname{sen} \eta \operatorname{sen} \zeta - \cos \eta \cos \theta = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\theta} = 0$$

$$\cos^2 \theta - \operatorname{sen}^2 \theta + \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} \eta - \cos \theta \cos \iota = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\iota} = 0$$

$$\cos^2 \iota - \operatorname{sen}^2 \iota + \operatorname{sen} \iota \operatorname{sen} \theta - \cos \iota \cos \kappa = 0$$

$$\text{Para } \frac{dS_g}{d\kappa} = 0$$

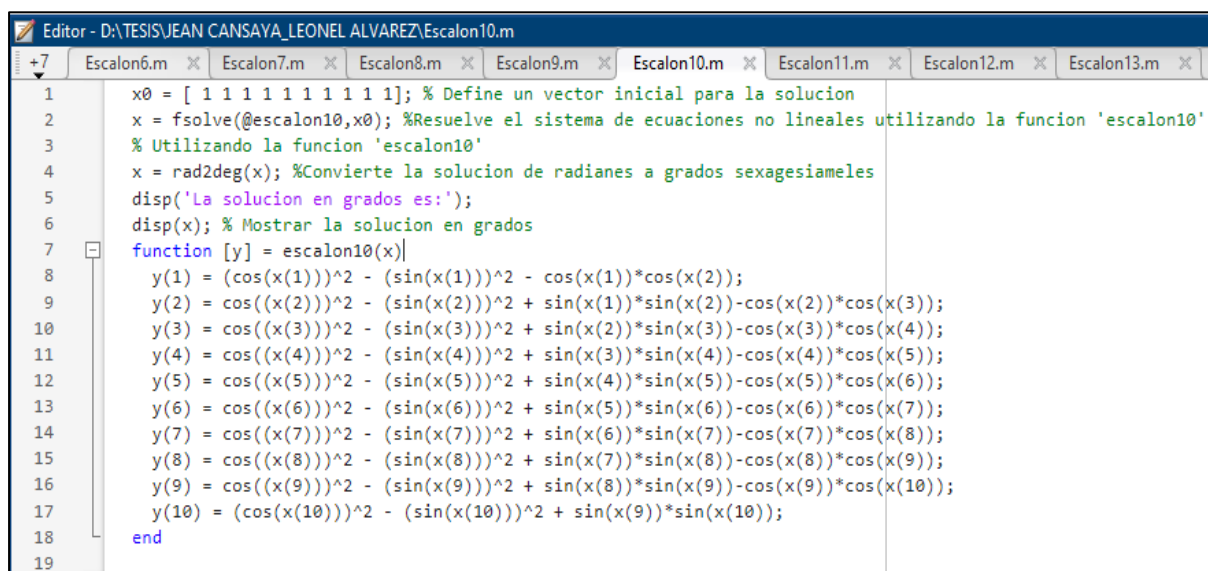
$$\cos^2 \kappa - \operatorname{sen}^2 \kappa + \operatorname{sen} \kappa \operatorname{sen} \iota = 0$$

Al derivar las ecuaciones en función de cada ángulo e igualando a cero para maximizar las áreas se tienen diez ecuaciones con diez incógnitas, luego aplicando el Matlab mediante las instrucciones correspondientes se procede a calcular el valor exacto de los ángulos que corresponden a $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta, \eta, \theta, \iota$ y κ .

Las instrucciones definidas se muestran en la Figura 92.

Figura 92

Instrucciones en Matlab para calcular el ángulo óptimo de diez escalones



```

1  x0 = [ 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]; % Define un vector inicial para la solución
2  x = fsolve(@escalon10,x0); %Resuelve el sistema de ecuaciones no lineales utilizando la función 'escalon10'
3  % Utilizando la función 'escalon10'
4  x = rad2deg(x); %Convierte la solución de radianes a grados sexagesimales
5  disp('La solución en grados es:');
6  disp(x); % Mostrar la solución en grados
7  function [y] = escalon10(x)
8      y(1) = (cos(x(1)))^2 - (sin(x(1)))^2 - cos(x(1))*cos(x(2));
9      y(2) = cos((x(2)))^2 - (sin(x(2)))^2 + sin(x(1))*sin(x(2))-cos(x(2))*cos(x(3));
10     y(3) = cos((x(3)))^2 - (sin(x(3)))^2 + sin(x(2))*sin(x(3))-cos(x(3))*cos(x(4));
11     y(4) = cos((x(4)))^2 - (sin(x(4)))^2 + sin(x(3))*sin(x(4))-cos(x(4))*cos(x(5));
12     y(5) = cos((x(5)))^2 - (sin(x(5)))^2 + sin(x(4))*sin(x(5))-cos(x(5))*cos(x(6));
13     y(6) = cos((x(6)))^2 - (sin(x(6)))^2 + sin(x(5))*sin(x(6))-cos(x(6))*cos(x(7));
14     y(7) = cos((x(7)))^2 - (sin(x(7)))^2 + sin(x(6))*sin(x(7))-cos(x(7))*cos(x(8));
15     y(8) = cos((x(8)))^2 - (sin(x(8)))^2 + sin(x(7))*sin(x(8))-cos(x(8))*cos(x(9));
16     y(9) = cos((x(9)))^2 - (sin(x(9)))^2 + sin(x(8))*sin(x(9))-cos(x(9))*cos(x(10));
17     y(10) = (cos(x(10)))^2 - (sin(x(10)))^2 + sin(x(9))*sin(x(10));
18 end
19

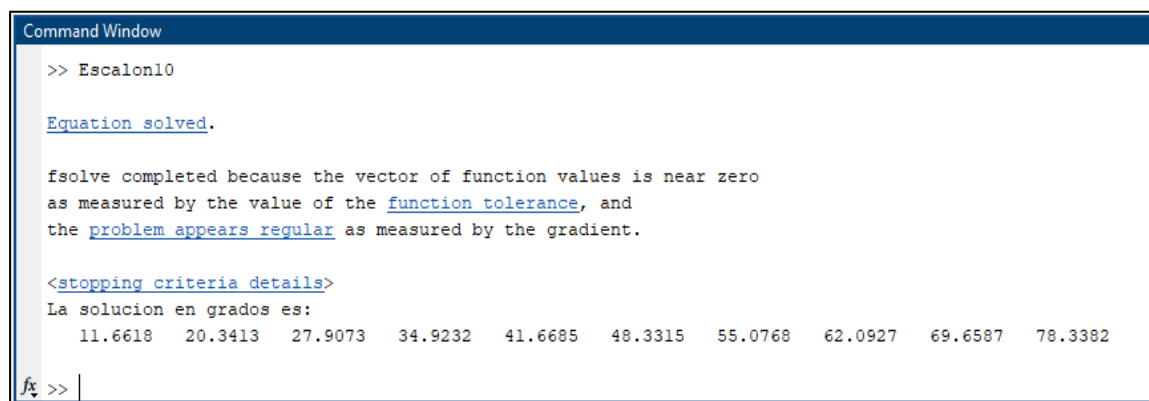
```

Nota. Elaboración propia y captura de gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Donde los ángulos $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta, \eta, \theta, \iota$ y κ son $x(1), x(2), x(3), x(4), x(5), x(6), x(7), x(8), x(9)$ y $x(10)$ respectivamente. Ejecutamos el programa y se convierten los ángulos que nos determina Matlab de radianes a grados sexagesimales.

Figura 93

Solución en Matlab para calcular el ángulo óptimo de diez escalones.



```

>> Escalon10

Equation solved.

fsolve completed because the vector of function values is near zero
as measured by the value of the function tolerance, and
the problem appears regular as measured by the gradient.

<stopping criteria details>
La solución en grados es:
    11.6618    20.3413    27.9073    34.9232    41.6685    48.3315    55.0768    62.0927    69.6587    78.3382
fx >>

```

Nota. Elaboración propia y captura de gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Entonces los ángulos obtenidos por el MATLAB son:

- $\alpha = 11.6618^\circ$
- $\beta = 20.3413^\circ$
- $\gamma = 27.9073^\circ$
- $\delta = 34.9232^\circ$
- $\varepsilon = 41.6685^\circ$
- $\zeta = 48.3315^\circ$
- $\eta = 55.0768^\circ$
- $\theta = 62.0927^\circ$
- $\iota = 69.6587^\circ$
- $\kappa = 78.3382^\circ$

Reemplazando los valores de los ángulos en la sección geométrica S_g .

$$S_g = D^2 \cos \alpha \operatorname{sen} \alpha + D^2 \cos \beta \operatorname{sen} \beta - D^2 \cos \beta \operatorname{sen} \alpha + D^2 \cos \tau \operatorname{sen} \tau - D^2 \cos \gamma \operatorname{sen} \beta + \\ D^2 \cos \delta \operatorname{sen} \delta - D^2 \cos \delta \operatorname{sen} \gamma + D^2 \cos \varepsilon \operatorname{sen} \varepsilon - D^2 \cos \varepsilon \operatorname{sen} \delta + D^2 \cos \zeta \operatorname{sen} \zeta - D^2 \cos \zeta \operatorname{sen} \varepsilon + \\ D^2 \cos \eta \operatorname{sen} \eta - D^2 \cos \eta \operatorname{sen} \zeta + D^2 \cos \theta \operatorname{sen} \theta - D^2 \cos \theta \operatorname{sen} \eta + D^2 \cos \iota \operatorname{sen} \iota - D^2 \cos \iota \operatorname{sen} \theta + \\ D^2 \cos \kappa \operatorname{sen} \kappa - D^2 \cos \kappa \operatorname{sen} \iota$$

Despejando D^2

$$S_g = D^2 (\cos \alpha \operatorname{sen} \alpha + \cos \beta \operatorname{sen} \beta - \cos \beta \operatorname{sen} \alpha + \cos \gamma \operatorname{sen} \gamma - \cos \gamma \operatorname{sen} \beta + \cos \delta \operatorname{sen} \delta - \\ \cos \delta \operatorname{sen} \gamma + \cos \varepsilon \operatorname{sen} \varepsilon - \cos \varepsilon \operatorname{sen} \delta + \cos \zeta \operatorname{sen} \zeta - \cos \zeta \operatorname{sen} \varepsilon + \cos \eta \operatorname{sen} \eta + \cos \eta \operatorname{sen} \zeta + \\ \cos \theta \operatorname{sen} \theta - \cos \theta \operatorname{sen} \eta + \cos \kappa \operatorname{sen} \kappa - \cos \kappa \operatorname{sen} \iota)$$

“Con el propósito de calcular de manera precisa la expresión correspondiente a la sección geométrica del núcleo, representada como S_g , se hará uso del entorno de programación MATLAB. Este software especializado ofrece herramientas numéricas y simbólicas que permiten realizar cálculos complejos con alta eficiencia y confiabilidad. De esta forma, se garantiza un tratamiento riguroso y reproducible del cálculo, fundamental para la validación del diseño estructural del transformador.

Las instrucciones se muestran en la figura 94. Además, el uso de MATLAB permite automatizar procedimientos que, de realizarse manualmente, resultarían extensos y propensos a errores. Asimismo, facilita la implementación de funciones paramétricas que admiten variaciones en el número de escalones y dimensiones del núcleo. Esto permite comparar diferentes configuraciones geométricas bajo un mismo criterio de análisis. El procesamiento computacional también ayuda a visualizar tendencias y comportamientos del área geométrica frente a cambios angulares. En conjunto, el uso de MATLAB fortalece la precisión del diseño y la confiabilidad de los resultados obtenidos.”

Figura 94

Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de diez escalones

```

Editor - D:\TESIS\JEAN CANSAYA_LEONEL ALVAREZ\Escalon10.m
+6 Escalon4.m Escalon5.m Escalon6.m Escalon7.m Escalon8.m Escalon9.m Escalon10.m Escalon11.m
10 x1= deg2rad(x);% trabajaremos con radianes para poder calcular los valores
11 %Calculamos la seccion geometrica para diez escalones
12 y1=sin(x1);
13 y2=cos(x1);
14 y3=y1.*y2;
15 y4=[x; y1; y2; y3];
16 %Calculamos la seccion geometrica
17 sg=y4(4,1)+y4(4,2)+y4(4,3)+y4(4,4)+y4(4,5)+y4(4,6)+y4(4,7)+y4(4,8)+y4(4,9)+y4(4,10);
18 -(y4(2,1)*y4(3,2))-(y4(2,2)*y4(3,3))-(y4(2,3)*y4(3,4))-(y4(2,4)*y4(3,5));
19 -(y4(2,5)*y4(3,6))-(y4(2,6)*y4(3,7))-(y4(2,7)*y4(3,8))-(y4(2,8)*y4(3,9))-(y4(2,9)*y4(3,10));
20 % Mostrar la solucion para diez escalones
21 disp('Resultado: Seno(n):');
22 disp(y1);
23 disp('Resultado: Coseno(n):');
24 disp(y2);
25 disp('Resultado: Seno*Coseno:');
26 disp(y3);
27 disp('Resp: a b c d e f g h i j');
28 disp(y4);
29 disp('Resultado_sg:');
30 disp(sg);
31

```

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Figura 95

Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de diez escalones

```

Command Window
<stopping criteria details>
La solucion en grados es:
    11.6618    20.3413    27.9073    34.9232    41.6685    48.3315    55.0768    62.0927    69.6587    78.3382

Resultado: Seno(n):
    0.2021    0.3476    0.4680    0.5725    0.6648    0.7470    0.8199    0.8837    0.9376    0.9794

Resultado: Coseno(n):
    0.9794    0.9376    0.8837    0.8199    0.7470    0.6648    0.5725    0.4680    0.3476    0.2021

Resultado: Seno*Coseno:
    0.1980    0.3259    0.4136    0.4694    0.4966    0.4966    0.4694    0.4136    0.3259    0.1980

Resp:  a      b      c      d      e      f      g      h      i      j
    11.6618  20.3413  27.9073  34.9232  41.6685  48.3315  55.0768  62.0927  69.6587  78.3382
    0.2021   0.3476   0.4680   0.5725   0.6648   0.7470   0.8199   0.8837   0.9376   0.9794
    0.9794   0.9376   0.8837   0.8199   0.7470   0.6648   0.5725   0.4680   0.3476   0.2021
    0.1980   0.3259   0.4136   0.4694   0.4966   0.4966   0.4694   0.4136   0.3259   0.1980

Resultado_sg:
    0.7488

```

Nota. Elaboración propia y captura de gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Tabla 37*Ángulos calculados para cinco escalones*

	α	β	γ	δ	ε
Ángulos	11.6618	20.3413	27.9073	34.9232	41.6685
Sen	0.202134387	0.347611611	0.46804241	0.572477919	0.664819768
Cos	0.979357794	0.937638612	0.883706004	0.819920137	0.747003799
Cos*Sen	0.197961887	0.325934069	0.413611888	0.469386174	0.496622893
Sg	0.748816394*D²				

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)**Tabla 38***Ángulos calculados para cinco escalones*

	ζ	η	θ	ι	κ
Ángulos	48.3315	55.0768	62.0927	69.6587	78.3382
Sen	0.747003799	0.819920137	0.883706004	0.937638612	0.979357794
Cos	0.664819768	0.572477919	0.46804241	0.347611611	0.202134387
Cos*Sen	0.496622893	0.469386174	0.413611888	0.325934069	0.197961887
Sg	0.748816394*D²				

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Con los datos obtenidos mediante el Excel reemplazamos en la Ecuación 47

$$S_g = 0.7488 * D^2$$

Aplicamos nuevamente el Matlab y las ecuaciones (6, 7 y 8) para calcular las expresiones de sección neta, el factor de utilización y el factor de hierro del núcleo de 10 escalones. La Figura 96 muestra las instrucciones identificadas para el respectivo cálculo. Este procedimiento computacional permite procesar de manera rápida y precisa los valores geométricos asociados a cada escalón, garantizando consistencia en los resultados obtenidos. El uso de 10 escalones proporciona una aproximación más fina a la forma circular ideal del núcleo, lo que exige un análisis numérico cuidadoso. MATLAB facilita la implementación de algoritmos que integran las dimensiones escalonadas y las relaciones matemáticas necesarias para obtener los parámetros magnéticos clave. Además, la automatización del cálculo reduce significativamente la posibilidad de errores manuales y mejora la reproducibilidad del diseño. Este enfoque también permite comparar el comportamiento del núcleo frente a otras configuraciones previamente analizadas. En conjunto, la aplicación del software contribuye a optimizar la eficiencia geométrica y magnética del transformador, ofreciendo una base confiable para la toma de decisiones en el diseño final.

Figura 96

Código en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de diez escalones para materiales de grano orientado convencionales mejorados.

```

30 % calculamos la la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro
31 % del núcleo del transformador de DIEZ ESCALONES
32 %Utilizamos el factor de apilamiento para materiales de grano orientado convencionales mejorados(CGO)
33 % M 105-23 S AM FCE__M 114-27 S AM FCE__M 117-30 S AM FCE__M 125-35 S AMFCE
34 fa=[0.945; 0.950; 0.955; 0.960];
35 %Calculamos la seccion neta del nucleo del transformador para diez escalones
36 Sn1=fa(1,1)*sg; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
37 Sn2=fa(2,1)*sg; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
38 Sn3=fa(3,1)*sg; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
39 Sn4=fa(4,1)*sg; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
40 %Calculamos el factor de utilizacion del nucleo del transformador para diez escalones
41 fu1=4*Sn1/pi; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
42 fu2=4*Sn2/pi; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
43 fu3=4*Sn3/pi; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
44 fu4=4*Sn4/pi; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
45 %Calculamos el factor de hierro del nucleo del transformador para diez escalones
46 ffe1=Sn1; % M 105-23 S AM FCE "0.23 mm de espesor"
47 ffe2=Sn2; % M 114-27 S AM FCE "0.27 mm de espesor"
48 ffe3=Sn3; % M 117-30 S AM FCE "0.30 mm de espesor"
49 ffe4=Sn4; % M 125-35 S AM FCE "0.35 mm de espesor"
50 %Ordenamos los datos calculados
51 Datos=[0.945 Sn1 ffe1; 0.950 Sn2 fu2 ffe2; 0.955 Sn3 fu3 ffe3; 0.960 Sn4 fu4 ffe4];
52 disp('Datos(10): fa sn fu ffe');
53 disp(Datos);
54

```

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

Figura 97

Solución en Matlab para calcular la sección neta, factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador de diez escalones

Command Window				
Datos(10):	fa	sn	fu	ffe
	0.9450	0.7076	0.9010	0.7076
	0.9500	0.7114	0.9058	0.7114
	0.9550	0.7151	0.9105	0.7151
	0.9600	0.7189	0.9153	0.7189

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

El cálculo de la sección neta, el factor de utilización y el factor de hierro nos muestra la tabla 39, dichos valores obtenidos son para las láminas de acero eléctrico de granos orientados convencionales mejorados de acuerdo a EN (Normas Europeas)

Tabla 39

Cálculo de los parámetros de las chapas magnéticas según el tipo de material magnético de granos orientados convencionales mejorados.

Tipo de Aislamiento	f_a	S_n	f_u	f_{FE}
M105-23 S AM FCE	0.945	$0.707631 \cdot D^2$	0.900984	0.707631
M114-27 S AM FCE	0.950	$0.711376 \cdot D^2$	0.905752	0.711376
M117-30 S AM FCE	0.955	$0.715120 \cdot D^2$	0.910519	0.715120
M125-35 S AM FCE	0.960	$0.718864 \cdot D^2$	0.915286	0.718864

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Reemplazando los valores de los ángulos en las medidas en cada escalón.

1 escalón:

- $b_1 = D \cos \alpha = D \cos(11.6618) = 0.202D$
- $c_1 = D \sin \alpha = D \sin(11.6618) = 0.979D$

2 escalón:

- $b_2 = D \cos \beta = D \cos(20.3413) = 0.938D$
- $c_2 = D \sin \beta = D \sin(20.3413) = 0.348D$

3 escalón:

- $b_3 = D \cos \gamma = D \cos(27.9073) = 0.884D$
- $c_3 = D \sin \gamma = D \sin(27.9073) = 0.468D$

4 escalón:

- $b_4 = D \cos \delta = D \cos(34.9232) = 0.820D$
- $c_4 = D \sin \delta = D \sin(34.9232) = 0.572D$

5 escalón:

- $b_5 = D \cos \varepsilon = D \cos(41.6685) = 0.747D$
- $c_5 = D \sin \varepsilon = D \sin(41.6685) = 0.665D$

6 escalón:

- $b_6 = D \cos \zeta = D \cos(48.3315) = 0.0665D$
- $c_6 = D \sin \zeta = D \sin(48.3315) = 0.747D$

7 escalón:

- $b_7 = D \cos \eta = D \cos(55.0768) = 0.572D$
- $c_7 = D \sin \eta = D \sin(55.0768) = 0.820D$

8 escalón:

- $b_8 = D \cos \theta = D \cos(62.0927) = 0.468D$
- $c_8 = D \sin \theta = D \sin(62.0927) = 0.884D$

9 escalón:

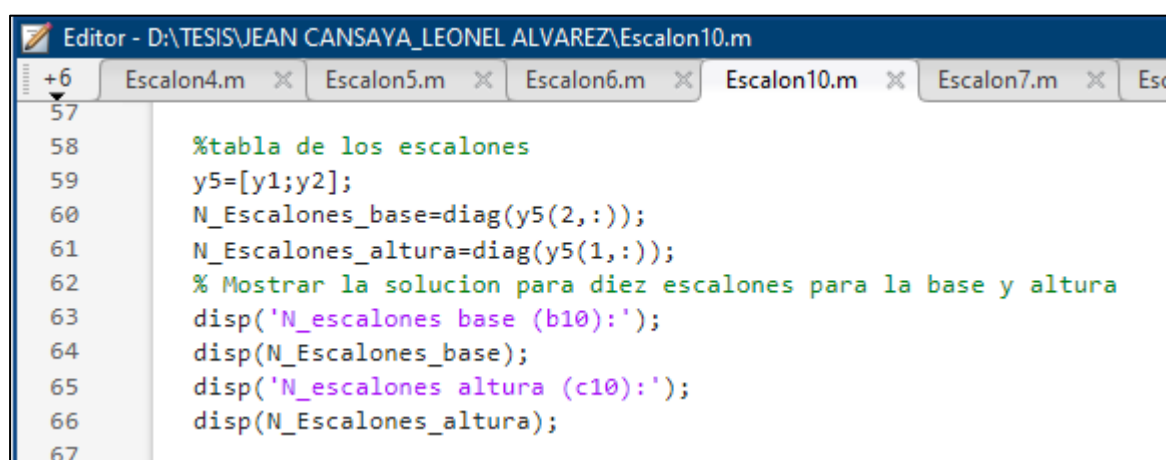
- $b_8 = D\cos l = D\cos(69.6587) = 0.348D$
- $c_8 = D\sen l = D\sen(69.6587) = 0.938D$

10 escalón:

- $b_8 = D\cos k = D\cos(78.3382) = 0.202D$
- $c_8 = D\sen k = D\sen(78.3382) = 0.979D$

Figura 98

Código en Matlab para calcular los valores de los ángulos de nuestros escalones del núcleo del transformador de diez escalones.



```

Editor - D:\TESIS\JEAN CANSAYA_LEONEL ALVAREZ\Escalon10.m
+6 Escalon4.m Escalon5.m Escalon6.m Escalon10.m Escalon7.m Esc
57
58 %tabla de los escalones
59 y5=[y1;y2];
60 N_Escalones_base=diag(y5(2,:));
61 N_Escalones_altura=diag(y5(1,:));
62 % Mostrar la solución para diez escalones para la base y altura
63 disp('N_escalones base (b10):');
64 disp(N_Escalones_base);
65 disp('N_escalones altura (c10):');
66 disp(N_Escalones_altura);
67

```

Nota. Elaboración propia y captura de gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

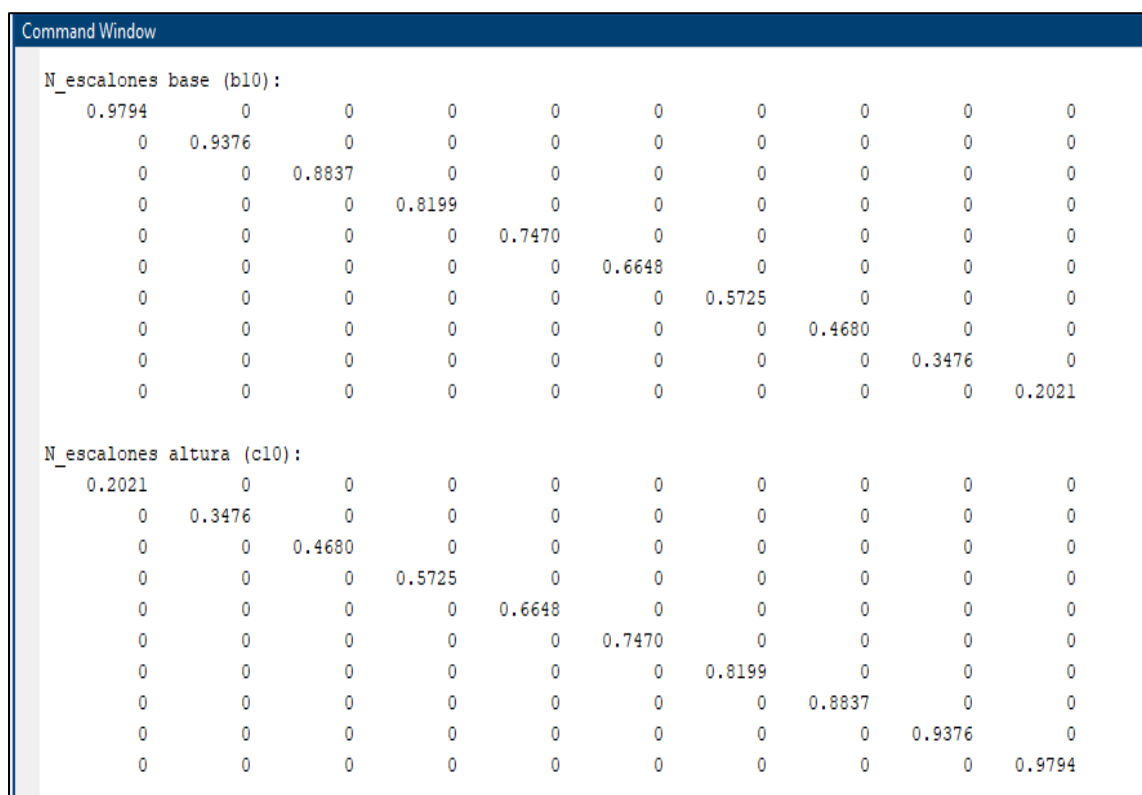
La Figura 99 presenta la solución obtenida en Matlab para calcular la sección neta, el factor de utilización y el factor de hierro del núcleo del transformador correspondiente al diseño de diez escalones, utilizando una aproximación numérica de cuatro decimales para mejorar la precisión del resultado. En esta configuración geométrica, las dimensiones del núcleo consideran cinco valores asociados a la base o ancho y cinco a la altura, lo que permite describir con detalle la forma escalonada que aproxima la sección circular.

El uso de Matlab facilita el procesamiento simultáneo de estas dimensiones y la aplicación directa de las ecuaciones involucradas, asegurando consistencia matemática en los parámetros calculados.

Esta solución computacional constituye un apoyo esencial para evaluar la eficiencia del uso del material magnético y para validar la calidad del diseño estructural del núcleo

Figura 99

Solución en Matlab para calcular las dimensiones de los escalones base y altura para diez escalones.



Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de datos del software MATLAB (2025)

En la siguiente tabla 40 se muestra la altura (c) y el ancho (b) de las láminas magnéticas calculadas en función del diámetro de la circunferencia circunscrita en el núcleo (D).

Tabla 40

Resultados de base de las chapas magnéticas para diez escalones

Numero de escalones	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7	b8	b9	b10
1	0.202D									
2		0.348D								
3			0.468D							
4				0.572D						
5					0.665D					
6						0.747D				
7							0.820D			
8								0.884D		
9									0.938D	
10										0.979D

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

Tabla 41

Resultados altura de las láminas magnéticas para diez escalones.

Numero de escalones	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9	c10
1	0.979D									
2		0.938D								
3			0.884D							
4				0.820D						
5					0.747D					
6						0.665D				
7							0.572D			
8								0.468D		
9									0.348D	
10										0.202D

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

RESUMEN DEL CAPÍTULO III

El Capítulo III constituye el núcleo técnico y analítico de la investigación, en el cual se desarrolla el procedimiento completo de cálculo del dimensionamiento angular óptimo del núcleo escalonado utilizando Matlab, para núcleos con uno hasta diez escalones. Se inicia presentando conceptos generales sobre las dimensiones geométricas del núcleo y la relación entre diámetro circunscrito, ángulos de corte y área transversal, estableciendo las bases del modelamiento computacional utilizado.

A continuación, el capítulo presenta de forma sistemática y progresiva el cálculo del ángulo óptimo, la sección neta, el factor de utilización y las dimensiones (b y c) de las láminas magnéticas para cada número de escalones. Cada subsección incluye el procedimiento matemático, los códigos desarrollados en Matlab, las salidas gráficas y numéricas, así como la tabla de resultados correspondiente.

El análisis inicia con el caso de un escalón y avanza escalón por escalón, mostrando la evolución del ángulo óptimo y de las dimensiones necesarias para cada configuración. En cada nivel se calculan:

- El área transversal geométrica y el área neta.
- El factor de utilización y el factor del hierro.
- Las bases y alturas de las láminas ($b_1 \dots b_n$; $c_1 \dots c_n$).
- Los valores óptimos del ángulo ($\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta, \eta, \theta, \iota$ y k).

Los resultados muestran que conforme aumenta el número de escalones, la aproximación al círculo circunscrito mejora, incrementándose así el factor de utilización. Sin embargo, el crecimiento no es lineal: se evidencia una tendencia creciente en los factores de utilización hasta aproximadamente el sexto escalón, a partir del cual los incrementos se reducen y se comportan de manera asintótica. Este comportamiento confirma que añadir más escalones no necesariamente garantiza mejoras significativas, pues se incrementa el costo y complejidad de manufactura, pero con beneficios marginales en utilización de material.

El capítulo también compara los resultados obtenidos para diferentes materiales magnéticos (CGO mejorados), analizando variaciones en el factor de apilamiento, espesor de láminas y sección neta. Finalmente, se presentan gráficas y tablas de tendencias que sintetizan la progresión del dimensionamiento angular desde 1 hasta 10 escalones, concluyendo que el intervalo óptimo de diseño se encuentra entre 5 y 7 escalones, donde se logra un equilibrio adecuado entre precisión geométrica, factor de utilización y viabilidad técnica.

CAPÍTULO IV

INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO PARA EL DIMENSIONAMIENTO ANGULAR Y EL FACTOR DE UTILIZACIÓN DEL NÚCLEO ESCALONADO

4.1 Generalidades

El proceso de dimensionamiento angular y estructural, así como el factor de utilización del núcleo escalonado de un transformador de distribución requiere la resolución de sistemas de ecuaciones no lineales, el manejo preciso de parámetros geométricos y la visualización clara de los resultados obtenidos.

Para facilitar este proceso, se plantea el desarrollo de una interfaz gráfica de usuario (GUI) que permita al usuario interactuar con los datos, visualizar los resultados en tiempo real y realizar ajustes dinámicos en las variables de entrada. Según MathWorks (2025) indica que:

Aunque MATLAB es una herramienta potente para cálculos numéricos y visualización de datos, sus capacidades para el desarrollo de interfaces gráficas modernas presentan limitaciones en comparación con entornos especializados debido a restricciones en estética, interactividad y portabilidad (párr. 1).

En el entorno Matlab se presentan algunas limitaciones estéticas visuales poco flexibles, menor capacidad para crear interfaces interactivas avanzadas y portabilidad entre plataformas. Por estas razones, en este capítulo se mejora la función de Matlab con el uso de Python como entorno de desarrollo para la implementación de la interfaz gráfica de usuario GUI esta herramienta permite construir interfaces gráficas más modernas, interactivas, adaptables y con mejor presentación visual. Además, ofrecen mayor compatibilidad multiplataforma. La literatura técnica respalda el uso de Python “para desarrollar interfaces capaces de realizar cálculos automáticos y generar salidas visuales a partir de parámetros ingresados por el usuario, lo cual coincide con el diseño implementado para el análisis del núcleo escalonado” (Wantuch, 2016, *Abstract*).

La interfaz desarrollada en Python está orientada al cálculo automático del dimensionamiento del núcleo escalonado, así como a la determinación del factor de utilización del hierro, permitiendo al usuario ingresar parámetros de diseño y obtener resultados visuales de forma inmediata. Además, se incluye la generación de gráficos escalonados del núcleo, representaciones geométricas interactivas, reportes resumidos de los resultados obtenidos y visualización integral del dimensionamiento del núcleo escalonado con diferentes materiales.

Python, al contar con bibliotecas como Tkinter, PyQt, Dash y Streamlit, permite crear interfaces modernas, interactivas y con una experiencia de usuario altamente personalizable, lo cual es ideal para aplicaciones de ingeniería (Lutz, 2021; Grinberg, 2018).

4.2 Estructura de la interfaz gráfica de usuario GUI para el dimensionamiento angular y el factor de utilización.

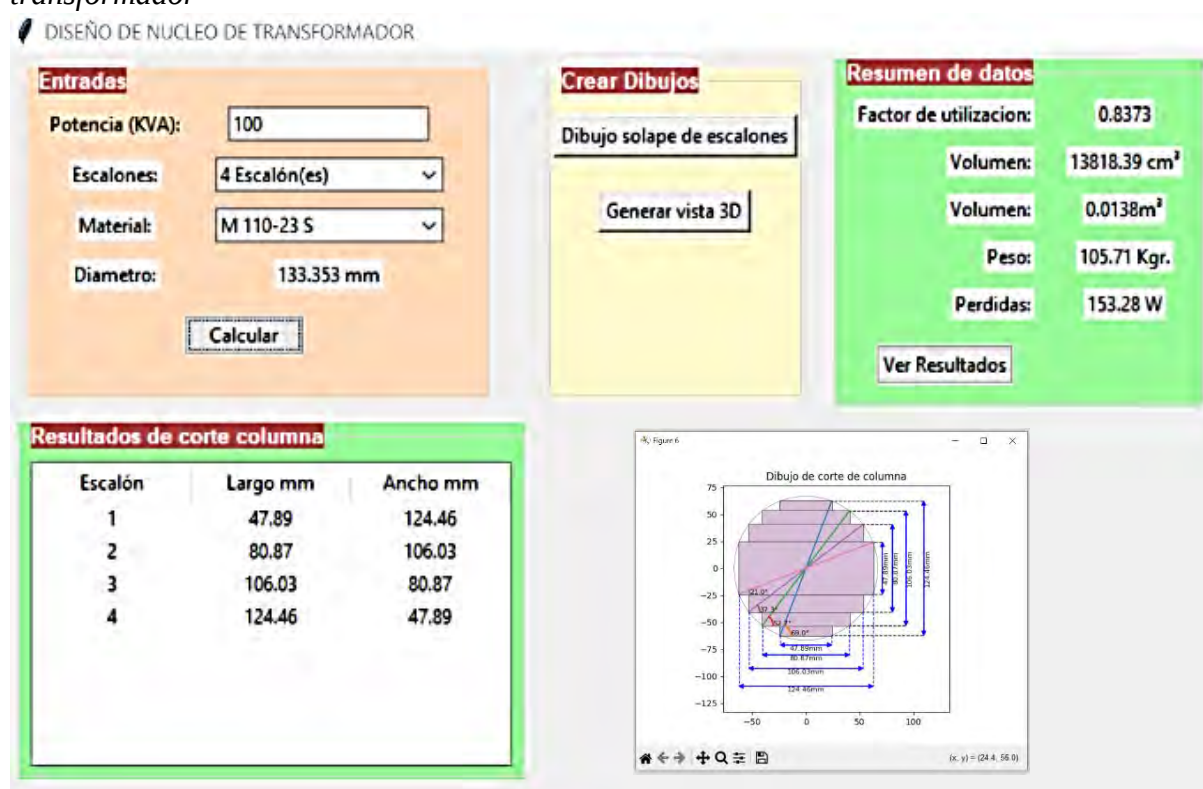
La interfaz gráfica de usuario (GUI), mostrada en la Figura 100, ha sido diseñada con un enfoque modular y funcional, permitiendo al usuario una interacción clara y eficiente con la herramienta de cálculo. Esta interfaz presenta un título principal que identifica su propósito general dentro del sistema de dimensionamiento del núcleo escalonado del transformador.

La Interfaz gráfica de usuario se organiza en cuatro ventanas funcionales principales:

1. Entradas: Permite el ingreso de datos por parte del usuario.
2. Creación de dibujos: Se encarga de construir y visualizar las representaciones gráficas del núcleo escalonado en función de los datos ingresados.
3. Resumen de datos: Presenta de forma sintetizada los parámetros calculados y las variables intermedias del proceso.
4. Resultados del corte de columnas: Muestra los resultados específicos relacionados con la sección transversal del núcleo, segmentación estructural y armado al solape.
5. Campo de muestra de resultados gráficos

Figura 100

Interfaz gráfica del usuario para determinar el dimensionamiento del núcleo del transformador



Nota. Elaboración propia y captura de gráfica de la Interfaz gráfica.

Cada uno de estos módulos ha sido programado para cumplir funciones específicas dentro del flujo de trabajo, manteniendo una interacción dinámica y continua entre ellos. Esto permite que cualquier modificación en los datos de entrada se refleje inmediatamente en las representaciones gráficas y en los resultados numéricos, asegurando la coherencia del análisis y facilitando la toma de decisiones por parte del usuario.

4.2.1 La ventana de entradas de la interfaz gráfica de usuario

Esta ventana es importante por las diferentes funciones que desempeña, se ingresa la potencia del transformador, luego el número de escalones, el tipo de material magnético a utilizar y como dato adicional autogenerado es el diámetro del círculo al que está inscrito el núcleo escalonado. En la figura 101 se muestra la gráfica la ventana de entrada y los diferentes botones de entrada de datos iniciales.

Figura 101

Ventana de entrada de datos iniciales

Nota. Elaboración propia y captura gráfica a partir de la interfaz gráfica para un caso específico de 100 kVA, 4 escalones y las láminas de grano orientado convencional mejorado M110-23 S

4.2.1.1 La potencia del transformador

La potencia del transformador para fines académicos puede especificarse en diferentes valores, sin embargo, en la práctica las normas *NTP 370.400* determinan los siguientes rangos de potencia y niveles de tensión:

- *Transformadores monofásicos:*
 - o Potencia: 5 kVA a 50 kVA
 - o Tensión en alta tensión (A.T.): hasta 36 kV

- o Tensión en baja tensión (B.T.): hasta 1,0 kV
- *Transformadores trifásicos:*
 - o Potencia en KVA: 15, 25, 37.5, 50, 75, 100, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630
 - o Tensión en alta tensión (A.T.): hasta 36 kV
 - o Tensión en baja tensión (B.T.): hasta 1,0 kV

Los transformadores están diseñados para operar en distribución eléctrica con tensiones de media tensión, típicamente entre 1 kV y 36 kV en el lado de alta tensión (INACAL, 2013).

4.2.1.2 Número de escalones

En la interfaz gráfica de usuario se tiene una lista desplegable de hasta 10 escalones, pero en el diseño práctico son usuales los escalones de 2 a 8 escalones en concordancia con la potencia aparente del transformador.

Los valores de escalones sugeridos para la potencia del transformador en forma referencial son:

De 15 a 100 kVA: 2 a 3 escalones

De 100 a 250 kVA: 3 a 4 escalones

De 250 a 500 kVA: 4 a 5 escalones

De 500 a 630 kVA: 5 a 6 escalones

De acuerdo con el Instituto Nacional de Calidad (INACAL), (2013) *NTP 370.400: Transformadores de distribución monofásicos y trifásicos auto-refrigerados, sumergidos en líquido aislante*)

4.2.1.3 El material magnético utilizado

De acuerdo con la norma EN 10107:2014, los aceros eléctricos de grano orientado convencional mejorado (CGO mejorado) presentan características superiores en comparación con los aceros de grano orientado convencionales (CGO convencional), destacando por ofrecer menores pérdidas magnéticas y mayores niveles de polarización. En particular, la polarización magnética a una intensidad de campo de 800 A/m en estos aceros mejorados alcanza un valor mínimo de 1,85 T, superando los 1,75 T o 1,78 T exigidos por la norma. Este mayor nivel de polarización permite operar el núcleo magnético a un punto de trabajo más elevado, lo cual posibilita el diseño de transformadores más compactos y con menor consumo de materiales.

Sin embargo, operar a mayores densidades de flujo también puede incrementar las pérdidas en el núcleo, lo que podría afectar la eficiencia del transformador. Por ello, fabricantes como ArcelorMittal comercializan sus grados CGO mejorados con bajas pérdidas específicas, a fin de compensar estos efectos. Estos aceros mejorados pueden utilizarse en todas las aplicaciones donde se emplea acero CGO convencional, pero resultan especialmente

ventajosos en diseños donde se busca minimizar las pérdidas en vacío, como en transformadores de alta eficiencia y bobinas de impedancia.

Para ArcelorMittal:

Los aceros CGO mejorados se posicionan técnicamente entre el acero GO convencional y el acero de alta permeabilidad (HGO), ofreciendo un equilibrio entre rendimiento magnético y costo. Aunque el HGO permite una reducción aún mayor de pérdidas y un incremento adicional en la polarización, esto implica un aumento en el costo del material. En consecuencia, los grados CGO mejorados se consolidan como una alternativa eficiente y rentable para aplicaciones que exigen mejores prestaciones sin comprometer la viabilidad económica del diseño (ArcelorMittal, 2024, pp. 35-37).

Los materiales empleados normalmente en diseños de alta eficiencia son los denominados aceros eléctricos de grano orientado convencionales mejorados siguientes:

Tabla 42

Propiedades del acero M 105-23 S AM FCE

ESPESOR (mm)	DENSIDAD DE FLUJO (Teslas)	FACTOR DE APILAMIENTO	PÉRDIDAS (W/Kg)	DENSIDAD (kg/dm ³)
0.23	1.85	0.945	1.38	7.65

Nota. Adaptado de ArcelorMittal. (2024). *Página oficial de ArcelorMittal.*

Tabla 43

Propiedades del acero M 114-27 S AM FCE

ESPESOR (mm)	DENSIDAD DE FLUJO (Teslas)	FACTOR DE APILAMIENTO	PÉRDIDAS (W/Kg)	DENSIDAD (kg/dm ³)
0.27	1.85	0.950	1.50	7.65

Nota. Adaptado de ArcelorMittal. (2024). *Página oficial de ArcelorMittal.*

Tabla 44

Propiedades del acero M 117-30 S AM FCE

ESPESOR (mm)	DENSIDAD DE FLUJO (Teslas)	FACTOR DE APILAMIENTO	PÉRDIDAS (W/Kg)	DENSIDAD (kg/dm ³)
0.30	1.85	0.955	1.55	7.65

Nota. Adaptado de ArcelorMittal. (2024). *Página oficial de ArcelorMittal.*

Tabla 45

Propiedades M 125-35 S AM FCE

ESPESOR (mm)	DENSIDAD DE FLUJO (Teslas)	FACTOR DE APILAMIENTO	PÉRDIDAS (W/Kg)	DENSIDAD (kg/dm ³)
0.35	1.85	0.960	1.65	7.65

Nota. Adaptado de ArcelorMittal. (2024). *Página oficial de ArcelorMittal.*

El software de interfaz gráfica de usuario emplea estos cuatro tipos de materiales y el botón de material permite mostrar una lista desplegable para seleccionar hasta 18 tipos de material requerido en función a las Normas Europeas.

4.2.1.4 El diámetro del círculo circunscrito al área escalonada del núcleo

Existen varios métodos de cálculo del diámetro D uno denominado teórico y el otro denominado gráfico, explicaremos ambos métodos.

El primer método es utilizando por el Ingeniero José Obando en la Empresa de fabricación de transformadores Ganbha Engineers S.A.C. y formulado en su tesis de la UNAC “Diseño de un transformador de 50kVA” (p.20) y presenta la ecuación siguiente:

$$D = 42.17 \sqrt[4]{P} \text{ (mm)}$$

Donde:

D =Diámetro del círculo circunscrito al área escalonada en mm.

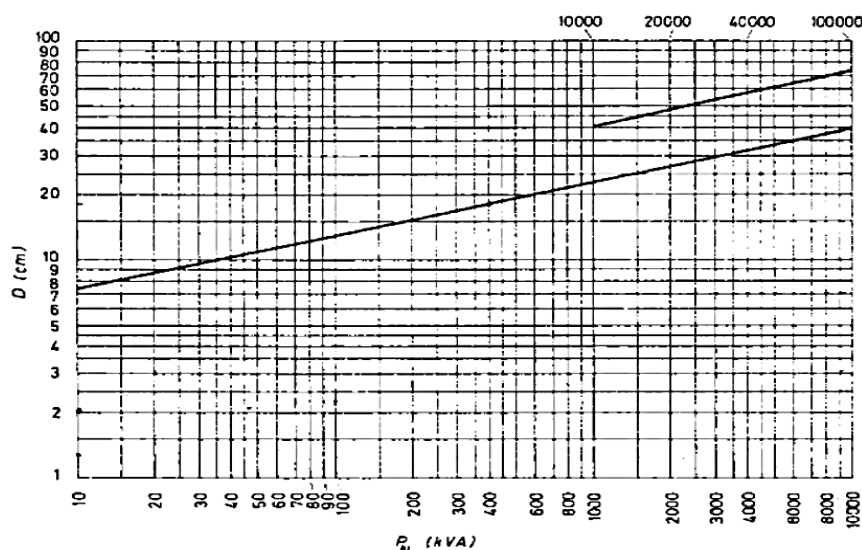
P =Potencia aparente en KVA

El segundo método corresponde a la propuesta de Juan Corrales, la cual se basa en una gráfica que relaciona dos variables fundamentales: la potencia aparente P del transformador, expresada en kVA, y el diámetro D , en centímetros, del círculo circunscrito al área escalonada del núcleo magnético. Esta relación permite estimar dimensionalmente el núcleo en función de la potencia de diseño, como se muestra en la Figura 102.

Este método resulta particularmente útil en etapas preliminares de diseño, ya que simplifica el cálculo del tamaño del núcleo mediante un enfoque gráfico empírico.

Figura 102

Gráfica para el cálculo del diámetro D del núcleo en función de la potencia aparente



Nota. Reproducido de “Calculo industrial de Máquinas eléctricas” Juan Corrales (1976)

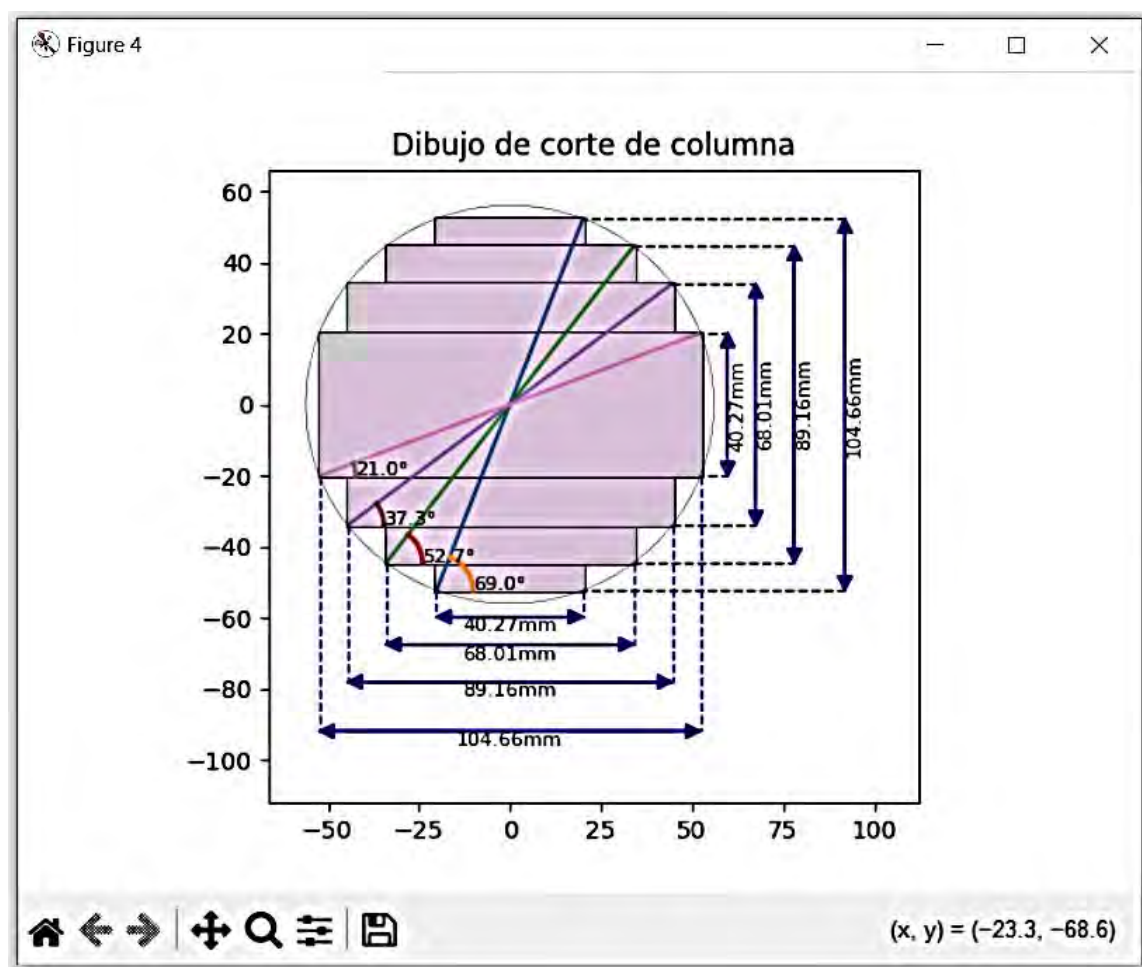
4.2.1.4 El cálculo

Este botón de operación permite desarrollar los cálculos solicitados como son:

- Gráfica de corte de las columnas del núcleo para cada uno de los 10 escalones y los 18 tipos de materiales de acero eléctrico de grano orientado convencional y mejorados con sus dimensiones, como se puede apreciar en la Figura 103.
- Los ángulos óptimos de escalonamiento para los 10 escalones
- Número de escalones

Figura 103

Gráfica del corte de columna, con los ángulos óptimos, dimensiones de 4 escalones



Nota. Estas gráficas se presentan para cada uno de los escalones del 1 al 10, también para los 18 tipos de material de Acero eléctrico de grano orientado convencional mejorado.

4.2.2 La ventana de resultados de corte de columna

En esta ventana se especifican las dimensiones para cada uno de los escalones solicitados:

El número del escalón del 1 al 10

El ancho de cada escalón (c1, c2, c3, c4)

El largo de cada escalón (b1, b2, b3, b4)

Representados numéricamente en la figura 104

Figura 104

Ventana de presentación de resultados de corte de escalones de la columna

Resultados de corte columna		
Escalón	Largo mm	Ancho mm
1	40.27	104.66
2	68.01	89.16
3	89.16	68.01
4	104.66	40.27

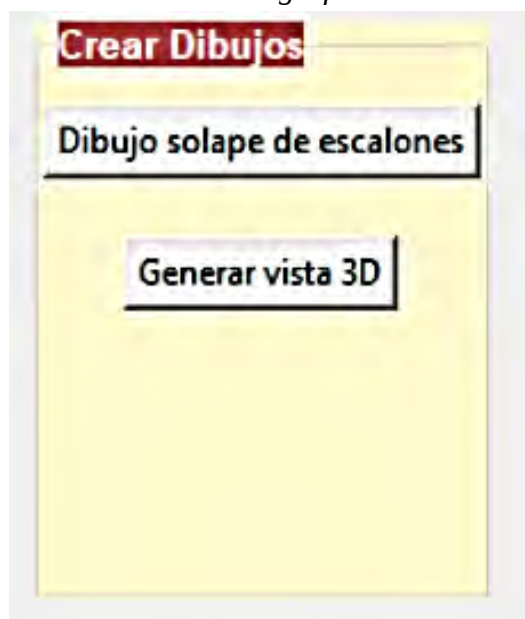
Nota. Elaboración propia y captura de gráfica a partir de la interfaz gráfica

4.2.3 La ventana crear gráficas (dibujos)

Es una parte importante de la interfaz gráfica de usuario, debido a que permite visualizar gráficamente y con dimensiones la disposición de las planchas del núcleo de cada escalón en “armado al solape”, para dicho efecto se tiene dos botones uno que genera los dibujos al solape y el otro genera una vista en 3D. como se muestra en la figura 105 y 106 (a), (b), (c) y (d).

Figura 105

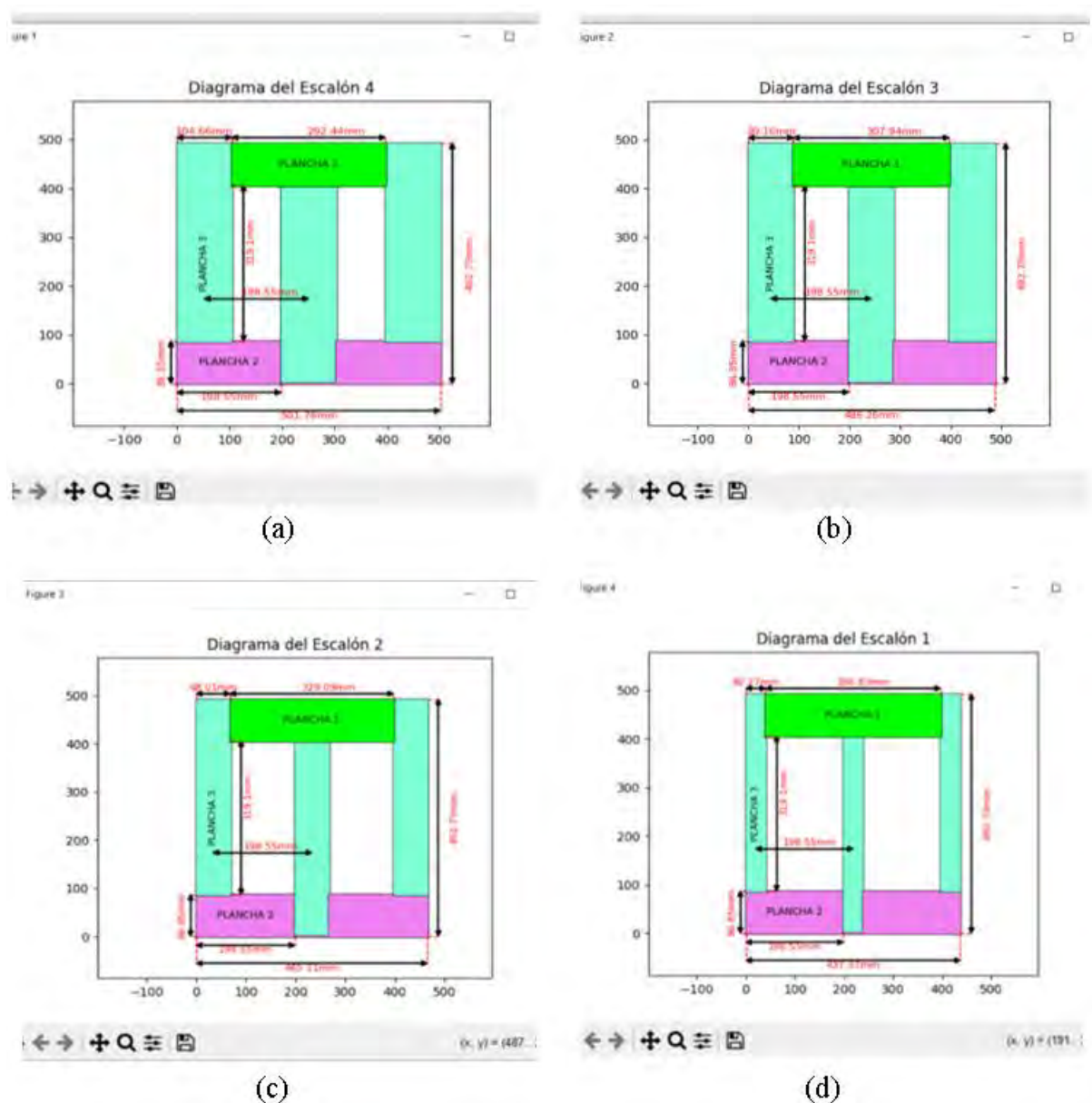
La ventana de crear gráficas de armado al solape para cada escalón



Nota. Elaboración propia a partir de la interfaz gráfica

Figura 106

Dimensiones de las láminas del núcleo para el caso de 4 escalones en armado al solape



Nota. Elaboración propia y captura de gráfica a partir de la interfaz gráfica.

Las láminas al solape forman una lámina total del núcleo y normalmente están constituidas por una plancha 1, dos planchas 2 y tres planchas 3 con diferentes dimensiones, por otra parte, será necesario realizar un cálculo que está integrado en el software para el cálculo de las dimensiones siguientes, propuestas por el Ing. José Obando en su tesis de la UNAC “Diseño de un transformador trifásico de distribución de 50kVA” (p.22-23).

Altura de la ventana H_w :

$$H_w = 120 \sqrt[4]{P} \text{ mm.}$$

Donde:

H_w = Altura de la ventana del núcleo (mm)

P = Potencia del transformador en KVA

Para el dimensionamiento de la altura del yugo:

$$h_y = 32.66 \sqrt[4]{P} \text{ mm}$$

Donde:

h_y = Altura del yugo (mm)

P = Potencia del transformador en KVA

Para el dimensionamiento de la distancia media entre columnas:

$$M = 8.651 [4.651 + 1/K_v] \sqrt[4]{P} \text{ mm}$$

Donde:

M = Distancia media entre columnas (mm)

K_v = constante es usual 0.246

P = Potencia del transformador en KVA

4.2.4 La ventana resumen de datos

Los resultados que muestra esta ventana son la aplicación del software y el correspondiente marco teórico desarrollado, entre las variables principales se encuentra el “Factor de utilización” que se constituye como la variable dependiente de la investigación y es cuantificada y presentada en la interfaz gráfica del usuario. Esta variable tiene como causas la potencia del transformador, el diámetro del círculo circunscrito del núcleo, el número de escalones determinado, el tipo de material magnético de granos orientados convencionales mejorados utilizados, el factor de apilamiento, el espesor de las láminas entre otros.

Por otra parte, la ventana resumen muestra también el volumen final del núcleo tipo columnas tanto en cm^3 como en m^3 , peso del núcleo y finalmente las pérdidas teóricas del núcleo. La ventana se evidencia en la Figura 107.

Adicionalmente, la organización de la información en esta ventana resumen permite validar de manera integral los resultados obtenidos para cada configuración analizada del núcleo escalonado. La presentación estructurada de los parámetros facilita la comparación entre distintas alternativas de diseño, especialmente en términos de eficiencia magnética y aprovechamiento del material. Asimismo, la cuantificación de las pérdidas teóricas del núcleo constituye un indicador relevante para evaluar el desempeño energético del transformador en condiciones ideales de operación. La inclusión del volumen y peso del núcleo aporta criterios adicionales para el análisis económico y constructivo del diseño propuesto.

Figura 107

Ventana de resumen de datos del núcleo caso de cuatro escalones del acero M 110-23S



Nota. Elaboración propia y captura de gráfica a partir de la interfaz gráfica.

La ventana resumen de datos tiene un botón de opción “ver resultados” que permite visualizar en un cuadro resumen las dimensiones de la plancha 1,2 y 3 de cada escalón, así como el número de láminas el peso especificado y las correspondientes pérdidas como se muestra en la Figura 108

Figura 108

Cuadro de dimensiones, volumen, peso y pérdidas por láminas y escalones

Resultados						
Plancha 1						
Escalon	Ancho (mm)	Largo (mm)	N.chapas	Volumen cm3	Peso(Kgr.)	Perdidas (W)
1.0	86.85	292.45	165.0	1020.0	7.8	11.31
2.0	86.85	307.94	114.0	742.06	5.68	8.23
3.0	86.85	329.1	87.0	605.22	4.63	6.71
4.0	86.85	356.83	64.0	482.73	3.69	5.35
Plancha 2						
Escalon	Ancho (mm)	Largo (mm)	N.chapas	Volumen cm3	Peso (Kgr.)	Perdidas (W)
1.0	86.85	198.55	330.0	692.5	5.3	7.68
2.0	86.85	198.55	228.0	478.45	3.66	5.31
3.0	86.85	198.55	174.0	365.14	2.79	4.05
4.0	86.85	198.55	128.0	268.61	2.05	2.98
Plancha 3						
Escalon	Ancho (mm)	Largo (mm)	N.chapas	Volumen cm3	Peso (Kgr.)	Perdidas (W)
1.0	104.66	405.95	495.0	1706.21	13.05	18.93
2.0	89.16	405.95	342.0	1004.25	7.68	11.14
3.0	68.01	405.95	261.0	584.6	4.47	6.48
4.0	40.27	405.95	192.0	254.64	1.95	2.82

Nota. Elaboración propia y captura de gráfica de la interfaz gráfica.

RESUMEN DEL CAPÍTULO IV

El Capítulo IV describe el desarrollo de la **interfaz gráfica de usuario (GUI)** implementada en Matlab para automatizar el dimensionamiento angular óptimo y el cálculo del factor de utilización del núcleo escalonado. Este capítulo integra los aspectos teóricos, matemáticos y computacionales previamente desarrollados, convirtiéndolos en una herramienta práctica que permite realizar cálculos complejos de manera rápida, precisa y accesible para el usuario.

En la sección de generalidades se explica la motivación y funcionalidad de la GUI, destacándose su importancia para reducir tiempos de cálculo, evitar errores manuales y facilitar la toma de decisiones en el diseño de transformadores de distribución. La interfaz fue diseñada siguiendo criterios de ergonomía, claridad y organización modular.

La estructura de la GUI se divide en cuatro ventanas principales:

1. Ventana de entrada de datos.

Permite al usuario ingresar los parámetros iniciales: potencia nominal, tipo de material magnético, espesor de lámina, número de escalones, diámetro del núcleo, factor de apilamiento y otros datos geométricos. Matlab procesa automáticamente las ecuaciones de cálculo angular y construye el modelo escalonado correspondiente.

2. Ventana de resultados de corte de columna

Muestra los ángulos óptimos obtenidos (α , β , γ , ...), las dimensiones de cada escalón (b y c), las áreas geométrica y neta del núcleo, así como el factor de utilización resultante. Incluye gráficas del corte transversal del núcleo con la ubicación precisa de cada escalón.

3. Ventana de creación de gráficas

Genera representaciones visuales del núcleo escalonado, comparaciones entre diferentes materiales, curvas de sección neta vs. número de escalones, y gráficos específicos útiles para el análisis del dimensionamiento angular. Esta ventana permite una visualización intuitiva del comportamiento geométrico del núcleo.

4. Ventana de resumen de datos.

Presenta un informe final con todos los resultados numéricos: dimensiones, volumen, peso del núcleo, pérdidas por lámina, y características completas del material magnético seleccionado. Esta información puede ser exportada, permitiendo su uso en procesos de diseño, informes técnicos o documentación académica.

El capítulo concluye resaltando que la GUI constituye una herramienta de alto valor tecnológico, pues convierte un proceso altamente complejo en un sistema automatizado, preciso y replicable. Su implementación contribuye directamente a mejorar la eficiencia del diseño del núcleo escalonado y facilita la validación de los resultados.

CAPÍTULO V

COMPROBACIÓN DE HIPÓTESIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Generalidades

Este capítulo tiene como finalidad presentar y analizar los resultados obtenidos a partir del desarrollo de la investigación titulada: “Dimensionamiento angular óptimo y determinación del factor de utilización del núcleo escalonado del transformador de distribución, con asistencia del Matlab”. La estructura del capítulo se centra en la comprobación de la hipótesis planteada, así como en la interpretación crítica de los resultados generados a través del modelado gráfico y computacional del dimensionamiento angular y el factor de utilización para un núcleo de 1 a 10 escalones.

El problema de investigación formulado fue: ¿De qué manera el dimensionamiento angular óptimo incide en la determinación del factor de utilización del núcleo escalonado del transformador de distribución, con asistencia del Matlab?, y el objetivo general consistió en analizar el dimensionamiento angular óptimo y determinar el factor de utilización del núcleo escalonado del transformador de distribución, con asistencia del Matlab. Asimismo, se planteó la siguiente hipótesis de trabajo:

"El dimensionamiento angular óptimo permite maximizar la utilización del material magnético y lograr mayor precisión en los valores del factor de utilización del núcleo escalonado del transformador de distribución, con asistencia del Matlab". En este contexto, el capítulo presenta los resultados obtenidos a partir de la implementación de diferentes escenarios de dimensionamiento angular, la generación de geometrías escalonadas del núcleo, y los cálculos automatizados del área neta, factor de hierro y factor de utilización mediante algoritmos programados en Matlab. Estos resultados fueron contrastados con los valores esperados teóricamente y discutidos desde una perspectiva técnica y científica.

Finalmente, se reflexionó sobre el grado de correspondencia entre los resultados obtenidos y la hipótesis planteada, validando o rechazando está en función de los hallazgos cuantitativos y cualitativos del estudio, lo cual permitirá establecer conclusiones sólidas y recomendaciones pertinentes para futuras investigaciones y aplicaciones en ingeniería.

5.2 Comprobación de la hipótesis general

La hipótesis general, se formuló de la manera siguiente:

“El dimensionamiento angular óptimo permite maximizar la utilización del material magnético y lograr mayor precisión en los valores del factor de utilización del núcleo escalonado del transformador de distribución, con asistencia del MATLAB”.

5.2.1 El dimensionamiento angular óptimo

Para comprobar esta hipótesis, se diseñaron núcleos escalonados con diferente número de escalones (de 1 a 10), aplicando un algoritmo de optimización geométrica en MATLAB, el cual determinó los ángulos óptimos de cada sección escalonada. Los resultados se muestran en la tabla 46, donde se tienen los ángulos óptimos para cada sección de escalonamiento.

Tabla 46

Dimensionamiento Angular óptima para 10 escalones del núcleo

Nº	1 ESCALÓN	2 ESCALÓN	3 ESCALÓN	4 ESCALÓN	5 ESCALÓN	6 ESCALÓN	7 ESCALÓN	8 ESCALÓN	9 ESCALÓN	10 ESCALÓN
α	45	31.7175	25.0896	21.0457	18.2903	16.2765	14.7314	13.503	12.4994	11.6618
β		58.2825	45	37.3338	32.2478	28.5874	25.8066	23.6108	21.8257	20.3413
γ			64.9104	52.6662	45	39.64	35.6373	32.5121	29.9914	27.9073
δ				68.9543	57.7522	50.36	45	40.8883	37.6106	34.9232
ε					71.7097	61.4126	54.3627	49.1117	45	41.6685
ζ						73.7235	64.1934	76.497	52.3894	48.3315
η							75.2686	66.3892	60.0086	55.0768
θ								76.497	68.1743	62.0927
ι									77.5006	69.6587
κ										78.3382

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

A partir del dimensionamiento angular óptimo, se determinaron las dimensiones de los escalones correspondientes del (b1, b2, b3, b4, b5, b6, b7, b8, b9, b10...c1, c2, c3, c4, c5, c6, c7, c8, c9, c10) para cada escalón en función del diámetro D del círculo circunscrito y los ángulos óptimos $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta, \eta, \theta, \iota$ y k .

5.2.2 Maximización de la utilización del material magnético y la sección neta S_n .

Luego del cálculo de las dimensiones del núcleo y con el apoyo del software Matlab se determinó el área geométrico (S_g) o físico del núcleo, posteriormente se multiplicó con el factor de apilamiento de cada material (f_a) para determinar la sección neta (S_n) considerando para cada tipo de material de acero de grano orientado convencional que son 14 tipos normalizados y acero de grano orientado convencional mejorados que son en número de 4 tipos, el mismo que está considerado en la “interfaz gráfica del usuario para el dimensionamiento angular y el factor de utilización del núcleo escalonado”. La tabla 47 muestra los datos del número de escalones y la sección neta del núcleo S_n , la misma que está en función del diámetro (D) y considera en este análisis el número de 10 escalones y un tipo de material magnético de granos orientados convencional mejorado M 105-23 S.

De este modo, el procedimiento descrito asegura una determinación coherente entre la geometría física del núcleo y su comportamiento magnético efectivo. La consideración del factor de apilamiento específico para cada material permite reflejar de manera más realista las condiciones constructivas del núcleo laminado. Asimismo, la evaluación de distintos tipos normalizados de acero facilita la comparación del desempeño magnético según las características propias de cada material. La selección del acero M 105-23 S responde a su aplicación frecuente en transformadores de distribución.

Tabla 47

Sección neta del núcleo para cada escalón y factor de apilamiento para el material M 105-23 S.

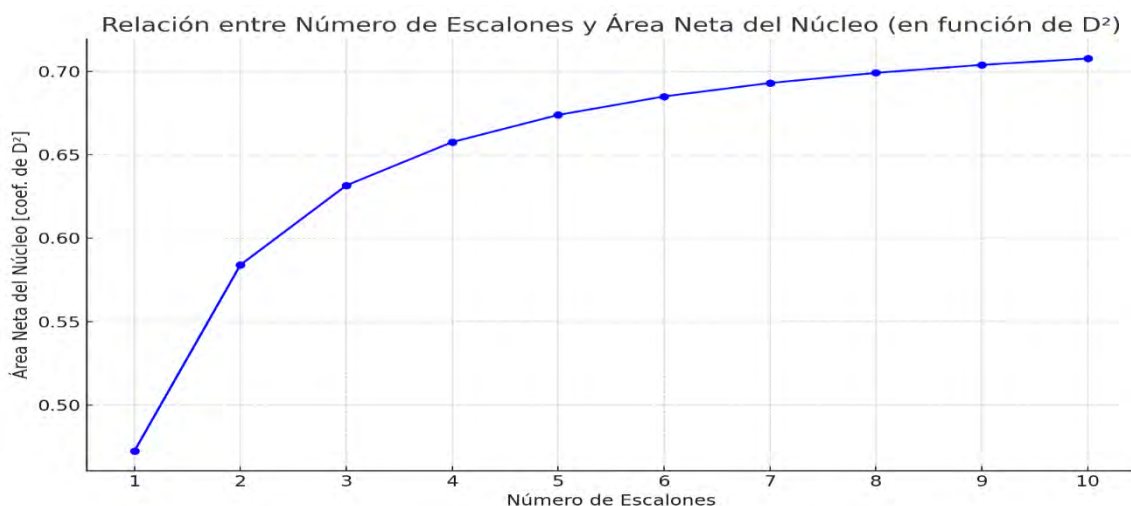
ESCALÓN	fa	Sn
1	0.945	$0.4725 \cdot D^2$
2	0.945	$0.5840 \cdot D^2$
3	0.945	$0.631614 \cdot D^2$
4	0.945	$0.657588 \cdot D^2$
5	0.945	$0.673843 \cdot D^2$
6	0.945	$0.684935 \cdot D^2$
7	0.945	$0.69297 \cdot D^2$
8	0.945	$0.69905 \cdot D^2$
9	0.945	$0.703848 \cdot D^2$
10	0.945	$0.707631 \cdot D^2$

Nota. Elaboración propia a partir de datos de la interfaz gráfica.

Con la finalidad de mostrar gráficamente la relación del dimensionamiento angular óptimo expresado en los escalones y por otra parte la sección neta Sn del núcleo se tiene la figura 109 siguiente:

Figura 109

Relación gráfica entre los escalones dimensionados óptimos y la sección neta del núcleo



Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

La gráfica muestra cómo varía el área neta (Sn) del núcleo en función de D^2 , a medida que se incrementa el número de escalones se incrementa la sección neta, pero con tendencia asintótica. En general se tiene las características siguientes:

- Tendencia creciente con disminución de pendiente

Se observa una curva creciente, lo cual significa que al aumentar el número de escalones en un círculo circunscrito de diámetro D , el área neta S_n del núcleo también se incrementa. Pero la tendencia de mayor crecimiento es notoria en los primeros escalones del 1 al 5 mientras que a partir del escalón 6 los incrementos del área neta son cada vez más pequeños.

b) Justificación geométrica y técnica

El área neta del núcleo S_n se aproxima cada vez más al área de un círculo ideal conforme se aumenta el número de escalones, ya que un mayor número de escalones permite una mejor aproximación al contorno curvo del núcleo circular circunscrito. Matemáticamente, esto representa una mayor eficiencia en la utilización del espacio dentro del círculo circunscrito de diámetro D .

c) Aplicación práctica en el diseño

Desde el punto de vista del diseño eléctrico, esta gráfica ayuda a balancear costos de fabricación vs eficiencia magnética:

- Un mayor número de escalones mejora el aprovechamiento del material magnético y reduce la reluctancia del núcleo.
- Sin embargo, también aumenta la complejidad de fabricación y ensamblaje, por lo que suele optarse por un número intermedio (*como 5 a 7 escalones*) que brinde un buen compromiso entre rendimiento y costos.

d) Análisis del límite asintótico del área neta del núcleo escalonado

En el diseño de transformadores de distribución, el núcleo escalonado se utiliza para aproximarse a la forma circular ideal del núcleo magnético, optimizando el uso del material ferromagnético y maximizando sus dimensiones. A medida que se incrementa el número de escalones, la geometría del núcleo mejora su correspondencia con el contorno circular, y en consecuencia, el área neta del núcleo también aumenta.

La relación entre el número de escalones y el área neta S_n en función del cuadrado del diámetro circunscrito (D^2) muestra una tendencia creciente que se estabiliza cerca de un límite superior. Este comportamiento se representa en la figura F1.

Se observa que, a partir del *sexto o séptimo escalón*, los incrementos en el área neta se vuelven marginales. Esto indica la existencia de un límite asintótico geométrico, el cual se aproxima al valor de:

$$A_{nucleo} \approx 0.7071 * D^2$$

Este valor representa una aproximación empírica que surge del análisis geométrico y práctico del diseño escalonado. Aunque el área máxima de un círculo circunscrito es:

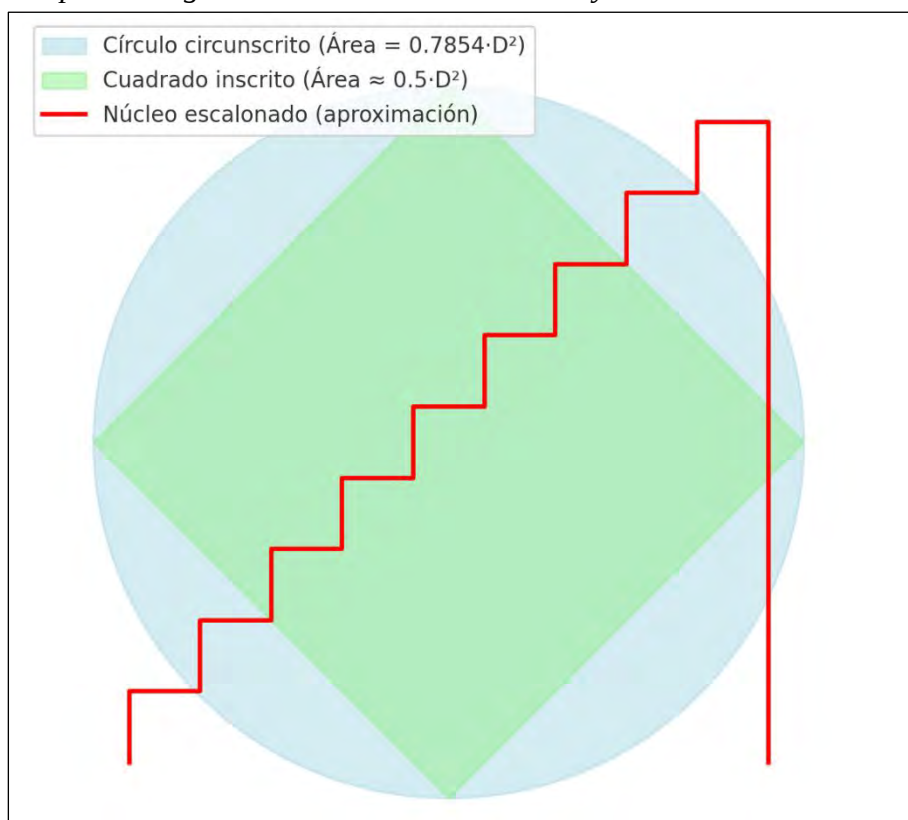
$$\frac{\pi}{4} * D^2 \approx 0.7858 * D^2$$

Los escalones no logran cubrir completamente dicho contorno. Sin embargo, a medida que se incrementan los niveles de escalonamiento, el área neta se aproxima al límite antes mencionado. Para ilustrar esta idea, se presenta una figura comparativa.

Para ilustrar esta idea, se presenta una figura 110 comparativa:

Figura 110

Comparación geométrica: núcleo escalonado y círculo circunscrito



Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

En la figura 110 se puede observar lo siguiente:

- Área del círculo circunscrito (círculo celeste)

$$\text{Área} \approx \frac{\pi}{4} * D^2 \approx 0.7858 * D^2$$

Esta área representa el límite superior teórico del área magnética que puede contener el núcleo, si este fuera completamente circular.

- Área del cuadrado inscrito (cuadrado verde)

$$\text{Área} \approx 0.5 * D^2$$

Esta área representa una forma más simple que se inscribe dentro del círculo, y cuyo aprovechamiento de área es el menor es decir de 1 escalón.

- Área del núcleo escalonado (escalones rojos)

Muestra una aproximación por pasos a la forma circular. A medida que se agregan más escalones, el contorno se acerca más al círculo y por lo tanto la eficiencia del uso del material también mejora hasta acercarse a un valor límite cercano a $0.7071 \cdot D^2$ sin superarlo para 10 escalones, el mismo que depende del incremento de escalones, el factor de apilamiento y en general del tipo de material magnético utilizado en la manufactura del núcleo.

Esta figura fundamenta visualmente cómo los escalones permiten aumentar el área neta del núcleo, pero con beneficios cada vez menores, lo que explica por qué se habla de un “límite asintótico geométrico” en el diseño de transformadores.

Este análisis permite concluir que, si bien es posible seguir agregando escalones, a partir de cierto punto los beneficios en términos de incremento del área neta se reducen considerablemente. Por ello, en la práctica, el diseño de núcleos suele optar por 5 a 7 escalones, logrando un equilibrio entre eficiencia magnética, económica y viabilidad de fabricación.

5.2.3 El número de escalones y los factores de utilización f_u del núcleo escalonado

El número de escalones guarda una relación directa con las dimensiones geométricas del núcleo escalonado, toda vez que el dimensionamiento angular óptimo determina los ángulos característicos de cada escalón ($\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta, \eta, \theta, \iota$ y k), así como sus respectivas proporciones o área geométrica A_g , incluyendo la sección neta del núcleo S_n , la cual se obtiene considerando el factor de apilamiento f_a del material magnético seleccionado.

Como se expuso en el Capítulo III, el factor de utilización f_u se define como el cociente entre la sección neta del núcleo S_n y la sección del círculo circunscrito que lo contiene S_{circ} .

En este sentido, existe una correspondencia funcional entre los parámetros derivados del dimensionamiento angular óptimo ($\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta, \eta, \theta, \iota$ y k) y el valor del factor de utilización f_u . Esta relación se ve reflejada, además, en la influencia que ejerce el número de escalones sobre el aprovechamiento efectivo del área útil del núcleo magnético.

La tabla 48 explicita la relación entre el número de escalones y el factor de utilización, además incluye el peso obtenido para un tipo de material magnético para los diez escalones previstos.

Tabla 48

Relación entre el número de escalones, el factor de utilización y el peso

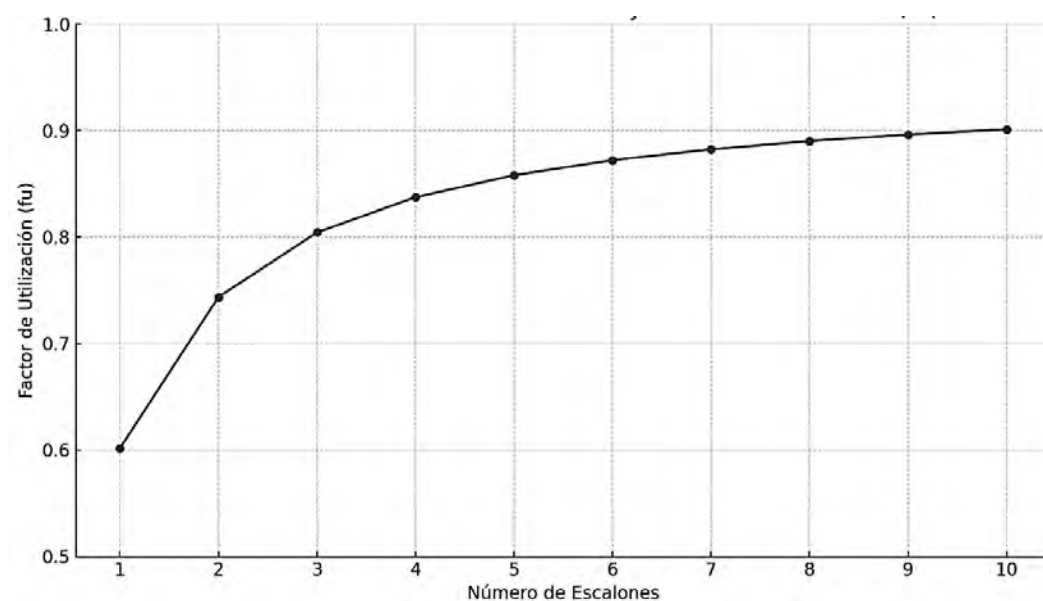
N.º de Escalones	Factor de Utilización (<i>fu</i>)	Peso (kg)
1	0.6016	46.76
2	0.7436	56.73
3	0.8042	60.53
4	0.8373	62.76
5	0.8580	64.1
6	0.8721	64.79
7	0.8823	65.33
8	0.8901	66
9	0.8961	66.37
10	0.9010	66.41

Nota. Elaboración propia a partir de datos de la interfaz gráfica.

La Figura 111 presenta de forma gráfica esta correlación, mostrando cómo el incremento progresivo del número de escalones contribuye a mejorar el factor de utilización *fu*, aunque con ganancias decrecientes a partir de cierto umbral. Este comportamiento justifica la elección óptima de un número limitado de escalones, a fin de lograr un equilibrio entre eficiencia geomagnética y viabilidad constructiva.

Figura 111

*Relación entre el número de escalones y el factor de utilización *fu**



Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

La interpretación de la relación entre el número de escalones y el factor de utilización f_u , y consecuentemente de la hipótesis formulada es:

a) Tendencia creciente

La gráfica muestra que el factor de utilización f_u aumenta con el número de escalones. Esto indica que, al incrementar el número de escalones del núcleo, se mejora el aprovechamiento del material magnético disponible dentro del área circunscrita.

- Con 1 escalón, $f_u=0.6016$: muy bajo aprovechamiento.
- Con 5 escalones, $f_u=0.8580$: mejora significativa.
- Con 10 escalones, $f_u=0.9010$: se aproxima al límite geométrico.

b) Comportamiento asintótico

A partir de 6 a 10 escalones, la pendiente de crecimiento se reduce, lo que implica que los beneficios marginales de agregar más escalones disminuyen. Este comportamiento es típico de sistemas con limitación geométrica: existe un límite asintótico para el factor de utilización f_u , que en este caso se acerca a 1 (o más precisamente, al área del círculo ideal en relación al escalonamiento que lo contiene).

c) Implicaciones técnicas

El factor de utilización está directamente vinculado a la eficiencia del diseño del núcleo:

- Mayor factor de utilización significa mejor uso del espacio y menor material desperdiciado.
- Sin embargo, más escalones implican mayor complejidad de fabricación e incremento de costo.

d) Decisión de diseño óptimo

Desde un punto de vista científico y técnico, se recomienda seleccionar un número de escalones que proporcione un valor de factor de utilización f_u alto sin entrar en la zona de rendimientos decrecientes.

En este caso:

- El número de 5 a 7 escalones representan un excelente compromiso entre eficiencia y practicidad de manufactura.

5.2.4 El número de escalones y los factores de utilización f_u para dos tipos de material de hierro de grano orientado convencional mejorado

En la fabricación de núcleos para transformadores de distribución se emplea una amplia variedad de materiales magnéticos, los cuales se encuentran debidamente normalizados conforme a estándares internacionales. En particular, la Norma Europea EN 10107 contempla

múltiples clases de acero magnético, específicamente diseñadas para aplicaciones eléctricas. De acuerdo con esta normativa y con las especificaciones técnicas proporcionadas por los fabricantes, se identifican catorce tipos de acero eléctrico de grano orientado convencional (CGO), así como cuatro variantes mejoradas clasificadas como acero eléctrico de grano orientado convencional mejorado (CGOM).

Para los fines del presente estudio, centrado en el análisis del dimensionamiento angular óptimo y la evaluación del factor de utilización, se ha considerado una muestra representativa compuesta por dos tipos de materiales magnéticos con características contrastantes. El primero es el acero M 105-23 S, el cual presenta un factor de apilamiento de 0.945 y un espesor de lámina de 0.23 mm. El segundo corresponde al acero M 125-35 S, con un factor de apilamiento superior de 0.960 y un espesor de lámina de 0.35 mm.

La selección de estos dos materiales obedece tanto a su disponibilidad industrial como a su frecuente aplicación en transformadores de distribución de potencia media. Los resultados obtenidos para cada caso, en función del número de escalones del núcleo, se detallan en la tabla 49, donde se presenta el comportamiento del factor de utilización en relación con la geometría escalonada y las propiedades específicas del material.

Tabla 49

Relación entre número de escalones y factor de utilización para dos tipos de materiales magnéticos

ESCALÓN	CLASE DE MATERIAL	
	M 105-23 S	M 125 - 35 S
	Factor de utilización fu	Factor de utilización fu
1	0.6016	0.6112
2	0.7436	0.7554
3	0.8042	0.817
4	0.8373	0.8506
5	0.858	0.8716
6	0.8721	0.8859
7	0.8823	0.8963
8	0.8901	0.9042
9	0.8961	0.9103
10	0.901	0.9153
Potencia	50 kVA	50 kVA
Apilamiento	fa = 0.945	fa = 0.960

Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

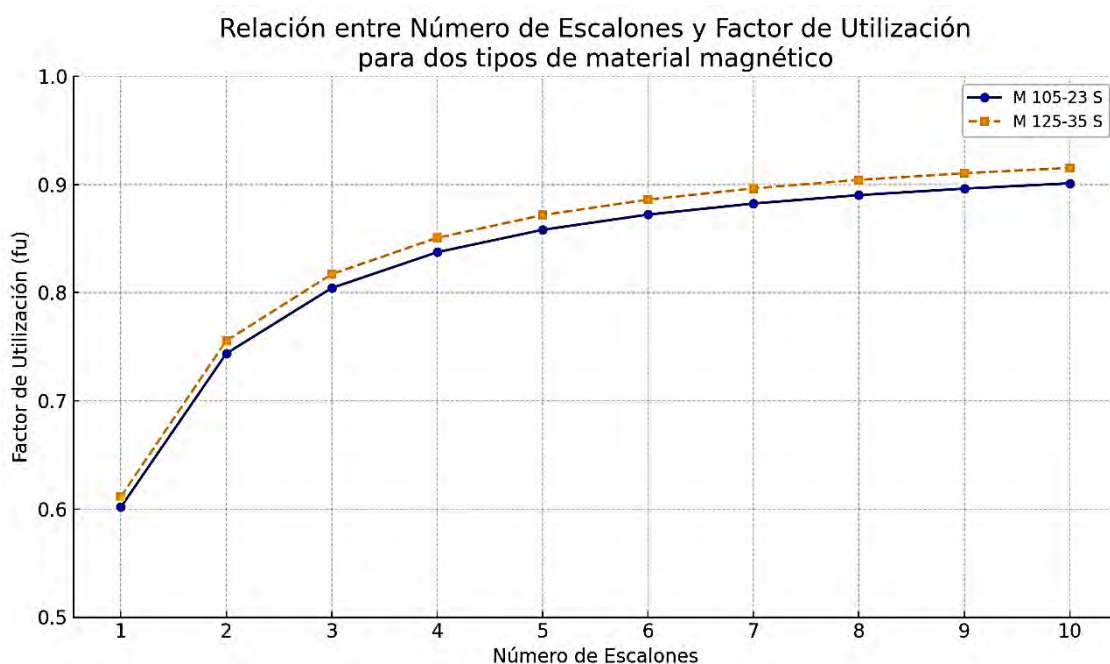
Los datos mostrados en la tabla fueron calculados mediante el uso de Matlab, como puede apreciarse se muestran hasta cuatro decimales, sin embargo, podría utilizarse mayor

precisión lo que demuestra el nivel de exactitud comparado con los métodos manuales o clásicos utilizados.

Los datos expuestos son graficados para una mejor comprensión en la figura 112

Figura 112

Relación entre número de escalones y factor de utilización para dos tipos de materiales magnéticos



Nota. Elaboración propia a partir de datos del software MATLAB (2025)

La interpretación de la relación entre el número de escalones y el factor de utilización f_u , para dos tipos de materiales de acero eléctrico de grano orientado convencional mejorado y consecuentemente de la hipótesis formulada “El incremento del número de escalones en el núcleo del transformador de distribución influye en el factor de utilización f_u del núcleo escalonado considerando los factores de apilamiento, espesor de láminas y tipo de material magnético utilizado” se resume en el análisis comparativo del factor de utilización en función del número de escalones para dos materiales magnéticos

La Figura presentada muestra la evolución del factor de utilización f_u respecto al número de escalones para dos tipos de materiales magnéticos seleccionados y comúnmente empleados en el diseño de transformadores:

- M 105-23 S (representado por la curva azul)
- M 125-35 S (representado por la curva naranja)

Ambas curvas evidencian una tendencia creciente del factor de utilización a medida que se incrementa el número de escalones, debido a una mayor aproximación geométrica del núcleo escalonado a la forma circular ideal. Sin embargo, se observa sistemáticamente que la curva correspondiente al material M 125-35 S se encuentra por encima de la curva azul, indicando una mayor eficiencia geométrica para el mismo número de escalones.

Esta diferencia, aunque ligera pero constante, se explica por dos factores principales de naturaleza técnica y material:

a) Espesor de la lámina magnética

- M 105-23 S posee un espesor de 0.23 mm
- M 125-35 S tiene un espesor de 0.35 mm

El mayor espesor de la lámina en el material M 125-35 S permite una conformación más robusta del escalón, disminuyendo espacios vacíos entre láminas durante el armado del núcleo, lo que favorece una mayor ocupación efectiva del área útil del núcleo.

b) Factor de apilamiento f_a

- Para M 105-23 S, el factor de apilamiento es 0.945
- Para M 125-35 S, el factor de apilamiento es 0.960

El factor de apilamiento representa la fracción del volumen total del núcleo ocupado efectivamente por material ferromagnético. Un valor mayor implica menor cantidad de aire o espacio muerto entre láminas. Así, el material M 125-35 S, con un factor de apilamiento más alto, logra una sección neta más eficiente dentro de la misma área geométrica del núcleo escalonado.

Conclusión: Desde una perspectiva científica, se puede afirmar que la mayor eficiencia geomagnética del material M 125-35 S -reflejada en su mayor factor de utilización fu para cada número de escalones- está directamente relacionada con su espesor de lámina y mayor factor de apilamiento f_a . Estos parámetros influyen en la densidad de empaquetamiento del núcleo, lo que a su vez mejora la utilización efectiva del área definida por el círculo circunscrito. Este análisis confirma que, si bien ambos materiales permiten una aproximación funcional al núcleo circular ideal, el tipo de material influye significativamente en el diseño final, particularmente en términos de rendimiento magnético y eficiencia de construcción.

5.3 Análisis comparativo del factor de utilización entre los materiales magnéticos

La comparación realizada revela que el material M 125-35 S ofrece un factor de utilización (f_u) ligeramente superior en todos los niveles de escalonamiento del núcleo respecto al M 105-23 S. Esto se debe principalmente a los siguientes aspectos fundamentales:

a) Mayor factor de apilamiento

El material M 125-35 S posee un factor de apilamiento de 0.960, que es superior al 0.945 del M 105-23 S. Esto implica que, al ensamblar las láminas del núcleo, una mayor proporción del volumen está ocupada efectivamente por material magnético, reduciendo la presencia de espacios vacíos (aire) o aislantes entre capas.

Este aspecto mejora la densidad magnética del núcleo y permite alcanzar una sección neta mayor, optimizando así el aprovechamiento del material.

b) Reducción de complejidad geométrica

Con M 125-35 S se logra un nivel superior de utilización sin necesidad de aumentar considerablemente el número de escalones. Por ejemplo, con solo 5 escalones ya se alcanza un fu de 0.8716 (frente a 0.858 con M 105-23 S). Esto representa un beneficio en términos de fabricabilidad, ya que una menor cantidad de escalones reduce los cortes, alineamientos y ajustes necesarios durante el armado del núcleo, lo cual se traduce en menores tiempos de producción y costos de mano de obra.

c) Desempeño magnético en carga

El material M 125-35 S, al tener mayor espesor (0.35 mm frente a 0.23 mm), puede presentar ligeramente mayores pérdidas por corrientes parásitas en alta frecuencia. No obstante, en aplicaciones de transformadores de distribución (como el caso de 50 kVA), operando a frecuencia nominal de 60 Hz, este efecto no es significativo frente a las ventajas que ofrece en apilamiento y eficiencia geométrica.

Si se desea conocer cuál será el material más recomendable se considera que en términos de factor de utilización, eficiencia constructiva y rendimiento en carga nominal, el material M 125-35 S resulta más recomendable para el diseño de núcleos escalonados en transformadores de distribución de media potencia (como el caso de 50 kVA). Su mayor factor de apilamiento y su capacidad de alcanzar altos valores de utilización con menor cantidad de escalones lo convierten en una opción técnicamente más eficiente y económicamente más viable.

No obstante, si se prioriza la reducción de pérdidas magnéticas a muy baja escala (como en transformadores de alta eficiencia energética o en régimen continuo de trabajo), el uso del material M 105-23 S podría considerarse, siempre que se justifique por requisitos normativos o especificaciones de cliente.

RESUMEN DEL CAPÍTULO V

El Capítulo V desarrolla la comprobación de la hipótesis general y específicas mediante el análisis detallado de los resultados obtenidos en Matlab, evaluando la relación entre el dimensionamiento angular óptimo, los factores de utilización del núcleo escalonado y el comportamiento de distintos materiales magnéticos. Este capítulo constituye la validación empírica del modelo teórico presentado en capítulos previos.

En las **generalidades**, se establece el marco metodológico para contrastar la hipótesis, describiendo los criterios geométricos, matemáticos y computacionales empleados. Se enfatiza que la comprobación se sustenta en la comparación entre los valores obtenidos por simulación y los valores teóricos esperados, observando el comportamiento del factor de utilización conforme varía el número de escalones del núcleo.

La comprobación inicia con el análisis del **dimensionamiento angular óptimo**, demostrando que los ángulos calculados permiten aproximar de mejor forma el núcleo escalonado al círculo circunscrito. Los resultados evidencian que el método aplicado maximiza el área efectiva aprovechable, lo cual confirma la primera condición planteada en la hipótesis general.

Posteriormente, se analiza la **maximización del uso del material magnético y la sección neta S_n** , concluyéndose que la geometría optimizada incrementa la sección efectiva y reduce las pérdidas por saturación y desperdicio de lámina. Las simulaciones muestran que a medida que se mejora la distribución angular, la sección neta se incrementa hasta alcanzar valores asintóticos, lo que valida la segunda parte de la hipótesis.

El capítulo continúa con el estudio del **comportamiento del factor de utilización (f_u) en función del número de escalones**. Se observa que f_u aumenta significativamente entre 1 y 5 escalones, con incrementos decrecientes entre los escalones 6 y 8, hasta estabilizarse en comportamientos asintóticos. Este resultado demuestra que existe un punto de equilibrio entre precisión geométrica y eficiencia material, confirmando que el número óptimo de escalones no debe ser excesivo para evitar beneficios marginales.

Seguidamente, se contrasta la variación del factor de utilización para **dos materiales de acero al silicio de grano orientado convencional mejorado (CGO)**, manteniendo las mismas condiciones geométricas de escalonamiento. Los resultados muestran diferencias pequeñas pero significativas en el valor de f_u , debido principalmente al factor de apilamiento, espesor de lámina y densidad de flujo admisible de cada material.

Finalmente, se presenta un **análisis comparativo del factor de utilización entre ambos materiales**, encontrándose que el material con menor espesor y mejor factor de apilamiento ofrece valores ligeramente superiores de f_u para cualquier número de escalones. Sin embargo,

la tendencia general se mantiene: el beneficio incremental disminuye conforme aumentan los escalones. Este comportamiento reafirma que el modelo geométrico es robusto y que el efecto del material es aditivo pero no determinante en la tendencia global.

En conjunto, este capítulo confirma que el **dimensionamiento angular óptimo influye directamente y de manera significativa en la determinación del factor de utilización del núcleo escalonado**, validando plenamente la hipótesis general de la investigación.

CONCLUSIONES

Primera. El análisis de los resultados demuestra que el dimensionamiento angular óptimo incide directamente en la eficiencia geométrica del núcleo escalonado, permitiendo una mejor aproximación a la forma circular ideal. A través del modelado y dimensionamiento angular óptimo de $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \zeta, \eta, \theta, \iota$ y k en Matlab, se demostró que a medida que se incrementa el número de escalones, se genera un área geométrica (Sg) de diseño más eficiente en términos del aprovechamiento del área circunscrita, lo que se refleja en un mayor valor de la sección neta (Sn) del núcleo.

Del mismo modo, mediante el uso de la programación Matlab se verifica que el factor de utilización del núcleo (fu) aumenta progresivamente con el incremento del número de escalones, confirmando una tendencia creciente con comportamiento asintótico. Los resultados mostraron que, para un núcleo de 1 a 10 escalones, el factor de utilización crece desde 0.6016 hasta 0.9010, acercándose al límite geométrico teórico sin llegar a superarlo. Sin embargo, el crecimiento se desacelera significativamente a partir del sexto escalón, lo cual evidencia la existencia de rendimientos decrecientes.

Así mismo, se evidencia que el número óptimo de escalones para un diseño eficiente se encuentra entre 5 y 7, ya que este rango ofrece un equilibrio adecuado entre aprovechamiento del área magnética, reducción de espacios vacíos y viabilidad constructiva. Si bien es posible seguir incrementando escalones, los beneficios en el factor de utilización son marginales y no justifican el aumento en la complejidad de fabricación para núcleos de transformadores de distribución.

Segunda. La aplicación del lenguaje de programación Matlab, demuestra que el tipo de material magnético utilizado en la manufactura del núcleo influye significativamente en el valor del factor de utilización (fu), siendo el acero M 125-35 S más eficiente y ofrece valores superiores del factor de utilización que el M 105-23 S, esto se debe a su mayor espesor de lámina y su factor de apilamiento (0.960 vs. 0.945), los cuales permiten una mayor ocupación efectiva del área útil del núcleo optimizando el rendimiento magnético y constructivo del transformador.

Tercera. La herramienta desarrollada en MATLAB representa una contribución técnica relevante para el diseño computacional de núcleos escalonados, al permitir el cálculo automatizado de ángulos óptimos, secciones netas y factores de utilización con alta

precisión. Este entorno computacional constituye una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en el campo del diseño electromagnético.

Para validar el uso de la herramientas computacionales como MATLAB se desarrolló una interfaz gráfica del usuario (GUI) en el entorno Python con la finalidad de permitir al usuario ingresar los datos y parámetros de diseño del núcleo del transformador y luego visualizar los resultados en tiempo real de los datos solicitados para su dimensionamiento y además la generación de gráficos escalonados del núcleo con representaciones geométricas interactivas y reportes resumidos de los resultados obtenidos, lo que significa un aporte en la producción de tecnología propia de la Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica.

RECOMENDACIONES

Primera. Adoptar el dimensionamiento angular óptimo en el diseño de transformadores de distribución, utilizando herramientas computacionales como MATLAB, ya que esto permite maximizar el aprovechamiento del material magnético y mejorar la eficiencia geométrica del núcleo.

Segunda. Para transformadores de distribución (15 kVA hasta 630 kVA) se recomienda utilizar entre 2 y 8 escalones en el diseño del núcleo escalonado, pues este rango proporciona un equilibrio ideal entre eficiencia magnética y factibilidad de manufactura. Escalonamientos mayores presentan beneficios marginales que no compensan el aumento en complejidad y costo de producción.

Tercera. Seleccionar materiales magnéticos con alto factor de apilamiento y espesor adecuado, como el acero M 125-35 S, para lograr un mayor factor de utilización μ . Este tipo de materiales permite alcanzar altos niveles de eficiencia con menor cantidad de escalones, reduciendo así los costos de fabricación y el tiempo de ensamblaje.

Cuarta. Desarrollar e implementar herramientas gráficas interactivas en MATLAB u otros lenguajes de ingeniería, que faciliten la visualización del diseño del núcleo y el análisis de sus variables geométricas. Estas herramientas son de gran utilidad para ingenieros en formación y profesionales en diseño eléctrico.

Quinta. Realizar estudios complementarios que integren la evaluación térmica y electromagnética del núcleo escalonado optimizado, considerando distintos regímenes de carga y condiciones operativas. Esto permitirá validar los beneficios del diseño también desde el punto de vista del rendimiento energético y la durabilidad del transformador.

Sexta. Ampliar el uso de herramientas computacionales como MATLAB para el análisis de los devanados y aislamientos del transformador de distribución como un aporte al desarrollo de tecnología propia en la Escuela Profesional de Ingeniería Eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA

- ArcelorMittal. (2024). *Página oficial de ArcelorMittal*. <https://corporate.arcelormittal.com/>
- Castro, J., Rincón, C., & Echavarría, L. (2015). Experiencia colombiana en reparación de núcleos de transformadores de potencia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 14(27). http://scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242015000200015
- Condori, E. (2021). *Estudio y elaboración de programas para la obtención del punto de máxima eficiencia del transformador eléctrico mediante Matlab* [Tesis de Pregrado. Universidad Nacional del Centro del Perú]. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNCP_9e8e34f2ce0d93bb99c8e52647417196/Details
- Corrales, J. (1976). *Cálculo industrial de máquinas eléctricas: Tomo II. Método de cálculo*. Barcelona: Universidad Politécnica de Barcelona; Marcombo de Boixareu Editores. https://ingenio.upm.es/discovery/fulldisplay?vid=34UPM_INST%3A34UPM_VU1&tab=Everything&docid=alma991002302979704212&context=L&lang=es&utm_source.com
- Dimenna, C., & Stecca, J. (2015). *Transformadores: Su cálculo y construcción*. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata. © 2018 EUDEM. [https://eudem.mdp.edu.ar/admin/img/ebook/calculo y contruccion de tranformadores.pdf?utm_source.com](https://eudem.mdp.edu.ar/admin/img/ebook/calculo_y_construccion_de_tranformadores.pdf?utm_source.com)
- Flores, J., Inderique, N., & Javier, C. (2021). *Diseño del núcleo de un transformador trifásico de distribución para la reducción de pérdidas técnicas* [Tesis de Pregrado. Universidad Continental]. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/6485708>
- FONAFE. (2017). *Transformadores de distribución. Monofásicos y trifásicos auto refrigerados, sumergidos en líquido aislante. Corriente en vacío, pérdidas y tensión de cortocircuito. Normas Internacionales*. <https://www.else.com.pe/else/media/1169/eett-de-transformadores-de-distribución-15122017.pdf>
- Garcia, A., & Jordana, C. (1972). Cálculo del número óptimo de escalones del núcleo de transformadores. *DYNA*, 2. <https://es.scribd.com/document/697804489/CALCULO-OPTIMO-DE-N-DE-ESCALONES>
- Grinberg, M. (2011). *Flask Web Development: Developing Web Applications with Python*. https://www.oreilly.com/library/view/flask-web-development/9781491991725/?utm_source.com
- Hernández-Sampieri, R., Mendoza, C. P., & Baptista, L. (2021). Metodología de la

- investigación. In *Mc Graw Hill* (Vol. 1, Issue Mexico).
- Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2013). *NTP 370.400: Transformadores de distribución monofásicos y trifásicos auto-refrigerados, sumergidos en líquido aislante. Corriente en vacío, pérdidas y tensión de corto circuito*.
<https://studylib.es/doc/9175622/vsip.info-ntp-370-400-pdf-free>
- Lutz, M. (2021). *Programming Python: Powerful Object-Oriented Programming*.
https://www.oreilly.com/library/view/programming-python-4th/9781449398712/?utm_source=chatgpt.com
- Sánchez, F. (2009). *Diseño de un transformador de 5MVA, 33/11 kV Dyn11* [Tesis de Pregrado. Universidad Carlos III de Madrid]. <https://e-archivo.uc3m.es/rest/api/core/bitstreams/c24174b1-56dc-44ae-b6fc-86873515f088/content>
- Harlow, J. H. (2012). *Electric power transformer engineering* (2nd ed.). CRC Press.
- Kulkarni, S. V., & Khaparde, S. A. (2004). *Transformer engineering: Design, technology, and diagnostics*. CRC Press.
- Corrales, A. R. M. (1976). *Transformadores: teoría, diseño y aplicaciones*. Editorial Litocarrillo.
- Del Vecchio, R. M., Poulin, B., Feghali, P. T., Shah, D. M., & Ahuja, R. (2010). *Transformer design principles: With applications to core-form power transformers* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/EBK1439805824>
- Del Vecchio, R. M., Poulin, B., Feghali, P. T., Shah, D. M., & Ahuja, R. (2010). *Transformer design principles: With applications to core-form power transformers* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/EBK1439805824>
- MathWorks. (2025). *MATLAB & Simulink product information*. MathWorks Inc.
<https://www.mathworks.com>
- Wantuch, A. (2016). *Development of software tool to perform automatic analysis and documentation for large sets of measurement data* (Master's thesis, Blekinge Institute of Technology). DiVA. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:bth-12993>
- Chapman, S. J. (2012). *Electric Machinery Fundamentals* (5.^a ed.). McGraw-Hill.
- Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., & Umans, S. D. (2003). *Electric Machinery* (6.^a ed.). McGraw-Hill.
- Harlow, J. H. (2012). *Electric Power Transformer Engineering* (3.^a ed.). CRC Press.
- Kulkarni, S. V., & Khaparde, S. A. (2004). *Transformer Engineering: Design and Practice*.

CRC Press.

McLyman, C. W. T. (2011). Transformer and Inductor Design Handbook (4.^a ed.). CRC Press.

Cadavid, H., Vergara, J. A., & González, P. C. (2011). Reducción de pérdidas ocasionadas por flujos de dispersión en el tanque de transformadores de distribución. Grupo de Investigación en Alta Tensión (GRALTA), Universidad del Valle.

Flamini Marczuk, S., & Segundo Sainz, O. (2025). Optimización en el diseño de transformadores de distribución (Proyecto Final de Grado). Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata.

ANEXO

Anexo 01. Aceros de grano orientado convencionales mejorados en estado final de suministro

Propiedades magnéticas

Espesor 0,23 mm

	Densidad convencional (kg/dm ³)	Pérdida máx. (W/kg) a 50 Hz a 1,5 T	Pérdida máx. (W/kg) a 50 Hz a 1,7 T	Pérdida máx. (W/kg) a 60 Hz a 1,7 T	Polarización mín. (T) a 800 A/m	Número mín. de plegados	Factor de apilamiento mín. (mm)
		Indicativo	Garantizado	Indicativo	Garantizado	Garantizado	Garantizado
M 105-23 S AM FCE	7,65	0,73	1,05	1,38	1,85	1	0,945
En cursiva, grados que no figuran en la norma							
Para calcular los valores en W/libra, multiplique los valores expresados en W/kg por 0,4536.							

Espesor 0,27 mm

	Densidad convencional (kg/dm ³)	Pérdida máx. (W/kg) a 50 Hz a 1,5 T	Pérdida máx. (W/kg) a 50 Hz a 1,7 T	Pérdida máx. (W/kg) a 60 Hz a 1,7 T	Polarización mín. (T) a 800 A/m	Número mín. de plegados	Factor de apilamiento mín. (mm)
		Indicativo	Garantizado	Indicativo	Garantizado	Garantizado	Garantizado
M 114-27 S AM FCE	7,65	0,78	1,14	1,50	1,85	1	0,950
En cursiva, grados que no figuran en la norma							
Para calcular los valores en W/libra, multiplique los valores expresados en W/kg por 0,4536.							

Espesor 0,30 mm

	Densidad convencional (kg/dm ³)	Pérdida máx. (W/kg) a 50 Hz a 1,5 T	Pérdida máx. (W/kg) a 50 Hz a 1,7 T	Pérdida máx. (W/kg) a 60 Hz a 1,7 T	Polarización mín. (T) a 800 A/m	Número mín. de plegados	Factor de apilamiento mín. (mm)
		Indicativo	Garantizado	Indicativo	Garantizado	Garantizado	Garantizado
M 117-30 S AM FCE	7,65	0,81	1,17	1,55	1,85	1	0,955
En cursiva, grados que no figuran en la norma							
Para calcular los valores en W/libra, multiplique los valores expresados en W/kg por 0,4536.							

Espesor 0,35 mm

	Densidad convencional (kg/dm ³)	Pérdida máx. (W/kg) a 50 Hz a 1,5 T	Pérdida máx. (W/kg) a 50 Hz a 1,7 T	Pérdida máx. (W/kg) a 60 Hz a 1,7 T	Polarización mín. (T) a 800 A/m	Número mín. de plegados	Factor de apilamiento mín. (mm)
		Indicativo	Garantizado	Indicativo	Garantizado	Garantizado	Garantizado
M 125-35 S AM FCE	7,65	0,92	1,25	1,65	1,85	1	0,960
En cursiva, grados que no figuran en la norma							
Para calcular los valores en W/libra, multiplique los valores expresados en W/kg por 0,4536.							

Nota. Fuente ARCELOR MITTAL (Materiales magnéticos de grano orientado mejorados)

Anexo 02. Equivalencias De Normas Y Marcas

Espesor 0,23 mm

	EN 10107:2014	Former standard AISI	ASTM A876:2012	JIS C 2553:2000	IEC/CEI 60404-8- 7:2008
M 110-23 S	M110-23S	M3	23G045/23H070	23G110	M110-23S5
M 120-23 S	M120-23S				M120-23S5
M 127-23 S	M127-23S				

Espesor 0,27 mm

	EN 10107:2014	Former standard AISI	ASTM A876:2012	JIS C 2553:2000	IEC/CEI 60404-8- 7:2008
M 120-27 S	M120-27S	M4	27H074	27G120	M120-27S5
M 130-27 S	M130-27S		27G051	27G130	M130-27S5
M 140-27 S	M140-27S				M140-27S5

Espesor 0,30 mm

	EN 10107:2014	Former standard AISI	ASTM A876:2012	JIS C 2553:2000	IEC/CEI 60404-8- 7:2008
M 120-30 S	M120-30S				
M 130-30 S	M130-30S			30G130	
M 140-30 S	M140-30S	M5	30H083	30G140	M140-30S5
M 150-30 S	M150-30S		30G058		M150-30S5

Espesor 0,35 mm

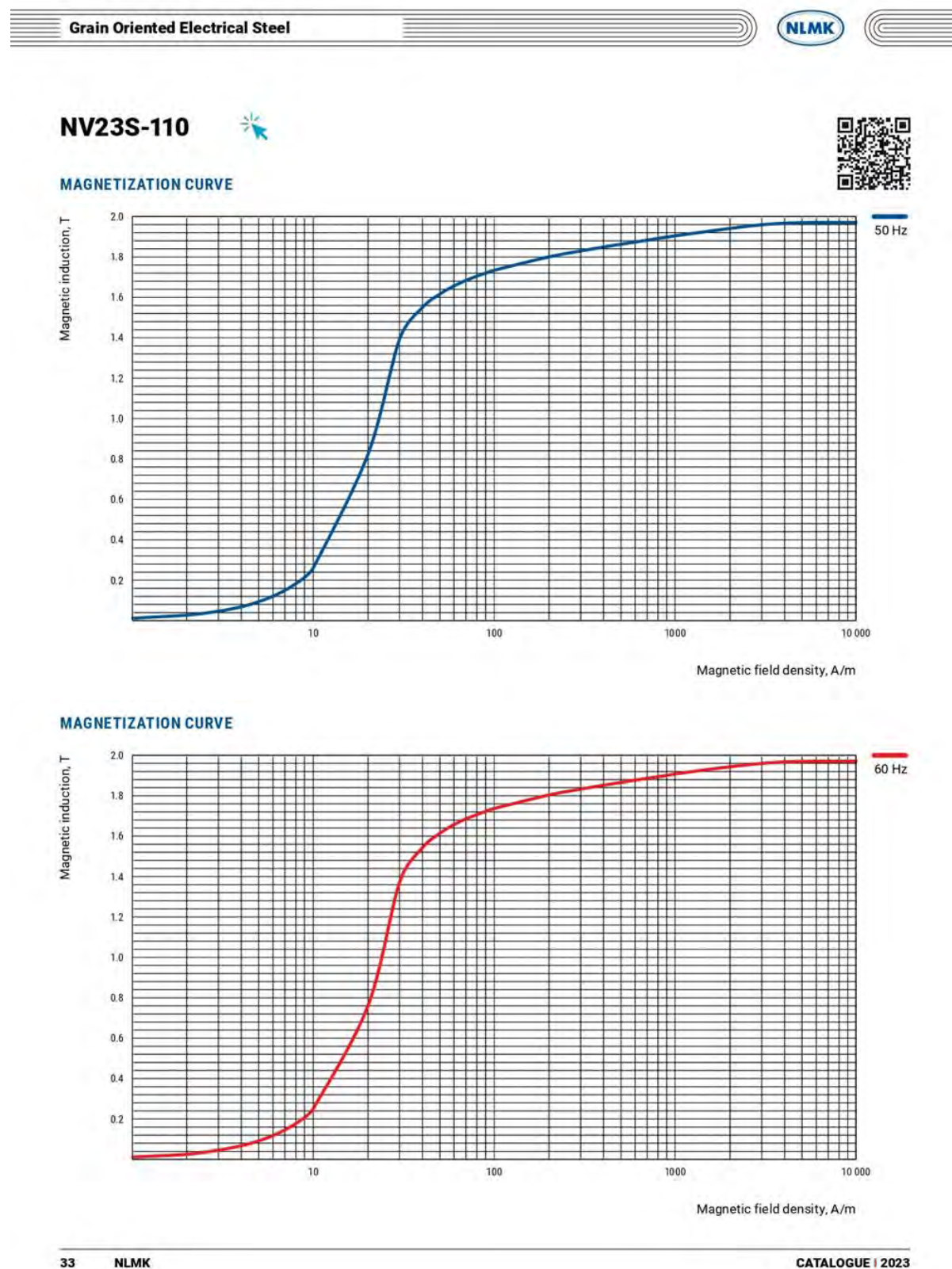
	EN 10107:2014	Former standard AISI	ASTM A876:2012	JIS C 2553:2000	IEC/CEI 60404-8- 7:2008
M 135-35 S	M135-35S				
M 145-35 S	M145-35S			35G145	M145-35S5
M 155-35 S	M155-35S		35H094	35G155	M155-35S5
M 165-35 S	M165-35S		35G066		

Anexo 03. Equivalencia Técnica Arcelor Mittal Con Nlmk

MATERIAL ARCELORMITTAL	ESPESOR (MM)	MATERIAL NLMK EQUIVALENTE
M110-23S	0.23	NV23S-110
M120-23S	0.23	NV23S-120
M127-23S	0.23	NV23S-127
M105-27S	0.27	NV27S-105
M110-27S	0.27	NV27S-110
M120-27S	0.27	NV27S-120
M120-30S	0.30	NV30S-105
M130-30S	0.30	NV30S-110
M140-30S	0.30	NV30S-120
M150-30S	0.30	NV30S-130
M135-35S	0.35	NV35S-120
M145-35S	0.35	NV35S-135
M155-35S	0.35	NV35S-130
M165-35S	0.35	NV35S-145

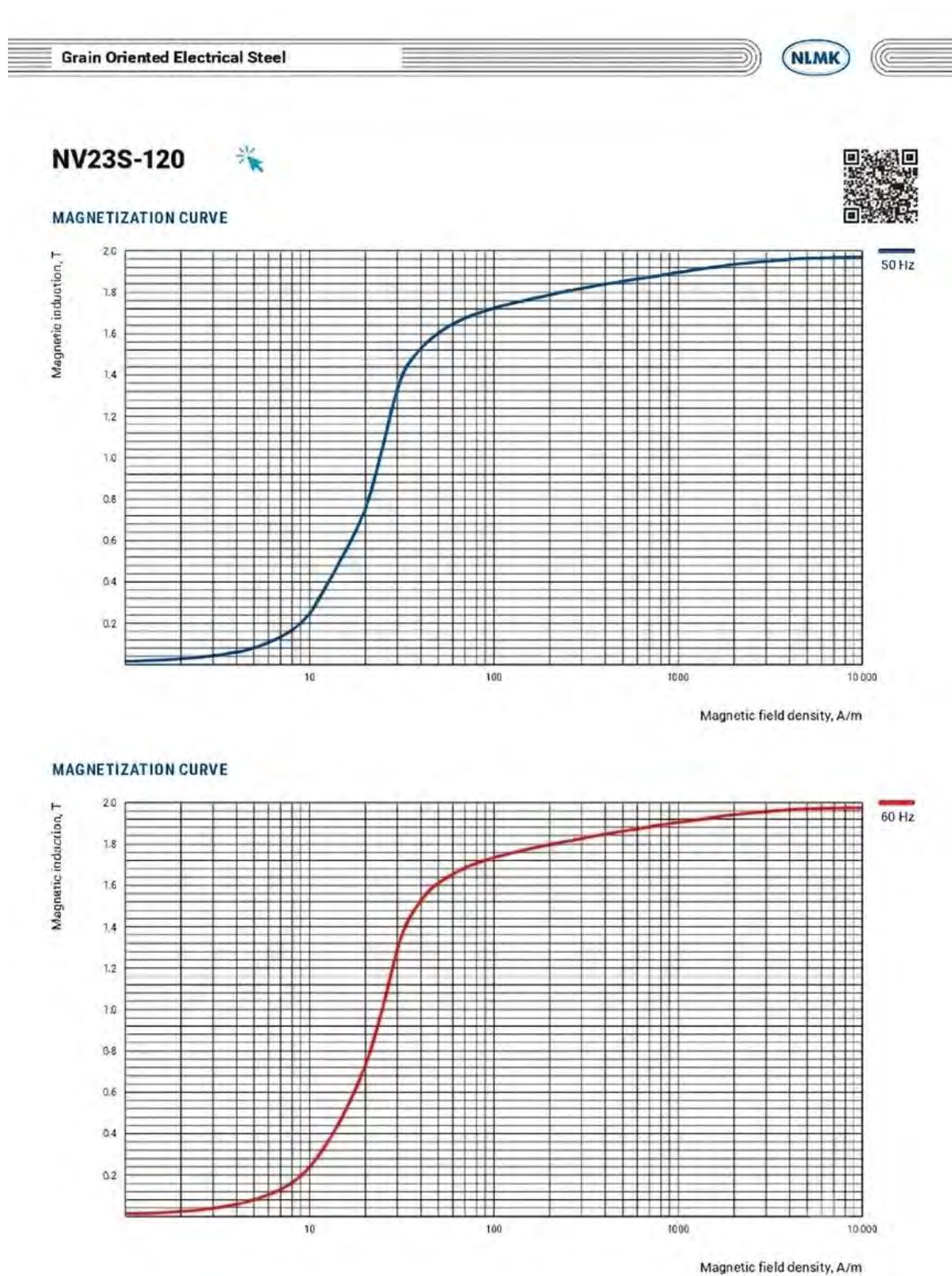
Nota. Fuente elaboración propia (Materiales magnéticos de grano orientado mejorados)

Anexo 04. Curva de magnetización del M110-23S / NV23S-110



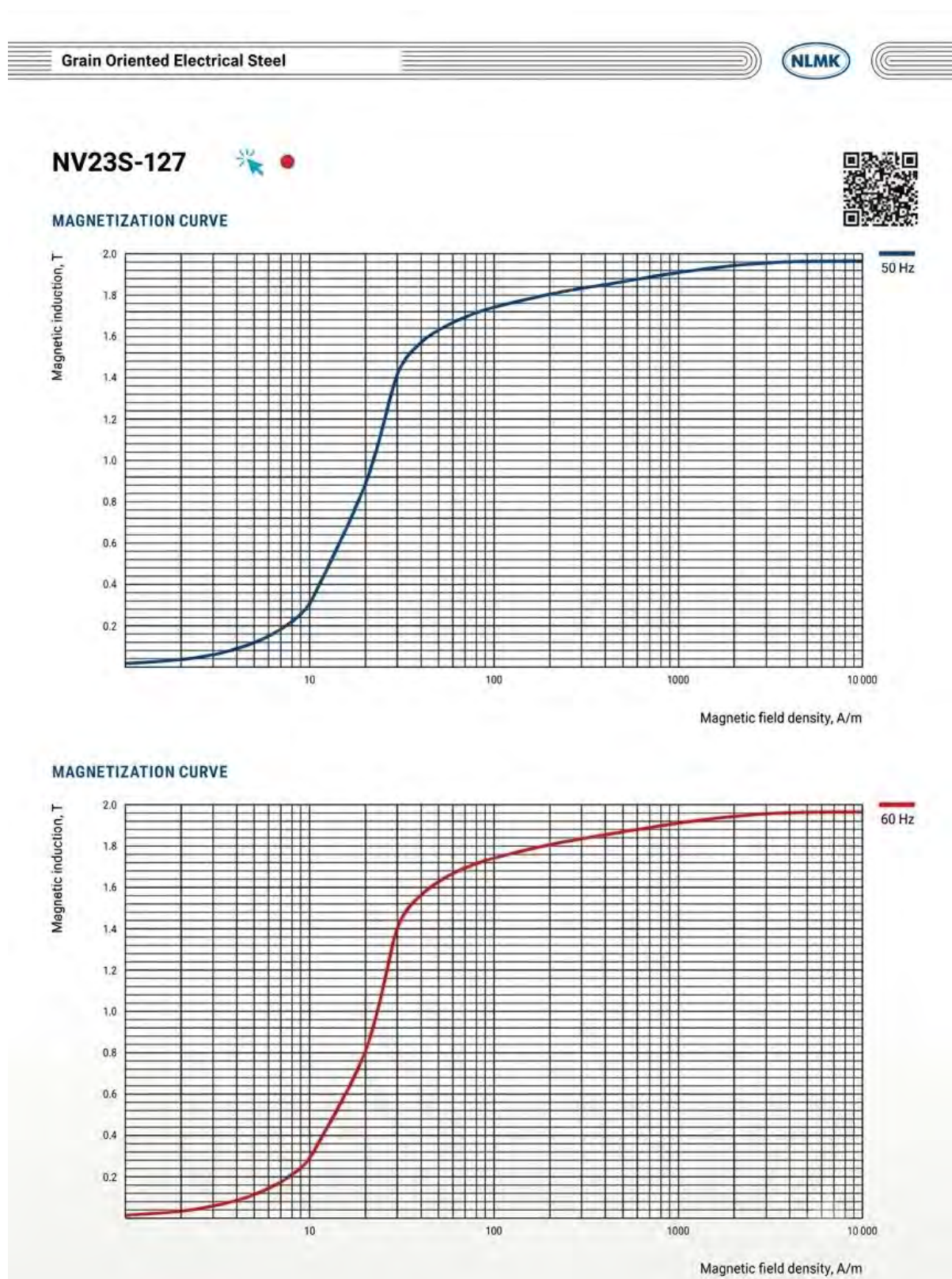
Nota. Fuente GRAIN ORIENTED ELECTRICAL STEEL (Product Catalog-2023)

Anexo 05. Curva de magnetización del M120-23S / NV23S-120



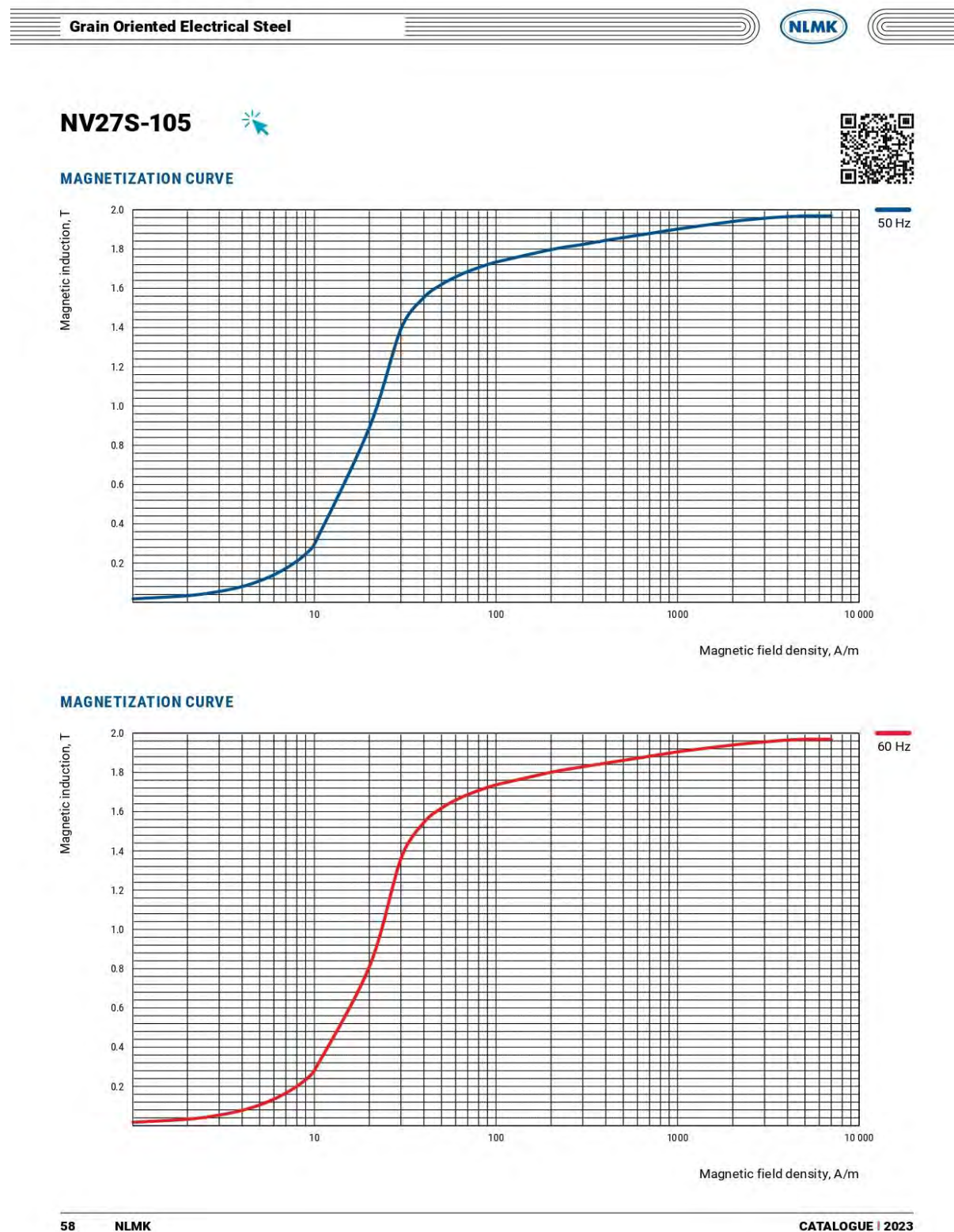
Nota. Fuente GRAIN ORIENTED ELECTRICAL STEEL (Product Catalog-2023)

Anexo 06. Curva de magnetización del M127-23S / NV23S-127



Nota. Fuente GRAIN ORIENTED ELECTRICAL STEEL (Product Catalog-2023)

Anexo 07. Curva de magnetización del M105-27S / NV27S-105



Nota. Fuente GRAIN ORIENTED ELECTRICAL STEEL (Product Catalog-2023)

Anexo 08. Curva de magnetización del M110-27S / NV27S-110

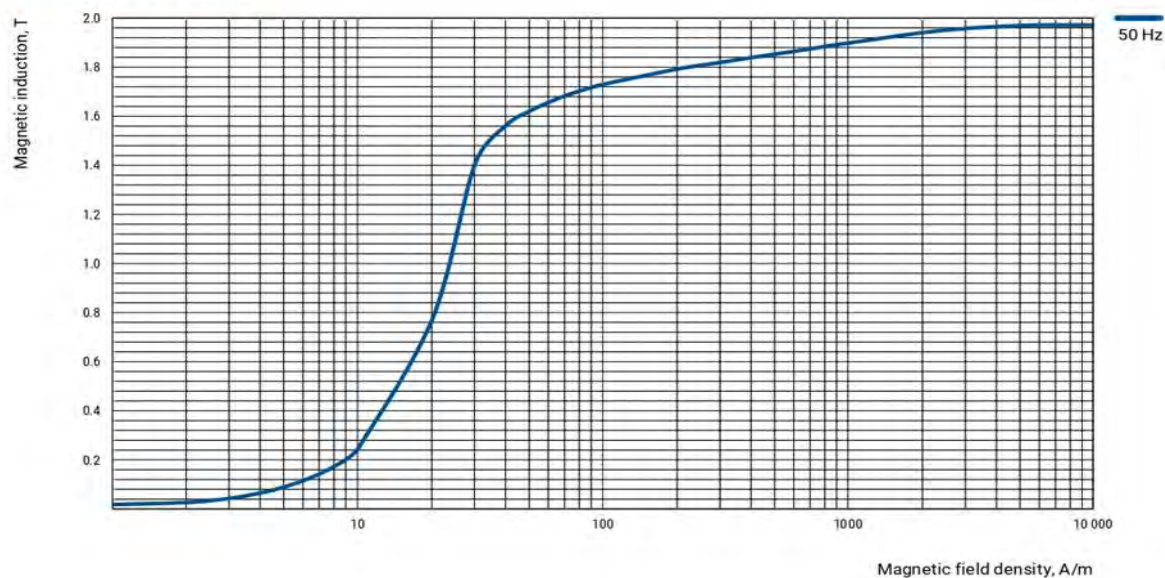
Grain Oriented Electrical Steel



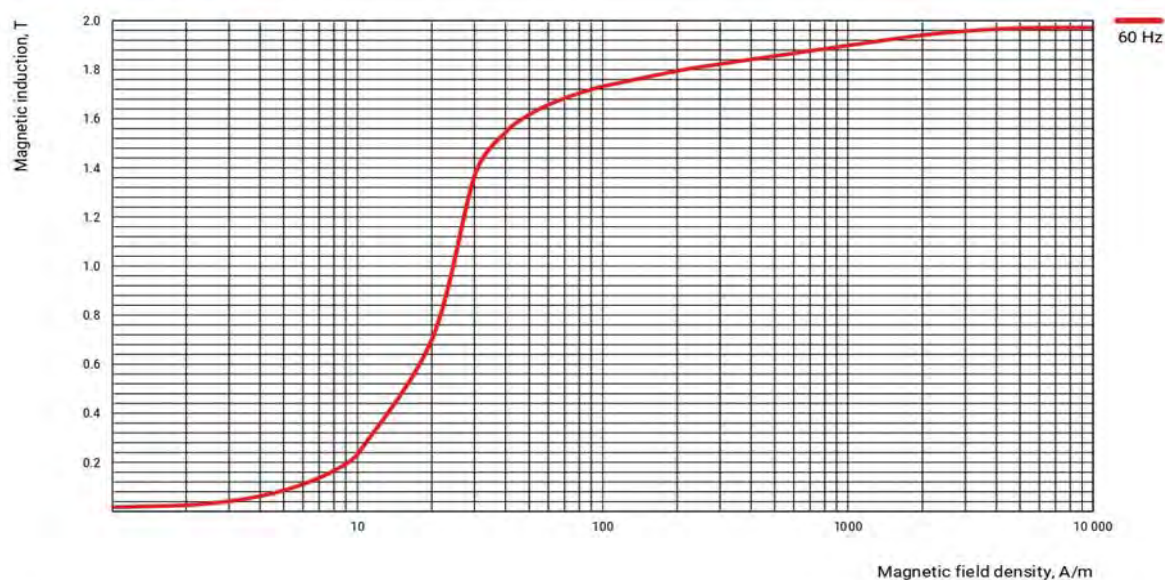
NV27S-110



MAGNETIZATION CURVE

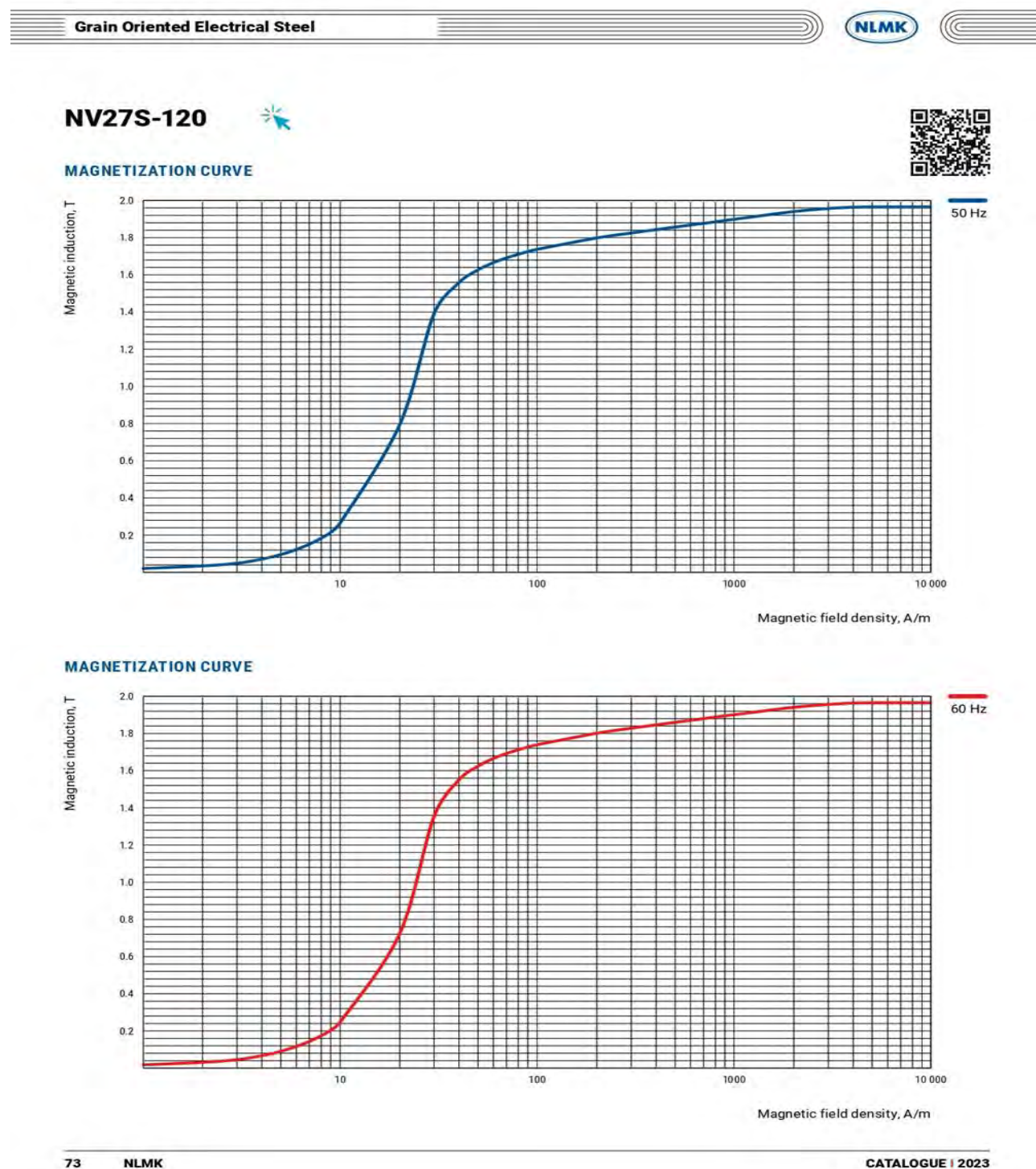


MAGNETIZATION CURVE



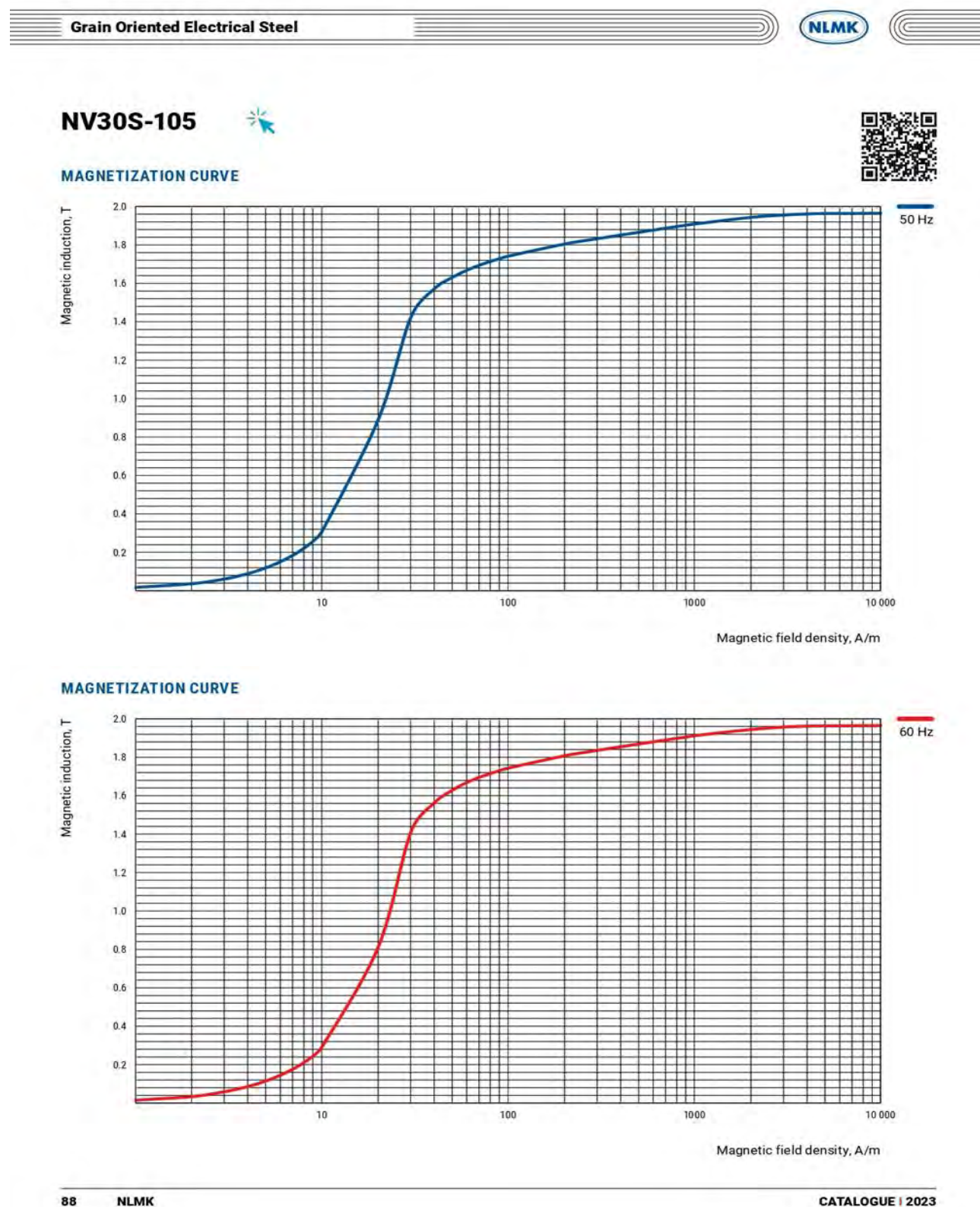
Nota. Fuente GRAIN ORIENTED ELECTRICAL STEEL (Product Catalog-2023)

Anexo 09. Curva de magnetización del M120-27S / NV27S-120



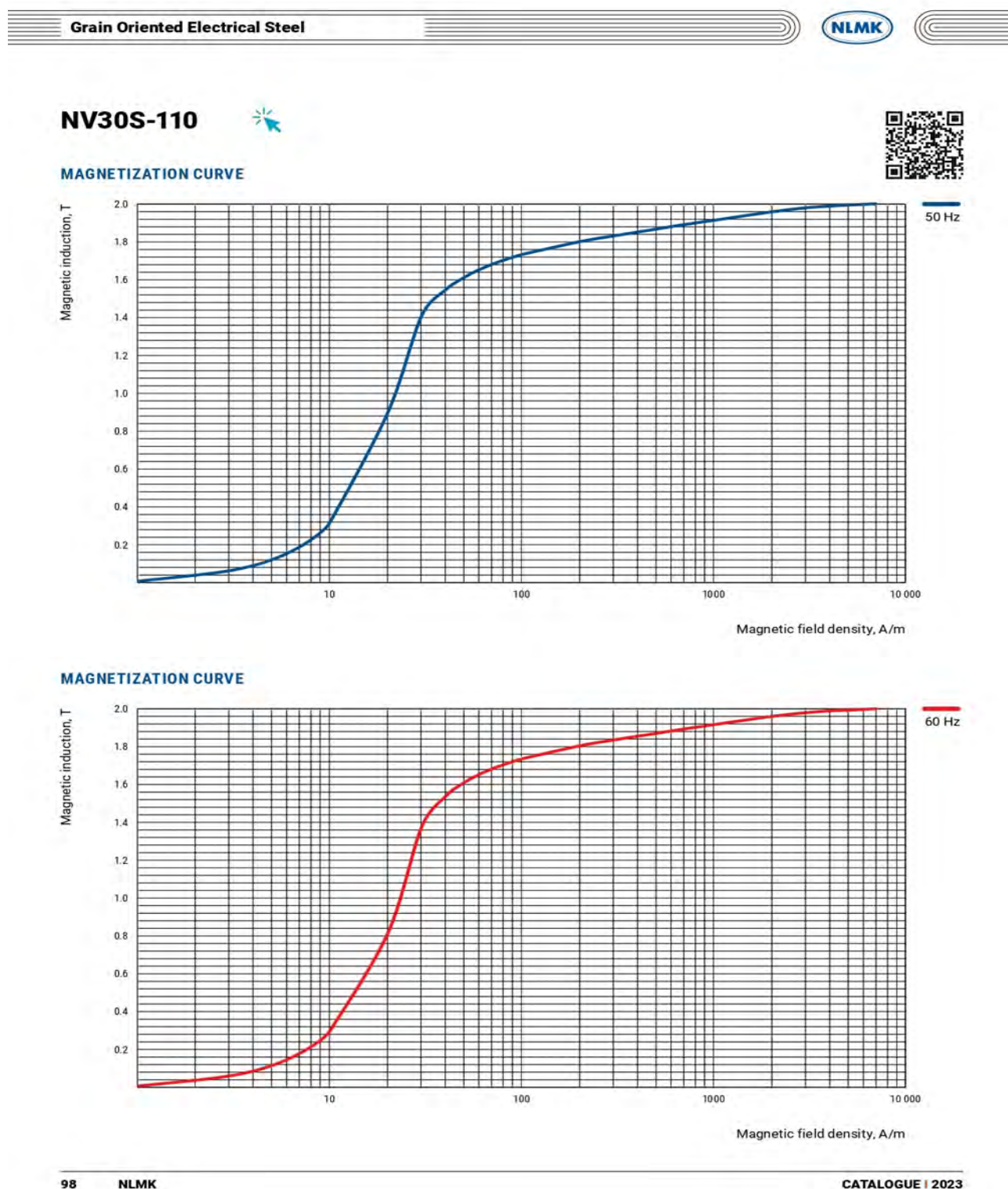
Nota. Fuente GRAIN ORIENTED ELECTRICAL STEEL (Product Catalog-2023)

Anexo 10. Curva de magnetización del M120-30S / NV30S-105



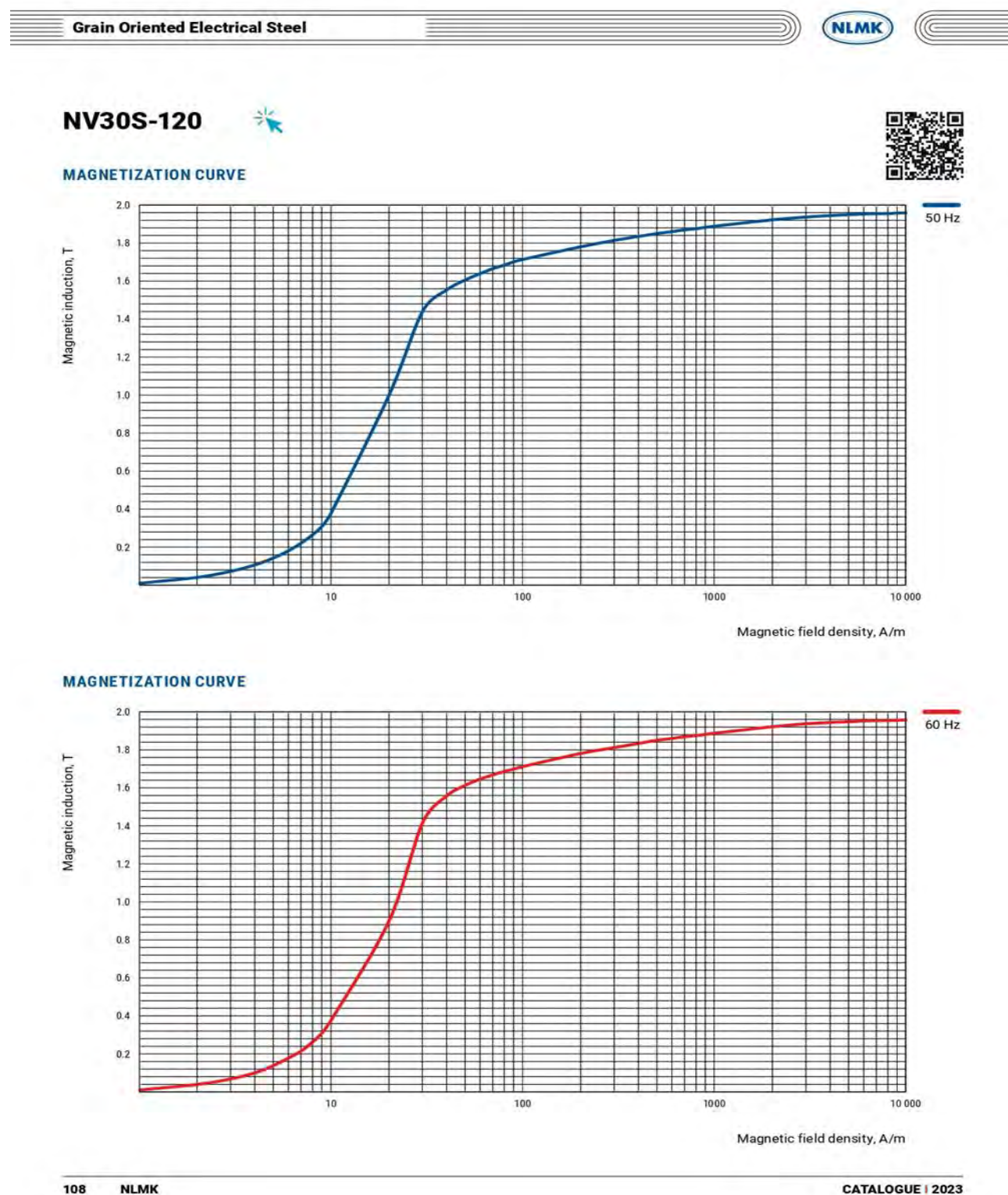
Nota. Fuente GRAIN ORIENTED ELECTRICAL STEEL (Product Catalog-2023)

Anexo 11. Curva de magnetización del M130-30S / NV30S-110



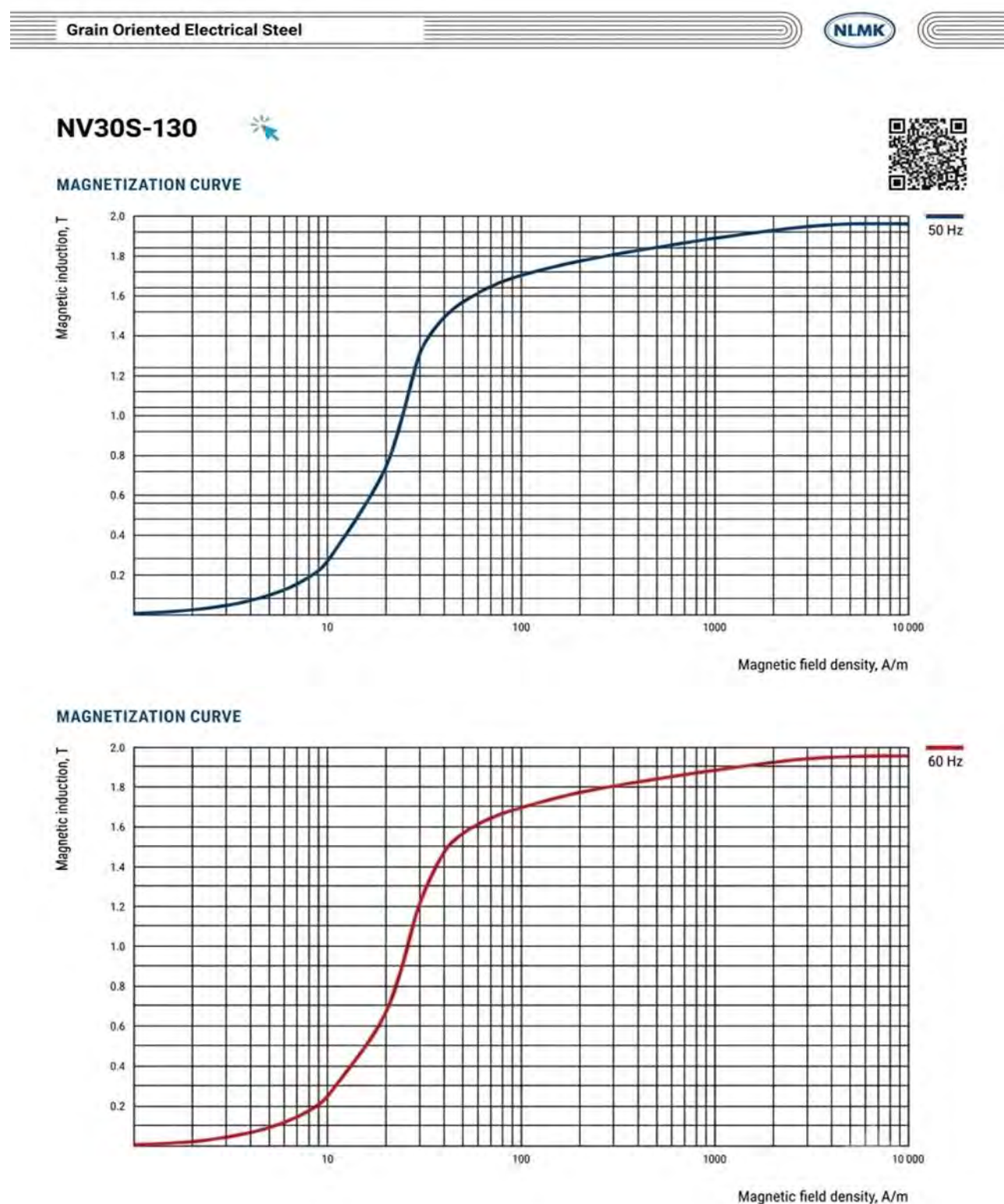
Nota. Fuente GRAIN ORIENTED ELECTRICAL STEEL (Product Catalog-2023)

Anexo 12. Curva de magnetización del M140-30S / NV30S-120



Nota. Fuente GRAIN ORIENTED ELECTRICAL STEEL (Product Catalog-2023)

Anexo 13. Curva de magnetización del M150-30S / NV30S-130



Nota. Fuente GRAIN ORIENTED ELECTRICAL STEEL (Product Catalog-2023)

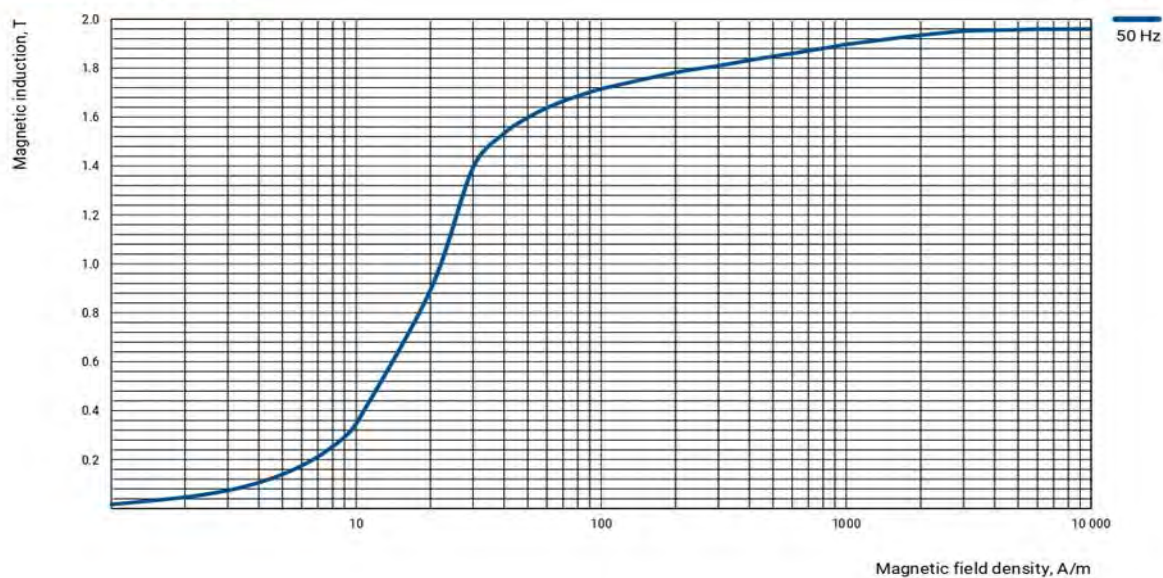
Anexo 14. Curva de magnetización del M135-35S / NV35S-120



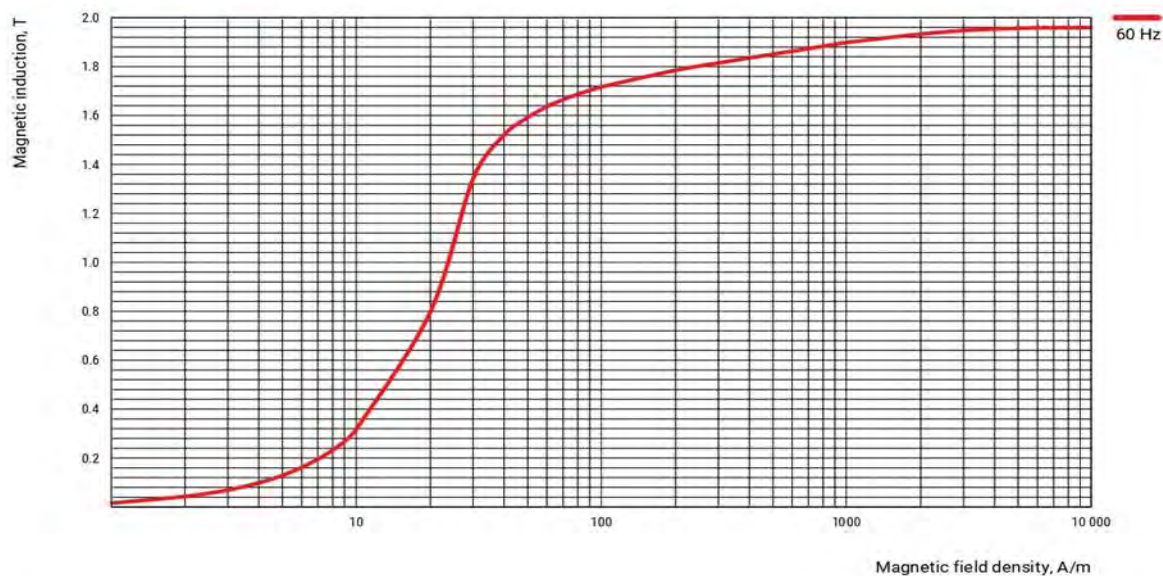
NV35S-120



MAGNETIZATION CURVE

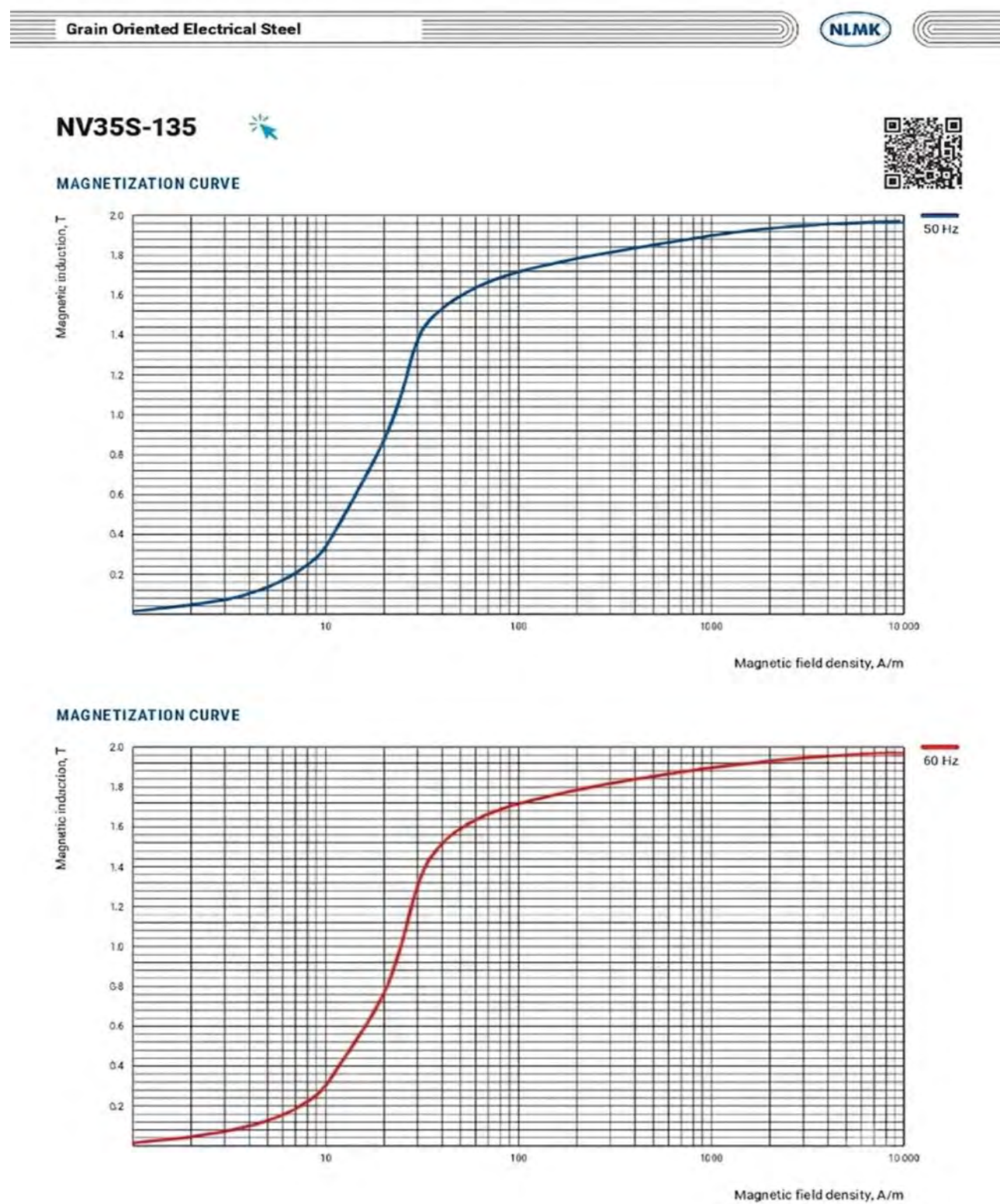


MAGNETIZATION CURVE



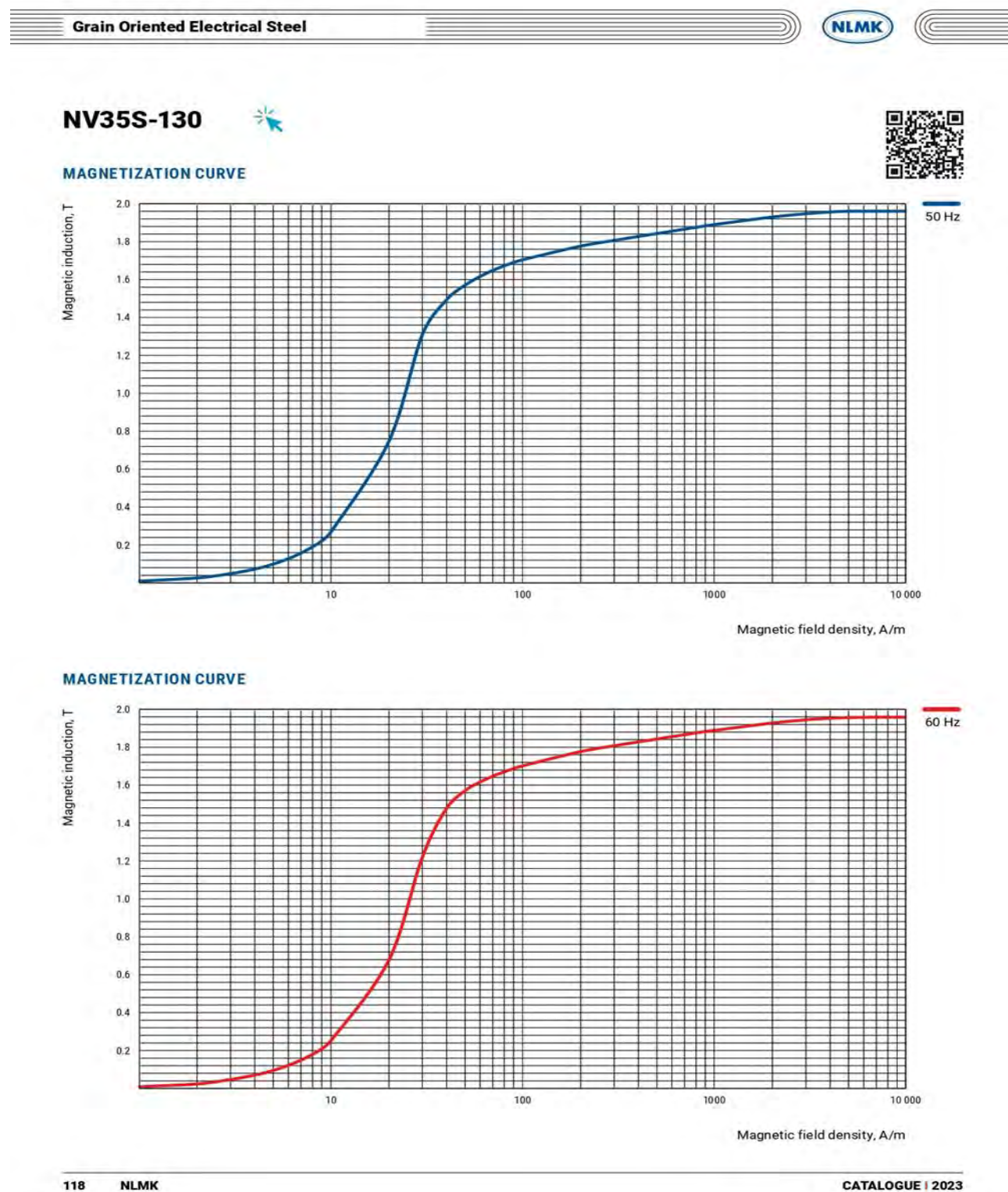
Nota. Fuente GRAIN ORIENTED ELECTRICAL STEEL (Product Catalog-2023)

Anexo 15. Curva de magnetización del M145-35S / NV35S-135



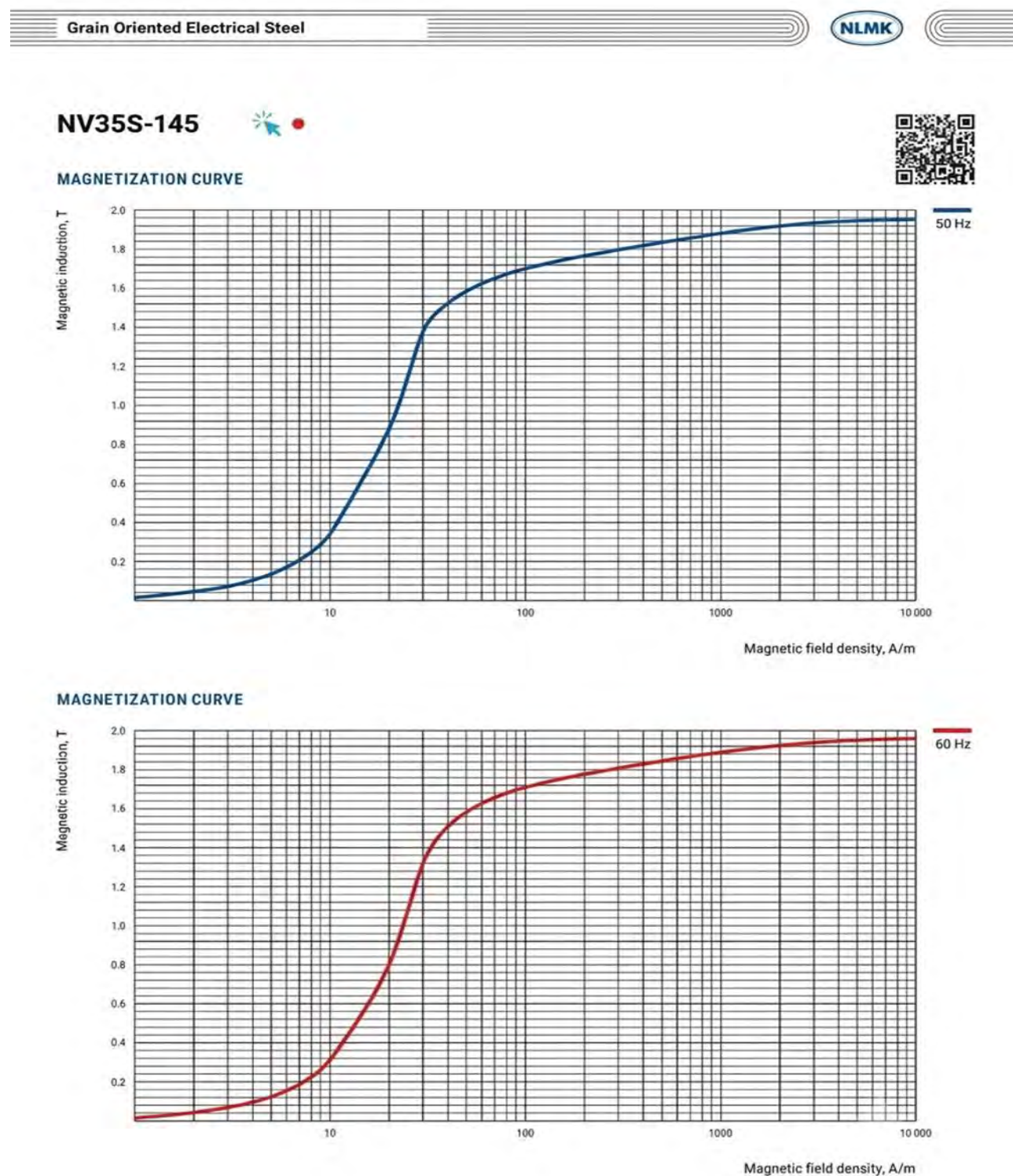
Nota. Fuente GRAIN ORIENTED ELECTRICAL STEEL (Product Catalog-2023)

Anexo 16. Curva de magnetización del M155-35S / NV35S-130



Nota. Fuente GRAIN ORIENTED ELECTRICAL STEEL (Product Catalog-2023)

Anexo 17. Curva de magnetización del M165-35S / NV35S-145



Nota. Fuente GRAIN ORIENTED ELECTRICAL STEEL (Product Catalog-2023)

Anexo 18. Estadísticas orientativas de los principales fallas del núcleo magnético de los transformadores de distribución.

MODO DE FALLA DEL NÚCLEO	PARTICIPACIÓN APROXIMADA DENTRO DE LAS FALLAS DEL NÚCLEO (%)	CONSECUENCIA PRINCIPAL	NIVEL DE CRITICIDAD
Cortocircuito entre laminaciones (por deterioro del aislamiento interlaminar)	25–35 %	Incremento de pérdidas por corrientes parásitas y formación de puntos calientes	Alto
Aflojamiento o desplazamiento del paquete de chapas	20–30 %	Aumento de vibraciones, ruido y deformación mecánica	Medio–Alto
Múltiples puestas a tierra del núcleo	15–20 %	Circulación de corrientes indeseadas y sobrecalentamiento localizado	Alto
Rebabas o defectos de fabricación en las laminaciones	10–15 %	Elevación de pérdidas en vacío y calentamiento local	Medio
Saturación magnética por errores de diseño o sobretensión	10–15 %	Incremento de la corriente de excitación y temperatura del núcleo	Alto
Corrosión, oxidación o contaminación del núcleo	5–10 %	Deterioro mecánico y reducción de la eficiencia magnética	Bajo–Medio
Otros defectos (impactos mecánicos, transporte, montaje)	5–10 %	Deformaciones y pérdida de alineación	Medio

Anexo 19. Distribución aproximada de fallas en los principales componentes de transformadores de distribución.

COMPONENTE PRINCIPAL	PARTICIPACIÓN APROXIMADA EN LAS FALLAS (%)	MODOS DE FALLA MÁS COMUNES	IMPACTO OPERATIVO
Devanados	30–40 %	Cortocircuitos entre espiras, deformaciones mecánicas, fallas del aislamiento	Muy alto
Cambiador de tomas bajo carga (OLTC)	15–25 %	Desgaste de contactos, arco eléctrico, fallas mecánicas	Alto
Bushings (boquillas)	10–20 %	Degradación del aislamiento, ingreso de humedad, descargas parciales	Alto
Sistema de aislamiento (aceite y papel)	10–20 %	Envejecimiento térmico, humedad, contaminación	Muy alto
Núcleo magnético	5–10 %	Cortocircuito entre laminaciones, múltiples puestas a tierra, aflojamiento mecánico, saturación y sobrecalentamiento	Medio–Alto
Tanque y sistema mecánico	3–8 %	Fugas de aceite, corrosión, deformaciones	Medio
Sistema de refrigeración	3–8 %	Falla de ventiladores, bombas o radiadores	Medio
Accesorios e instrumentación	2–5 %	Falla de indicadores, sensores y relés auxiliares	Bajo–Medio

Anexo 20. Matriz de fallas en los núcleos magnéticos escalonados de los transformadores de distribución.

COMPONENTE	MODO DE FALLA	CAUSA PROBABLE	EFECTO	MANTENIMIENTO	COSTO	FRECUENCIA
Núcleo laminado	Saturación magnética	Error de diseño/exceso de flujo	Pérdidas y calentamiento	Revisión de diseño y tensión	Alto	Baja
Núcleo laminado	Aflojamiento de chapas	Vibraciones o montaje	Ruido y pérdidas	Reapriete e inspección	Medio	Media
Núcleo laminado	Rebabas entre laminaciones	Defecto de fabricación	Corrientes parásitas	Inspección y corrección	Medio	Baja
Núcleo laminado	Cortocircuito entre laminaciones	Deterioro aislamiento	Puntos calientes	Ensayos y reemplazo	Alto	Baja
Núcleo laminado	Desplazamiento mecánico	Esfuerzos de cortocircuito	Deformación	FRA e inspección	Alto	Baja
Núcleo laminado	Múltiples puestas a tierra	Falla de aislamiento	Calentamiento	Medición/corrección	Medio	Baja
Núcleo laminado	Corrosión	Humedad	Deterioro mecánico	Limpieza y sellado	Medio	Baja
Núcleo laminado	Sobrecalentamiento	Pérdidas excesivas	Envejecimiento	Monitoreo térmico	Alto	Media
Núcleo laminado	Vibración excesiva	Magnetostricción/sujeción	Ruido y fatiga	Ajuste estructural	Bajo-Medio	Media
Núcleo laminado	Descargas parciales	Defectos superficiales	Degradación aislamiento	DGA y PD	Alto	Baja

APENDICE

Apendice 01. Código de programación para el diseño del núcleo del transformador.

```
import tkinter as tk
from tkinter import ttk, messagebox
from scipy.optimize import fsolve
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.cm as cm
import pandas as pd
import math
from mpl_toolkits.mplot3d.art3d import Poly3DCollection

class CalculoNucleoApp(tk.Tk):
    def __init__(self, root):
        self.root = root
        self.root.title("DISEÑO DE NUCLEO DE TRANSFORMADOR")
        # Ajustar tamaño al de la pantalla
        ancho_pantalla = self.root.winfo_screenwidth()
        alto_pantalla = self.root.winfo_screenheight()
        self.root.geometry(f"{ancho_pantalla}x{alto_pantalla}")
        # Maximizar la ventana
        self.root.state("zoomed") # Opcional: solo para Windows
        # Crear el diseño
        self.crear_interfaz()
    def crear_interfaz(self):
        # Secciones principales
        self.crear_entradas()
        self.crear_resultados()
        self.resumen()
        self.crear_entrada()
    def crear_entradas(self):
        #crear estilo de color
        style = ttk.Style()
        style.configure("Custom.TLabelframe", background="#FFDAB9",
borderwidth=3, relief="solid")
        style.configure("Custom.TLabelframe.Label", background="#CD5C5C",
foreground="white", font=("Arial", 10, "bold"))
        style.configure("Custom.TLabel", background="#FFDAB9",
foreground="black")

        # Crear marco para las entradas
        frame_entradas = ttk.LabelFrame(self.root,
text="Entradas", style="Custom.TLabelframe")
        frame_entradas.grid(row=0, column=0, padx=10, pady=10, sticky="nsew")
```

```

# Potencia KVA
ttk.Label(frame_entradas, text="Potencia (KVA):",
style="Custom.TLabel").grid(row=0, column=0, padx=10, pady=5)
self.potencia_entry = ttk.Entry(frame_entradas)
self.potencia_entry.grid(row=0, column=1, padx=10, pady=5)

# Escalones
ttk.Label(frame_entradas, text="Escalones:").grid(row=1, column=0,
padx=10, pady=5)
self.escalones_var = tk.StringVar(value="1 Escalón")
self.escalones_dropdown = ttk.Combobox(frame_entradas,
textvariable=self.escalones_var,
values=[f"{i} Escalón(es)" for
i in range(1, 11)])
self.escalones_dropdown.grid(row=1, column=1, padx=10, pady=5)

# Selección de material
ttk.Label(frame_entradas, text="Material:").grid(row=2, column=0,
padx=10, pady=5)
self.material_var = tk.StringVar(value="M 110-23 S")
self.material_dropdown = ttk.Combobox(frame_entradas,
textvariable=self.material_var,
values=list(self.obtener_materia
les().keys()))
self.material_dropdown.grid(row=2, column=1, padx=10, pady=5)

# Diámetro
ttk.Label(frame_entradas, text='Diámetro:').grid(row=3, column=0,
padx=10, pady=5)
self.resultado_diametro = ttk.Label(frame_entradas, text="")
self.resultado_diametro.grid(row=3, column=1, padx=10, pady=5)

# Botón Calcular
ttk.Button(frame_entradas, text="Calcular",
command=self.calcular).grid(row=4, column=0, columnspan=2, pady=10)

def crear_resultados(self):
    #crear estilo de color
    style = ttk.Style()
    style.configure("Custom3.TLabelframe", background="#98FB98",
borderwidth=3, relief="solid")
    style.configure("Custom3.TLabelframe.Label", background="#CD5C5C",
foreground="white", font=("Arial", 10, "bold"))
    style.configure("Custom3.TLabel", background="#FFDAB9",
foreground="black")
    # Crear marco para los resultados
    frame_resultados = ttk.LabelFrame(self.root, text="Resultados de corte
columna", style="Custom3.TLabelframe")

```

```

        frame_resultados.grid(row=1, column=0, columnspan=2, padx=5, pady=5,
sticky="nsew")

        # Tabla de resultados
        self.result_table = ttk.Treeview(frame_resultados, columns=("Escalón",
"Largo", "Ancho"), show="headings", height=8)
        self.result_table.heading("Escalón", text="Escalón")
        self.result_table.heading("Largo", text="Largo mm")
        self.result_table.heading("Ancho", text="Ancho mm")

        # Configurar columnas para centrar los datos
        self.result_table.column("Escalón", anchor="center", width=100)
        self.result_table.column("Largo", anchor="center", width=100)
        self.result_table.column("Ancho", anchor="center", width=100)

        self.result_table.grid(row=0, column=0, padx=5, pady=5,sticky="w")

    def resumen(self):
        #crear estilo de color
        style = ttk.Style()
        style.configure("Custom2.TLabelframe", background="#98FB98",
borderwidth=3, relief="solid")
        style.configure("Custom2.TLabelframe.Label", background="#CD5C5C",
foreground="white", font=("Arial", 10, "bold"))
        style.configure("Custom2.TLabel", background="#FFDAB9",
foreground="black")
        # Crear marco para los resumen
        frame_resumen = ttk.LabelFrame(self.root, text="Resumen de
datos",style="Custom2.TLabelframe")
        frame_resumen.grid(row=0, column=3, columnspan=2, padx=10, pady=5,
sticky="nsew")
        #mostrar factor de utilizacion
        ttk.Label(frame_resumen, text='Factor de utilizacion:').grid(row=0,
column=0,padx=10, pady=5,sticky='e')
        self.factor_utilizacion=ttk.Label(frame_resumen, text=' ')
        self.factor_utilizacion.grid(row=0, column=1,padx=10,pady=5)
        # Mostrar Resumen volumen mm3
        ttk.Label(frame_resumen,
text='Volumen:').grid(row=1,column=0,padx=10,pady=5,sticky='e')
        self.volumen=ttk.Label(frame_resumen,text=' ')
        self.volumen.grid(row=1, column=1,padx=10,pady=5)
        # Mostrar Resumen volumen mm3
        ttk.Label(frame_resumen,
text='Volumen:').grid(row=2,column=0,padx=10,pady=5,sticky='e')
        self.volumenC=ttk.Label(frame_resumen,text=' ')

```

```

        self.volumenC.grid(row=2, column=1, padx=10, pady=5)
        # Mostrar Peso
        ttk.Label(frame_resumen,
text='Peso:').grid(row=3, column=0, padx=10, pady=5, sticky='e')
        self.Peso=ttk.Label(frame_resumen, text=' ')
        self.Peso.grid(row=3, column=1, padx=10, pady=5)
        # Mostrar Pedidas
        ttk.Label(frame_resumen,
text='Perdidas:').grid(row=4, column=0, padx=10, pady=5, sticky='e')
        self.Perdidas=ttk.Label(frame_resumen, text=' ')
        self.Perdidas.grid(row=4, column=1, padx=10, pady=5)
        # Abrir tabala de datos
        self.boton_abrir_resultados = ttk.Button(frame_resumen, text="Ver
Resultados", command=self.abrir_ventana_resultados)
        self.boton_abrir_resultados.grid(row=5, column=0, padx=10, pady=10)

    def crear_entrada(self):
        #crear estilo de color
        style = ttk.Style()
        style.configure("Custom4.TLabelframe", background="#FFFACD",
borderwidth=3, relief="solid")
        style.configure("Custom4.TLabelframe.Label", background="#CD5C5C",
foreground="white", font=("Arial", 10, "bold"))
        style.configure("Custom4.TLabel", background="#FFDAB9",
foreground="black")
        # Crear marco para las entradas
        frame_entradas1 = ttk.LabelFrame(self.root, text="Crear
Dibujos", style="Custom4.TLabelframe")
        frame_entradas1.grid(row=0, column=2, padx=10, pady=10, sticky="nsew")
        # Botón para crear los botones dinámicamente
        self.boton_crear = tk.Button(frame_entradas1, text="Dibujo solape de
escalones", command=self.crear_botones_dinamicos)
        self.boton_crear.grid(row=1, column=2, columnspan=2, pady=10)
        self.boton_crearv = tk.Button(frame_entradas1, text="Generar vista
3D", command=self.crearv)
        self.boton_crearv.grid(row=2, column=2, columnspan=2, pady=10)

        # Contenedor para los botones generados dinámicamente

        self.frame_botones = ttk.Frame(self.root)
        self.frame_botones.grid(row=1, column=2, padx=10, pady=10,
sticky='nsew')
    def crear_botones_dinamicos(self):
        for widget in self.frame_botones.winfo_children():
            widget.destroy()
        try:
            escalones = int(self.escalones_var.get().split()[0])
            print (escalones)

```

```

        if escalones <= 0:
            raise ValueError("El número de escalones debe ser mayor que
0.")

        # Crear los botones dinámicamente
        for i in range(1, escalones + 1):
            boton = tk.Button(self.frame_botones, text=f"Escalón {i}",
                             command=lambda i=i:
self.on_boton_presionado(i))
            boton.grid(row=i-1, column=2, padx=10, pady=10)

        except ValueError as e:
            print("Error:", e)

    def on_boton_presionado(self, escalon):
        print(f"Botón del Escalón {escalon} presionado")
        plt.figure()
        plt.title(f"Diagrama del Escalón {escalon}")

    # Datos de entrada
        potencia = float(self.potencia_entry.get())
        escalones = int(self.escalones_var.get().split()[0])

    # Parámetros geométricos
        D = 42.17 * (potencia ** (1 / 4))
        r = D / 2 # Radio del núcleo
        Hw = 120 * (potencia ** (1 / 4)) # Altura de la ventana
        M = 8.651 * (4.566 + 1 / 0.246) * (potencia ** (1 / 4)) # Distancia
entre columnas
        hy = 32.66 * (potencia ** (1 / 4)) # Altura del yugo

    # Calcular ángulos
        a1 = self.calcular_angulos(escalones)
        a1 = a1[::-1]
        # Obtener el ángulo del escalón seleccionado
        angle = a1[escalon - 1] # Convertir a radianes
        x = np.round(D * np.cos(angle), 2) # Coordenada x basada en el ángulo
        y = r * np.sin(angle) # Coordenada y basada en el ángulo

        print(f"Ángulo: {np.degrees(angle):.2f}°, Coordenadas calculadas: x =
{x:.2f}, y = {y:.2f}")

    # Coordenadas del gráfico (según diseño)
        x_1 = [0, 0, M, M, 0]
        y_1 = [0, hy, hy, 0, 0]
        x_2 = [0, 0, x, x, 0]
        y_2 = [hy, 2 * hy + Hw, 2 * hy + Hw, hy, hy]
        x_3 = [M, M, M + x, M + x, M]

```

```

y_3 = [0, Hw + hy, Hw + hy, 0, 0]
x_4 = [M + x, M + x, 2 * M + x, 2 * M + x, M]
y_4 = [0, hy, hy, 0, 0]
x_5 = [2 * M, 2 * M, 2 * M + x, 2 * M + x, 2 * M]
y_5 = [hy, 2 * hy + Hw, 2 * hy + Hw, hy, hy]

x_6 = [x, x, 2 * M, 2 * M, x]
y_6 = [hy + Hw, 2 * hy + Hw, 2 * hy + Hw, hy + Hw, hy + Hw]

# Dibujar elementos en el gráfico
plt.plot(x_1, y_1, color='black', linewidth=2)
plt.fill(x_1, y_1, color='violet', zorder=2)
plt.plot(x_2, y_2, color='black', linewidth=2)
plt.fill(x_2, y_2, color='aquamarine', zorder=2)
plt.plot(x_3, y_3, color='black', linewidth=2)
plt.fill(x_3, y_3, color='aquamarine', zorder=2)
plt.plot(x_4, y_4, color='black', linewidth=2)
plt.fill(x_4, y_4, color='violet', zorder=2)
plt.plot(x_5, y_5, color='black', linewidth=2)
plt.fill(x_5, y_5, color='aquamarine', zorder=2)
plt.plot(x_6, y_6, color='black', linewidth=2)
plt.fill(x_6, y_6, color='lime', zorder=2)
#flecha de medida ancho planacha 3
plt.arrow(0, 2 * hy + Hw + r/5, x, 0,
          head_width=r/5, head_length=r/5, fc="black", ec="black",
length_includes_head=True)

plt.arrow(x, 2 * hy + Hw + r/5, -x, 0,
          head_width=r/5, head_length=r/5, fc="black", ec="black",
length_includes_head=True)

plt.plot([0, 0], [Hw+2*hy,Hw+2*hy+r/5], color="red",
linewidth=1,linestyle='--')
plt.plot([x, x], [Hw+2*hy,Hw+2*hy+r/5], color="red",
linewidth=1,linestyle='--')
plt.text(x/2,2*hy + Hw + r/2.5, f'{round(x,2)}mm',
horizontalalignment='center', verticalalignment='center', color="red",
fontsize=8)
#felcha de medida ancho en la plnacha 2
plt.arrow(-r/5,0, 0, hy,
          head_width=r/5, head_length=r/5, fc="black", ec="black",
length_includes_head=True)

plt.arrow(-r/5,hy, 0, -hy,
          head_width=r/5, head_length=r/5, fc="black", ec="black",
length_includes_head=True)
plt.plot([0, -r/5], [0,0], color="red", linewidth=1,linestyle='--')
plt.plot([0, -r/5], [hy,hy], color="red", linewidth=1,linestyle='--')

```

```

plt.text(-r/2, hy/2, f'{round(hy,2)}mm', horizontalalignment='center',
verticalalignment='center', color="red", fontsize=8, rotation=90)

#medidas de altura de ventana Hw
plt.arrow( x+r/2.5,hy, 0, Hw,
          head_width=r/5, head_length=r/5, fc="black", ec="black",
length_includes_head=True)

plt.arrow(x+r/2.5,hy+Hw, 0, -Hw,
          head_width=r/5, head_length=r/5, fc="black", ec="black",
length_includes_head=True)
plt.plot([x, x+r/2.5], [hy,hy], color="red", linewidth=1,linestyle='--'
')
plt.plot([x, x+r/2.5], [hy+Hw,hy+Hw], color="red",
linewidth=1,linestyle='--')
plt.text(x+r/1.5,(hy+Hw)/2+hy, f'{round(Hw,2)}mm',
horizontalalignment='center', verticalalignment='center', color="red",
fontsize=8, rotation=90)
#medidas de ancho de plancha 2
plt.arrow(0, -r/3, M, 0,
          head_width=r/5, head_length=r/5, fc="black", ec="black",
length_includes_head=True)

plt.arrow(M, -r/3, -M, 0,
          head_width=r/5, head_length=r/5, fc="black", ec="black",
length_includes_head=True)

plt.plot([0, 0], [0,-r/3], color="red", linewidth=1,linestyle='--')
plt.plot([M, M], [0,-r/3], color="red", linewidth=1,linestyle='--')
plt.text(M/2,-r/2, f'{round(M,2)}mm', horizontalalignment='center',
verticalalignment='center', color="red", fontsize=8)

#medidas de ancho de ventana M
plt.arrow(x/2, 2*hy, M, 0,
          head_width=r/5, head_length=r/5, fc="black", ec="black",
length_includes_head=True,zorder=3)

plt.arrow(x/2+M, 2*hy, -M, 0,
          head_width=r/5, head_length=r/5, fc="black", ec="black",
length_includes_head=True,zorder=3)

plt.text((M+x/2)/2+x/2,2*hy+r/4.5, f'{round(M,2)}mm',
horizontalalignment='center', verticalalignment='center', color="red",
fontsize=8)

#flecha de medida ancho planacha 1
plt.arrow(x, 2 * hy + Hw + r/5, 2*M-x, 0,

```

```

        head_width=r/5, head_length=r/5, fc="black", ec="black",
length_includes_head=True)

    plt.arrow(2*M, 2 * hy + Hw + r/5, -(2*M-x), 0,
        head_width=r/5, head_length=r/5, fc="black", ec="black",
length_includes_head=True)

    plt.plot([x, x], [Hw+2*hy,Hw+2*hy+r/5], color="red",
linewidth=1,linestyle='--')
    plt.plot([2*M, 2*M], [Hw+2*hy,Hw+2*hy+r/5], color="red",
linewidth=1,linestyle='--')
    plt.text(M+x,2*hy + Hw + r/2.5, f'{round(2*M-x,2)}mm',
horizontalalignment='center', verticalalignment='center', color="red",
fontsize=8)
    #medidas total de cada escalon
    plt.arrow(0, -r, 2*M+x, 0,
        head_width=r/5, head_length=r/5, fc="black", ec="black",
length_includes_head=True)

    plt.arrow(2*M+x, -r, -(2*M+x), 0,
        head_width=r/5, head_length=r/5, fc="black", ec="black",
length_includes_head=True)

    plt.plot([0, 0], [0,-r], color="red", linewidth=1,linestyle='--')
    plt.plot([2*M+x, 2*M+x], [0,-r], color="red", linewidth=1,linestyle='--')

    plt.text((2*M+x)/2, -3*r/2.5, f'{round(2*M+x,2)}mm',
horizontalalignment='center', verticalalignment='center', color="red",
fontsize=8)

    plt.arrow(2*M+x+r/2.5, 0, 0, 2*hy+Hw,
        head_width=r/5, head_length=r/5, fc="black", ec="black",
length_includes_head=True)

    plt.arrow(2*M+x+r/2.5, 2*hy+Hw, 0, -(2*hy+Hw),
        head_width=r/5, head_length=r/5, fc="black", ec="black",
length_includes_head=True)

    plt.plot([2*M+x,2*M+x+r/2.5], [2*hy+Hw,2*hy+Hw], color="red",
linewidth=1,linestyle='--')
    plt.plot([2*M+x, 2*M+x+r/2.5], [0,0], color="red",
linewidth=1,linestyle='--')
    plt.text(2*M+x+r,(2*hy+Hw)/2, f'{round(2*hy+Hw,2)}mm',
horizontalalignment='center', verticalalignment='center', color="red",
fontsize=8,rotation=90)
    plt.text(M+x/2, Hw + 3*hy / 2, 'PLANCHAS 1',
horizontalalignment='center', verticalalignment='center', color="black",
fontsize=8)

```

```

plt.text(x/2, Hw/2 + hy, 'PLANCHAS', horizontalalignment='center',
verticalalignment='center', color="black", fontsize=8, rotation=90)
plt.text(M/2, hy / 2, 'PLANCHAS', horizontalalignment='center',
verticalalignment='center', color="black", fontsize=8)

```

```

# Configuración del gráfico
plt.xlim([-M, 3 * M])
plt.ylim([-hy, 3 * hy + Hw])

plt.gca().set_aspect('equal', adjustable='box')

plt.show()

```

```

def crearv(self):
    escalon = self.crear_botones_dinamicos()
    potencia = float(self.potencia_entry.get())
    escalones = int(self.escalones_var.get().split()[0])

    # Parámetros geométricos
    D = 42.17 * (potencia ** (1 / 4))
    r = D / 2 # Radio del núcleo
    Hw = 120 * (potencia ** (1 / 4)) # Altura de la ventana
    M = 8.651 * (4.566 + 1 / 0.246) * (potencia ** (1 / 4)) # Distancia
entre columnas
    hy = 32.66 * (potencia ** (1 / 4)) # Altura del yugo

    # Calcular ángulos
    a1 = self.calcular_angulos(escalones)

    # Crear figura y ejes
    #fig = plt.figure()
    fig = plt.figure(figsize=(12, 8))
    ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')

    # Paleta de colores

    colores = plt.colormaps['viridis'](np.linspace(0, 1, len(a1)))

    colecciones = []

```

```

for i, angle in enumerate(a1):
    # Coordenadas iniciales
    x = np.round(D * np.cos(angle), 2)
    y = np.round(D * np.sin(angle), 2)

    # Crear vértices con el prisma centrado en (0, 0, 0)
    vertices = np.array([
        [-M - x / 2, -Hw / 2-hy, -y/2], [M + x / 2, -Hw / 2-hy, -y/2],
        [M + x / 2, Hw / 2+hy, -y/2], [-M - x / 2, Hw / 2+hy, -y/2],
        [-M - x / 2, -Hw / 2-hy, y/2], [M + x / 2, -Hw / 2-hy, y/2],
        [M + x / 2, Hw / 2+hy, y/2], [-M - x / 2, Hw / 2+hy, y/2],
        [-M-x/2,-Hw/2,-y/2],[-x/2,-Hw/2,-y/2],
        [-x/2,Hw/2,-y/2],[-M-x/2,Hw/2,-y/2],
        [-M-x/2,-Hw/2,y/2],[-x/2,-Hw/2,y/2],
        [-x/2,Hw/2,y/2],[-M-x/2,Hw/2,y/2],

        [M+x/2,-Hw/2,-y/2],[x/2,-Hw/2,-y/2],
        [x/2,Hw/2,-y/2],[M+x/2,Hw/2,-y/2],
        [M+x/2,-Hw/2,y/2],[x/2,-Hw/2,y/2],
        [x/2,Hw/2,y/2],[M+x/2,Hw/2,y/2],

        [-M+x/2,-Hw/2,-y/2],[-M+x/2,Hw/2,-y/2],
        [-M+x/2,-Hw/2,y/2],[-M+x/2,Hw/2,y/2],
        [M-x/2,-Hw/2,-y/2],[M-x/2,Hw/2,-y/2],
        [M-x/2,-Hw/2,y/2],[M-x/2,Hw/2,y/2]

    ])

    # Definir caras
    caras = [
        [vertices[0], vertices[1], vertices[16], vertices[8]], # Cara
frontal
        [vertices[11], vertices[19], vertices[2], vertices[3]], #
Cara lateral derecha
        [vertices[8], vertices[24], vertices[25], vertices[11]], #
Cara trasera
        [vertices[9], vertices[17], vertices[18], vertices[10]], #
Cara lateral izquierda
        [vertices[28], vertices[16], vertices[19], vertices[29]], #
Cara superior
        [vertices[1], vertices[5], vertices[6], vertices[2]], # Cara
inferior
        [vertices[2], vertices[3], vertices[7], vertices[6]],
        [vertices[0], vertices[3], vertices[7], vertices[4]],
        [vertices[0], vertices[1], vertices[5], vertices[4]],
        [vertices[24], vertices[25], vertices[27], vertices[26]],

```

```

[vertices[24], vertices[9], vertices[13], vertices[26]],
[vertices[9], vertices[10], vertices[14], vertices[13]],
[vertices[25], vertices[10], vertices[14], vertices[27]],
[vertices[17], vertices[28], vertices[30], vertices[21]],
[vertices[28], vertices[29], vertices[31], vertices[30]],
[vertices[18], vertices[29], vertices[31], vertices[22]],
[vertices[18], vertices[17], vertices[21], vertices[22]],
[vertices[4], vertices[5], vertices[20], vertices[12]],
[vertices[7], vertices[6], vertices[23], vertices[15]],
[vertices[15], vertices[12], vertices[26], vertices[27]],
[vertices[13], vertices[21], vertices[22], vertices[14]],
[vertices[30], vertices[20], vertices[23], vertices[31]],

]

coleccion = Poly3DCollection(
    caras, alpha=1, facecolors=colores[i],zorder=len(a1) - 1 - i
)
colecciones.append((coleccion, i))

# Ordenar las colecciones según la lógica deseada (ejemplo: por
índice)
colecciones.sort(key=lambda c: c[1])

# Añadir las colecciones al gráfico en el orden calculado
for coleccion, _ in colecciones:
    ax.add_collection3d(coleccion)

# Configurar límites de los ejes
ax.set_xlim([-M - D / 2, M + D / 2])
ax.set_ylim([-Hw / 2-hy-10, Hw / 2+hy+10])
ax.set_zlim([-y-10, y+10])
ax.set_xlabel('Eje X')
ax.set_ylabel('Eje Y')
ax.set_zlabel('Eje Z')

# Mostrar la gráfica
plt.show()

def calcular(self, graficar=True):
    try:
        potencia = float(self.potencia_entry.get())
        escalones = int(self.escalones_var.get().split()[0])

```

```

material = self.material_var.get()
escalonesA=list(range(1,escalones+1))
material_data = self.obtener_materiales().get(material)
if not material_data:
    raise ValueError("Material no válido")

e = material_data['e']
fa = material_data['fa']
pe = material_data['pe']

D = 42.17 * (potencia ** (1/4))
r = D / 2
self.resultado_diametro.config(text=f"{D:.3f} mm")
a1 = self.calcular_angulos(escalones)
medidas_x = D * np.cos(a1)
medidas_y = D * np.sin(a1)

# altura de la ventana
Hw=120*(potencia ** (1/4))
#distancia entre columnas
M=8.651*(4.566+1/0.246)*(potencia ** (1/4))
#altura del yugo
hy=32.66*(potencia ** (1/4))
x1 = np.diff(medidas_y, prepend=0)
y1=D * np.cos(a1)
y1 = y1
#calculo de factor de utilizacion
productos = [a * b for a, b in zip(x1, y1)]
Au=sum(productos)*fa
fu=Au/((math.pi)*(r**2))
self.factor_utilizacion.config(text=f'{fu:.4f}')
Nplanchas = x1 * fa / e
#Nplanchas = Nplanchas[::-1]

datos = np.column_stack((np.arange(1, escalones + 1),
medidas_x[::-1], medidas_y[::-1]))

APL2=np.round(hy,2)
LPL2=np.round(M,2)
areaPL2=APL2*LPL2
volumenPL2=(areaPL2*(np.round(Nplanchas))*e/fa)/1000000
pesoPL2=volumenPL2*7.65
perdidasPL2=pesoPL2*pe

APL1=np.round(hy,2)
LPL1=np.round(2*M-y1,2)
volumenPL1=(APL1*LPL1*(np.round(Nplanchas))*e/fa)/1000000

```

```

pesoPL1=volumenPL1*7.65
perdidasPL1=pesoPL1*pe

APL3=np.round(y1,2)
LPL3=np.round(Hw+hy,2)
volumenPL3=(APL3*LPL3*(np.round(Nplanchas))*e/fa)/1000000
pesoPL3=volumenPL3*7.65
perdidasPL3=pesoPL3*pe

#caclulo de resuemn de resultados
volumen_total=(np.sum(volumenPL3))+(np.sum(volumenPL2))+(np.sum(volumenPL1))
peso_total=(np.sum(pesoPL3))+(np.sum(pesoPL2))+(np.sum(pesoPL1))
perdidas_totales=(np.sum(perdidasPL3))+(np.sum(perdidasPL2))+(np.sum(perdidasPL1))

#envio de resultados en la pantalla
self.result_table.delete(*self.result_table.get_children())
for row in datos:
    self.result_table.insert("", tk.END, values=(int(row[0]),
f"{row[1]:.2f}", f"{row[2]:.2f}"))
    self.volumen.config(text=f'{volumen_total*1000:.2f} cm³')
    self.volumenC.config(text=f'{volumen_total/1000:.4f}m³')
    self.Perdidas.config(text=f'{perdidas_totales:.2f} W')
    self.Peso.config(text=f'{peso_total:.2f} Kgr.')
    if graficar:
        self.graficar(r, a1)
data2={ 'Escalon':escalonesA, 'Ancho (mm)':APL2,
        'Largo (mm)':LPL2,
        'N.chapas':2*(np.round(Nplanchas)),
        'Volumnen cm3':np.round(volumenPL2*1000,2),
        'Peso (Kgr.)':np.round(pesoPL2,2),
        'Perdidas (W)':np.round(perdidasPL2,2)
        }

data1={ 'Escalon':escalonesA, 'Ancho (mm)':APL1,
        'Largo (mm)':LPL1,
        'N.chapas':np.round(Nplanchas),
        'Volumnen cm3':np.round(volumenPL1*1000,2),
        'Peso(Kgr.)':np.round(pesoPL1,2),
        'Perdidas (W)':np.round(perdidasPL1,2),
        }

data3={ 'Escalon':escalonesA, 'Ancho (mm)':APL3,
        'Largo (mm)':LPL3,
        'N.chapas':3*(np.round(Nplanchas)),
        'Volumnen cm3':np.round(volumenPL3*1000,2),

```

```

        'Peso (Kgr.)':np.round(pesoPL3,2),
        'Perdidas (W)':np.round(perdidasPL3,2)
    }
    df1=pd.DataFrame(data1)
    df2=pd.DataFrame(data2)
    df3=pd.DataFrame(data3)
    return df1, df2, df3
    return Hw,M, hy, D
except ValueError as e:
    messagebox.showerror("Error", str(e))

def abrir_ventana_resultados(self):
    df1,df2,df3=self.calcular(graficar=False)
    ventana_resultados = tk.Toplevel(self.root)
    ventana_resultados.title("Resultados")
    ventana_resultados.geometry("800x600")
    # Crear y mostrar las tablas en la nueva ventana
    self.crear_tabla(ventana_resultados, df1, "Plancha 1", 0)
    self.crear_tabla(ventana_resultados, df2, "Plancha 2", 1)
    self.crear_tabla(ventana_resultados, df3, "Plancha 3", 2)
def crear_tabla(self, ventana, df, titulo, fila):
    """
    Función para crear y mostrar una tabla dentro de la ventana de
    resultados.
    """
    # Crear un marco para cada tabla
    frame_tabla = tk.Frame(ventana)
    frame_tabla.grid(row=fila, column=0, pady=10, padx=10, sticky="w")

    # Crear la tabla con los datos del DataFrame
    columnas = list(df.columns)
    tabla = ttk.Treeview(frame_tabla, columns=columnas, show="headings",
height=5)

    # Configurar las cabeceras de las columnas
    for col in columnas:
        tabla.heading(col, text=col)
        tabla.column(col, width=100, anchor="center")

    # Insertar los datos de cada fila
    for index, row in df.iterrows():
        tabla.insert("", tk.END, values=list(row))

    # Etiqueta con el título de la tabla
    label_titulo = ttk.Label(frame_tabla, text=titulo, font=("Arial", 12,
"bold"))
    label_titulo.grid(row=0, column=0, pady=5)

```

```

# Mostrar la tabla
tabla.grid(row=1, column=0, padx=10, pady=5)
@staticmethod
def calcular_angulos(escalones):
    if escalones < 1:
        raise ValueError("El número de escalones debe ser al menos 1.")

    x0 = np.ones(escalones)

    def sistema_ecuaciones(x):
        y = np.zeros(escalones)

        if escalones == 1:
            y[0] = np.cos(x[0])**2 - np.sin(x[0])**2
        else:
            y[0] = np.cos(x[0])**2 - np.cos(x[0]) * np.cos(x[1]) -
np.sin(x[0])**2

            for i in range(1, escalones - 1):
                y[i] = (
                    np.sin(x[i - 1]) * np.sin(x[i])
                    - np.cos(x[i]) * np.cos(x[i + 1])
                    + np.cos(x[i])**2
                    - np.sin(x[i])**2
                )

            y[-1] = np.sin(x[-2]) * np.sin(x[-1]) + np.cos(x[-1])**2 -
np.sin(x[-1])**2

        return y

    a1 = fsolve(sistema_ecuaciones, x0) # Solución en radianes
    return a1.tolist()
@staticmethod
def obtener_materiales():
    return {
        'M 110-23 S': {'e': 0.23, 'fa': 0.945, 'pe': 1.45},
        'M 120-23 S': {'e': 0.23, 'fa': 0.945, 'pe': 1.58},
        'M 127-23 S': {'e': 0.23, 'fa': 0.945, 'pe': 1.67},
        'M 120-27 S': {'e': 0.27, 'fa': 0.95, 'pe': 1.58},
        'M 130-27 S': {'e': 0.27, 'fa': 0.95, 'pe': 1.71},
        'M 140-27 S': {'e': 0.27, 'fa': 0.95, 'pe': 1.54},
        'M 120-30 S': {'e': 0.3, 'fa': 0.955, 'pe': 1.58},
        'M 130-30 S': {'e': 0.3, 'fa': 0.955, 'pe': 1.71},
        'M 140-40 S': {'e': 0.3, 'fa': 0.955, 'pe': 1.84},
        'M 150-30 S': {'e': 0.3, 'fa': 0.955, 'pe': 1.97},
        'M 135-35 S': {'e': 0.35, 'fa': 0.96, 'pe': 1.78},
        'M 145-35 S': {'e': 0.35, 'fa': 0.96, 'pe': 1.91},
    }

```

```

'M 155-35 S': {'e': 0.35, 'fa': 0.96, 'pe': 2.04},
'M 165-35 S': {'e': 0.35, 'fa': 0.96, 'pe': 2.17},
'M 105-23 S': {'e': 0.23, 'fa': 0.945, 'pe': 1.38},
'M 114-27 S': {'e': 0.27, 'fa': 0.95, 'pe': 1.50},
'M 117-30 S': {'e': 0.3, 'fa': 0.955, 'pe': 1.55},
'M 125-35 S': {'e': 0.35, 'fa': 0.96, 'pe': 1.65},

}

def graficar(self, r, a1):
    plt.figure()
    plt.title("Dibujo de corte de columna")
    a1 = a1[::-1]

    # Dibujar escalones como rectángulos
    for idx, angle in enumerate(a1, start=1):

        x = r * np.cos(angle)
        y = r * np.sin(angle)

        # Calcula las coordenadas del rectángulo de cada escalón
        rect_x = [-x, -x, x, x, -x]
        rect_y = [-y, y, y, -y, -y]
        arco_centro=(-x,-y)

        #crear figura

        plt.plot(rect_x, rect_y,color='black',linewidth=2)#
        label=f"Escalón {len(a1) - idx + 1} ({np.degrees(angle):.1f}°)"
        plt.fill(rect_x, rect_y,color='thistle',zorder=2) # Relleno para
        mejor visualización
        plt.plot([-x, x], [-y, y], zorder=3)

        arco = np.linspace(0, angle, 100)
        arco_x = 10 * np.cos(arco)+arco_centro[0] # Coordenada x del arco
        arco_y = 10 * np.sin(arco)+arco_centro[1] # Coordenada y del arco
        plt.plot(arco_x, arco_y, linewidth=2, label=f"Ángulo =
{np.degrees(angle):.1f}°", zorder=4)
        plt.plot(r * np.cos(np.linspace(0, 2*np.pi, 100)),r *
np.sin(np.linspace(0, 2*np.pi, 100)),linewidth=r/800, color='black',
zorder=4)

        # Mostrar el ángulo y radio en el vértice
        #plt.text(x * 0.7, y * 0.7, f"{np.degrees(angle):.1f}°",
ha='center', color='blue')
        plt.text(arco_centro[0] + 10, arco_centro[1] ,
f"{np.degrees(angle):.1f}°", fontsize=8,zorder=5)

```

```

        # Línea para la altura
        plt.arrow(-x +2*r , 2*y / 2, 0, -2*y, head_width=4, head_length=4,
fc="blue", ec="blue", length_includes_head=True)
        plt.arrow(-x +2*r , -2*y / 2, 0, +2*y, head_width=4,
head_length=4, fc="blue", ec="blue", length_includes_head=True)
        # Líneas perpendiculares para la altura
        plt.plot([-x, -x + 2*r], [y, y], color="black",
linewidth=1,zorder=1,linestyle='--')
        plt.plot([-x, -x+ 2*r], [-y, -y], color="black", linewidth=1,
zorder=1,linestyle='--')
        # Línea para la base
        plt.arrow(-x, y-2*r, 2*x, 0, head_width=4, head_length=4,
fc="blue", ec="blue", length_includes_head=True)
        plt.arrow(x, y-2*r, -2*x, 0, head_width=4, head_length=4,
fc="blue", ec="blue", length_includes_head=True)
        # Líneas perpendiculares para la base
        plt.plot([-x, -x], [-y, y-2*r], color="blue",
linewidth=1,linestyle='--')
        plt.plot([x, x], [-y, y-2*r], color="blue",
linewidth=1,linestyle='--')

        # Añadir las medidas numéricas
        plt.text(0,y-2*r-r/20, f'{round(2*x,2)}mm',
horizontalalignment='center', verticalalignment='center', color="black",
fontsize=8,zorder=6)
        plt.text(-x+2*r+r/20, 0, f'{round(2*y,2)}mm',
horizontalalignment='center', verticalalignment='center', color="black",
fontsize=8, rotation=90,zorder=6)

    plt.xlim([-r-10, 2*r])
    plt.ylim([-r*2, r+10])
    plt.gca().set_aspect('equal', adjustable='box')
    plt.show()

if __name__ == "__main__":
    root = tk.Tk()
    app = CalculoNucleoApp(root)
    root.mainloop()

```

Elaboración Propia

Apéndice 02. Código de Programación para el diseño del núcleo del transformador utilizando Matlab para un escalón.

```
% Definir el vector inicial para la solucion (todos los valores iniciales en % 1)
x0 = 1;
% Resolver el sistema de ecuaciones no lineales utilizando la funcion 'escalonN'
x = fsolve(@(x) escalonN(x) , x0);
% Convertir la solucion en radianes a grados sexagesimales
x = rad2deg(x);
% Convertir la solucion en grados
disp('La solucion en grados es:');
disp(x);

% trabajaremos con radianes para poder calcular los valores
x1= deg2rad(x);
%Calculamos la seccion geometrica para un escalon
y1=sin(x1);
y2=cos(x1);
y3=y1.*y2;
y4=[x; y1; y2; y3];
sg=y4(4,1);%Calculamos la seccion geometrica
% Mostrar la solucion para un escalon
disp('Resultado: Seno(n1):');
disp(y1);
disp('Resultado: Coseno(n1):');
disp(y2);
disp('Resultado: Seno*Coseno:');
disp(y3);
disp('Resp:      a ');
disp(y4);
disp('Resultado_sg:');
disp(sg);

% calculamos los parametros de las chapas magneticas %Utilizamos materiales
normalizados
fa=[0.945; 0.950; 0.955; 0.960];
%Calculamos la seccion neta del nucleo del transformador para un escalon
Sn1=fa(1,1)*sg;
Sn2=fa(2,1)*sg;
Sn3=fa(3,1)*sg;
Sn4=fa(4,1)*sg;
%Calculamos el factor de utilizacion del nucleo del transformador para un escalon
fu1=4*Sn1/pi;
fu2=4*Sn2/pi;
fu3=4*Sn3/pi;
fu4=4*Sn4/pi;
%Calculamos el factor de hierro del nucleo del transformador para un escalon
ffe1=Sn1;
ffe2=Sn2;
ffe3=Sn3;
ffe4=Sn4;
%Ordenamos los datos calculados
Datos=[0.945 Sn1 fu1 ffe1; 0.950 Sn2 fu2 ffe2; 0.955 Sn3 fu3 ffe3; 0.960 Sn4 fu4
ffe4];
% Mostrar la solucion en los datos calculados
disp('Datos: fa      sn      fu      ffe');
disp(Datos);
```

```

%tabla de los escalones
y5=[y1;y2];
N_Escalones_base=diag(y5(2,:));
N_Escalones_altura=diag(y5(1,:));
% Mostrar la solucion para un escalones para la base y altura
disp('N_escalones base (b1):');
disp(N_Escalones_base);
disp('N_escalones altura (c1):');
disp(N_Escalones_altura);

%Definicion de la funcion que contiene el sistema de ecuaciones no lineales
function y = escalonN(x)
    y(1)=(cos(x(1)))^2-(sin(x(1)))^2; %Ecuacion simplificada para un solo ecuacion
end

```

Elaboración Propia

Apéndice 03. Código de programación para el diseño del núcleo del transformador utilizando Matlab para dos escalones.

```
% Definir el vector inicial para la solucion
x0 = [1,1]; % Asegurate de que el vector inicial tenga la longitud correcta
% Resolver el sistema de ecuaciones no lineales utilizando la funcion 'escalon2'
x = fsolve(@escalon2, x0);
% Convertir la solucion de radianes a grados sexagesimales
x = rad2deg(x);
% Mostrar la solucion en grados
disp('La solucion en grados es:');
disp(x);

x1= deg2rad(x);% trabajaremos con radianes para poder calcular los valores
%Calculamos la seccion geometrica para dos escalones
y1=sin(x1);
y2=cos(x1);
y3=y1.*y2;
y4=[x; y1; y2; y3];
sg=y4(4,1)+y4(4,2)-(y4(2,1)*y4(3,2));%Calculamos la seccion geometrica
% Mostrar la solucion para dos escalones
disp('Resultado: Seno(n):');
disp(y1);
disp('Resultado: Coseno(n):');
disp(y2);
disp('Resultado: Seno*Coseno:');
disp(y3);
disp('Resp:      a      b');
disp(y4);
disp('Resultado_sg:');
disp(sg);

% calculamos los parametros de las chapas magneticas
%Utilizamos materiales normalizados
fa=[0.945; 0.950; 0.955; 0.960];
%Calculamos la seccion neta del nucleo del transformador para dos escalones
Sn1=fa(1,1)*sg;
Sn2=fa(2,1)*sg;
Sn3=fa(3,1)*sg;
Sn4=fa(4,1)*sg;
%Calculamos el factor de utilizacion del nucleo del transformador para dos
escalones
fu1=4*Sn1/pi;
fu2=4*Sn2/pi;
fu3=4*Sn3/pi;
fu4=4*Sn4/pi;
%Calculamos el factor de hierro del nucleo del transformador para dos escalones
ffe1=Sn1;
ffe2=Sn2;
ffe3=Sn3;
ffe4=Sn4;
%Ordenamos los datos calculados
Datos=[0.945 Sn1 fu1 ffe1; 0.950 Sn2 fu2 ffe2; 0.955 Sn3 fu3 ffe3; 0.960 Sn4 fu4
ffe4];
```

```

disp('Datos: fa      sn      fu      ffe');
disp(Datos);

%tabla de los escalones
y5=[y1;y2];
N_Escalones_base=diag(y5(2,:));
N_Escalones_altura=diag(y5(1,:));
% Mostrar la solucion para dos escalones para la base y altura
disp('N_escalones base (b2):');
disp(N_Escalones_base);
disp('N_escalones altura (c2):');
disp(N_Escalones_altura);

%Definicion de la funcion que contiene el sistema de ecuaciones no lineales
function y = escalon2(x)
    y = zeros(2, 1); % Inicializar el vector de salida
    y(1) = (cos(x(1)))^2 - cos(x(1)) * cos(x(2)) - (sin(x(1)))^2;
    y(2) = sin(x(1)) * sin(x(2)) + (cos(x(2)))^2 - (sin(x(2)))^2;
end

```

Elaboración Propia

Apéndice 04. Código de programación para el diseño del núcleo del transformador utilizando Matlab para tres escalones.

```
% Definir el vector inicial para la solucion
x0 = [1,1,1]; % Asegurate de que el vector inicial tenga la longitud correcta
% Resolver el sistema de ecuaciones no lineales utilizando la funcion 'escalon6'
x = fsolve(@escalon3, x0);
% Convertir la solucion de radianes a grados sexagesimales
x = rad2deg(x);
% Mostrar la solucion en grados
disp('La solucion en grados es:');
disp(x);

x1= deg2rad(x);% trabajaremos con radianes para poder calcular los valores
%Calculamos la seccion geometrica para tres escalones
y1=sin(x1);
y2=cos(x1);
y3=y1.*y2;
y4=[x; y1; y2; y3];
sg=y4(4,1)+y4(4,2)+y4(4,3)-(y4(2,1)*y4(3,2))-(y4(2,2)*y4(3,3));%Calculamos la
seccion geometrica
% Mostrar la solucion para tres escalones
disp('Resultado: Seno(n):');
disp(y1);
disp('Resultado: Coseno(n):');
disp(y2);
disp('Resultado: Seno*Coseno:');
disp(y3);
disp('Resp:      a      b      c');
disp(y4);
disp('Resultado_sg:');
disp(sg);

% calculamos los parametros de las chapas magneticas
%Utilizamos materiales normalizados
fa=[0.945; 0.950; 0.955; 0.960];
%Calculamos la seccion neta del nucleo del transformador para tres escalones
Sn1=fa(1,1)*sg;
Sn2=fa(2,1)*sg;
Sn3=fa(3,1)*sg;
Sn4=fa(4,1)*sg;
%Calculamos el factor de utilizacion del nucleo del transformador para tres
escalones
fu1=4*Sn1/pi;
fu2=4*Sn2/pi;
fu3=4*Sn3/pi;
fu4=4*Sn4/pi;
%Calculamos el factor de hierro del nucleo del transformador para tres escalones
ffe1=Sn1;
ffe2=Sn2;
ffe3=Sn3;
ffe4=Sn4;
%Ordenamos los datos calculados
```

```
Datos=[0.945 Sn1 fu1 ffe1; 0.950 Sn2 fu2 ffe2; 0.955 Sn3 fu3 ffe3; 0.960 Sn4 fu4
ffe4];
disp('Datos(3): fa      sn      fu      ffe');
disp(Datos);
```

```
%tabla de los numeros de escalones
y5=[y1;y2];
N_Escalones_base=diag(y5(2,:));
N_Escalones_altura=diag(y5(1,:));
% Mostrar la solucion para tres escalones para la base y altura
disp('N_escalones base b(3):');
disp(N_Escalones_base);
disp('N_escalones altura c(3):');
disp(N_Escalones_altura);
```

```
%Definicion de la funcion que contiene el sistema de ecuaciones no lineales
function y = escalon3(x)
    y = zeros(6, 1); % Inicializar el vector de salida
    y(1) = (cos(x(1)))^2 - cos(x(1)) * cos(x(2)) - (sin(x(1)))^2;
    y(2) = sin(x(1)) * sin(x(2)) - cos(x(2)) * cos(x(3)) + (cos(x(2)))^2 -
(sin(x(2)))^2;
    y(3) = sin(x(2)) * sin(x(3)) + (cos(x(3)))^2 - (sin(x(3)))^2;
end
```

Elaboración Propia

Apéndice 05. Código de programación para el diseño del núcleo del transformador utilizando Matlab para cuatro escalones.

```
% Definir el vector inicial para la solución
x0 = [1 1 1 1]; % Asegurate de que el vector inicial tenga la longitud correcta
% Resolver el sistema de ecuaciones no lineales utilizando la función 'escalón4'
x = fsolve(@escalón4, x0);
% Convertir la solución de radianes a grados sexagesimales
x = rad2deg(x);
% Mostrar la solución en grados
disp('La solución en grados es:');
disp(x);

x1= deg2rad(x);% trabajaremos con radianes para poder calcular los valores
%Calculamos la sección geométrica para cuatro escalones
y1=sin(x1);
y2=cos(x1);
y3=y1.*y2;
y4=[x; y1; y2; y3];
%Calculamos la sección geométrica
sg=y4(4,1)+y4(4,2)+y4(4,3)+y4(4,4)-(y4(2,1)*y4(3,2))-(y4(2,2)*y4(3,3))-
(y4(2,3)*y4(3,4));
% Mostrar la solución para cuatro escalones
disp('Resultado: Seno(n):');
disp(y1);
disp('Resultado: Coseno(n):');
disp(y2);
disp('Resultado: Seno*Coseno:');
disp(y3);
disp('Resp:      a      b      c      d');
disp(y4);
disp('Resultado_sg:');
disp(sg);

% calculamos los parámetros de las chapas magnéticas
%Utilizamos materiales normalizados
fa=[0.945; 0.950; 0.955; 0.960];
%Calculamos la sección neta del núcleo del transformador para cuatro escalones
Sn1=fa(1,1)*sg;
Sn2=fa(2,1)*sg;
Sn3=fa(3,1)*sg;
Sn4=fa(4,1)*sg;
%Calculamos el factor de utilización del núcleo del transformador para cuatro escalones
fu1=4*Sn1/pi;
fu2=4*Sn2/pi;
fu3=4*Sn3/pi;
fu4=4*Sn4/pi;
%Calculamos el factor de hierro del núcleo del transformador para cuatro escalones
ffe1=Sn1;
ffe2=Sn2;
ffe3=Sn3;
ffe4=Sn4;
%Ordenamos los datos calculados
```

```
Datos=[0.945 Sn1 fu1 ffe1; 0.950 Sn2 fu2 ffe2; 0.955 Sn3 fu3 ffe3; 0.960 Sn4 fu4
ffe4];
disp('Datos(4): fa      sn      fu      ffe');
disp(Datos);
```

```
%tabla de los cuatro escalones
y5=[y1;y2];
N_Escalones_base=diag(y5(2,:));
N_Escalones_altura=diag(y5(1,:));
% Mostrar la solución para cuatro escalones para la base y altura
disp('N_escalones base (b4):');
disp(N_Escalones_base);
disp('N_escalones altura (c4):');
disp(N_Escalones_altura);
```

```
%Definición de la función que contiene el sistema de ecuaciones no lineales
function y = escalon4(x)
```

```
    y = zeros(6, 1); % Inicializar el vector de salida
    y(1) = (cos(x(1)))^2 - cos(x(1)) * cos(x(2)) - (sin(x(1)))^2;
    y(2) = sin(x(1)) * sin(x(2)) - cos(x(2)) * cos(x(3)) + (cos(x(2)))^2 -
(sin(x(2)))^2;
    y(3) = sin(x(2)) * sin(x(3)) - cos(x(3)) * cos(x(4)) + (cos(x(3)))^2 -
(sin(x(3)))^2;
    y(4) = sin(x(3)) * sin(x(4)) + cos(x(4))^2 - (sin(x(4)))^2;
end
```

Elaboración Propia

Apéndice 06. Código de programación para el diseño del núcleo del transformador utilizando Matlab para cinco escalones.

```
x0 = [ 1 1 1 1 1]; % Define un vector inicial para la solucion
x = fsolve(@escalon5,x0); %Resuelve el sistema de ecuaciones no lineales
utilizando la funcion 'escalon5'
% Utilizando la funcion 'escalon5'
x = rad2deg(x); %Convierte la solucion de radianes a grados sexagesimales
% Mostrar la solucion en grados
disp('La solucion en grados es:');
disp(x);

x1= deg2rad(x);% trabajaremos con radianes para poder calcular los valores
%Calculamos la seccion geometrica para cinco escalones
y1=sin(x1);
y2=cos(x1);
y3=y1.*y2;
y4=[x; y1; y2; y3];
%Calculamos la seccion geometrica
sg=y4(4,1)+y4(4,2)+y4(4,3)+y4(4,4)+y4(4,5)-(y4(2,1)*y4(3,2))-(y4(2,2)*y4(3,3))-
(y4(2,3)*y4(3,4))-(y4(2,4)*y4(3,5));
% Mostrar la solucion para cinco escalones
disp('Resultado: Seno(n):');
disp(y1);
disp('Resultado: Coseno(n):');
disp(y2);
disp('Resultado: Seno*Coseno:');
disp(y3);
disp('Resp:      a      b      c      d      e');
disp(y4);
disp('Resultado_sg:');
disp(sg);

% calculamos los parametros de las chapas magneticas
%Utilizamos materiales normalizados
fa=[0.945; 0.950; 0.955; 0.960];
%Calculamos la seccion neta del nucleo del transformador para cinco escalones
Sn1=fa(1,1)*sg;
Sn2=fa(2,1)*sg;
Sn3=fa(3,1)*sg;
Sn4=fa(4,1)*sg;
%Calculamos el factor de utilizacion del nucleo del transformador para cinco
escalones
fu1=4*Sn1/pi;
fu2=4*Sn2/pi;
fu3=4*Sn3/pi;
fu4=4*Sn4/pi;
%Calculamos el factor de hierro del nucleo del transformador para cinco escalones
ffe1=Sn1;
ffe2=Sn2;
ffe3=Sn3;
ffe4=Sn4;
%Ordenamos los datos calculados
Datos=[0.945 Sn1 fu1 ffe1; 0.950 Sn2 fu2 ffe2; 0.955 Sn3 fu3 ffe3; 0.960 Sn4 fu4
ffe4];
disp('Datos(5): fa      sn      fu      ffe');
```

```

disp(Datos);

%tabla de los escalones
y5=[y1;y2];
N_Escalones_base=diag(y5(2,:));
N_Escalones_altura=diag(y5(1,:));
% Mostrar la solucion para cinco escalones para la base y altura
disp('N_escalones base (b5):');
disp(N_Escalones_base);
disp('N_escalones altura (c5):');
disp(N_Escalones_altura);

% Mostrar la solucion en grados
function [y] = escalon5(x)
    y(1) = (cos(x(1)))^2 - cos(x(1))*cos(x(2))-(sin(x(1)))^2;
    y(2) = sin(x(1))*sin(x(2))-cos(x(2))*cos(x(3))+cos((x(2)))^2-(sin(x(2)))^2;
    y(3) = sin(x(2))*sin(x(3))-cos(x(3))*cos(x(4))+cos((x(3)))^2-(sin(x(3)))^2;
    y(4) = sin(x(3))*sin(x(4))-cos(x(4))*cos(x(5))+cos((x(4)))^2-(sin(x(4)))^2;
    y(5) = (cos(x(5)))^2 - (sin(x(5)))^2 + sin(x(5))*sin(x(4));
end

```

Elaboración Propia

Apéndice 07. Código de programación para el diseño del núcleo del transformador utilizando Matlab para seis escalones.

```
x0 = [ 1 1 1 1 1 1]; % Define un vector inicial para la solucion
x = fsolve(@escalon6,x0); %Resuelve el sistema de ecuaciones no lineales
utilizando la funcion 'escalon6'
% Utilizando la funcion 'escalon6'
x = rad2deg(x); %Convierte la solucion de radianes a grados sexagesimales
% Mostrar la solucion en grados
disp('La solucion en grados es:');
disp(x);

x1= deg2rad(x);% trabajaremos con radianes para poder calcular los valores
%Calculamos la seccion geometrica para seis escalones
y1=sin(x1);
y2=cos(x1);
y3=y1.*y2;
y4=[x; y1; y2; y3];
%Calculamos la seccion geometrica
sg=y4(4,1)+y4(4,2)+y4(4,3)+y4(4,4)+y4(4,5)+y4(4,6)-(y4(2,1)*y4(3,2))-
(y4(2,2)*y4(3,3))-(y4(2,3)*y4(3,4))-(y4(2,4)*y4(3,5))-(y4(2,5)*y4(3,6));
% Mostrar la solucion para seis escalones
disp('Resultado: Seno(n):');
disp(y1);
disp('Resultado: Coseno(n):');
disp(y2);
disp('Resultado: Seno*Coseno:');
disp(y3);
disp('Resp:      a      b      c      d      e      f');
disp(y4);
disp('Resultado_sg:');
disp(sg);

% calculamos los parametros de las chapas magneticas
%Utilizamos materiales normalizados
fa=[0.945; 0.950; 0.955; 0.960];
%Calculamos la seccion neta del nucleo del transformador para seis escalones
Sn1=fa(1,1)*sg;
Sn2=fa(2,1)*sg;
Sn3=fa(3,1)*sg;
Sn4=fa(4,1)*sg;
%Calculamos el factor de utilizacion del nucleo del transformador para seis
escalones
fu1=4*Sn1/pi;
fu2=4*Sn2/pi;
fu3=4*Sn3/pi;
fu4=4*Sn4/pi;
%Calculamos el factor de hierro del nucleo del transformador para seis escalones
ffe1=Sn1;
ffe2=Sn2;
ffe3=Sn3;
ffe4=Sn4;
%Ordenamos los datos calculados
```

```
Datos=[0.945 Sn1 fu1 ffe1; 0.950 Sn2 fu2 ffe2; 0.955 Sn3 fu3 ffe3; 0.960 Sn4 fu4
ffe4];
disp('Datos(6): fa      sn      fu      ffe');
disp(Datos);
```

```
%tabla de los escalones
```

```
y5=[y1;y2];
```

```
N_Escalones_base=diag(y5(2,:));
```

```
N_Escalones_altura=diag(y5(1,:));
```

```
% Mostrar la solución para seis escalones para la base y altura
```

```
disp('N_escalones base (b6):');
```

```
disp(N_Escalones_base);
```

```
disp('N_escalones altura (c6):');
```

```
disp(N_Escalones_altura);
```

```
% Mostrar la solución en grados
```

```
function [y] = escalon6(x)
```

```
    y(1) = (cos(x(1)))^2 - cos(x(1))*cos(x(2))-(sin(x(1)))^2;
```

```
    y(2) = cos((x(2)))^2 - (sin(x(2)))^2 + sin(x(1))*sin(x(2))-cos(x(2))*cos(x(3));
```

```
    y(3) = cos((x(3)))^2 - (sin(x(3)))^2 + sin(x(2))*sin(x(3))-cos(x(3))*cos(x(4));
```

```
    y(4) = cos((x(4)))^2 - (sin(x(4)))^2 + sin(x(3))*sin(x(4))-cos(x(4))*cos(x(5));
```

```
    y(5) = cos((x(5)))^2 - (sin(x(5)))^2 + sin(x(4))*sin(x(5))-cos(x(5))*cos(x(6));
```

```
    y(6) = (cos(x(6)))^2 - (sin(x(6)))^2 + sin(x(5))*sin(x(6));
```

```
end
```

Elaboración Propia

Apéndice 08. Código de programación para el diseño del núcleo del transformador utilizando Matlab para siete escalones

```

x0 = [ 1 1 1 1 1 1 1]; % Define un vector inicial para la solucion
x = fsolve(@escalon7,x0); %Resuelve el sistema de ecuaciones no lineales
utilizando la funcion 'escalon7'
% Utilizando la funcion 'escalon7'
x = rad2deg(x); %Convierte la solucion de radianes a grados sexagesimales
% Mostrar la solucion en grados
disp('La solucion en grados es:');
disp(x);

x1= deg2rad(x);% trabajaremos con radianes para poder calcular los valores
%Calculamos la seccion geometrica para siete escalones
y1=sin(x1);
y2=cos(x1);
y3=y1.*y2;
y4=[x; y1; y2; y3];
%Calculamos la seccion geometrica
sg=y4(4,1)+y4(4,2)+y4(4,3)+y4(4,4)+y4(4,5)+y4(4,6)+y4(4,7)-(y4(2,1)*y4(3,2))-
(y4(2,2)*y4(3,3))-(y4(2,3)*y4(3,4))-(y4(2,4)*y4(3,5))-(y4(2,5)*y4(3,6))-
(y4(2,6)*y4(3,7));
% Mostrar la solucion para siete escalones
disp('Resultado: Seno(n):');
disp(y1);
disp('Resultado: Coseno(n):');
disp(y2);
disp('Resultado: Seno*Coseno:');
disp(y3);
disp('Resp:      a      b      c      d      e      f      g');
disp(y4);
disp('Resultado_sg:');
disp(sg);

% calculamos los parametros de las chapas magneticas
%Utilizamos materiales normalizados
fa=[0.945; 0.950; 0.955; 0.960];
%Calculamos la seccion neta del nucleo del transformador para siete escalones
Sn1=fa(1,1)*sg;
Sn2=fa(2,1)*sg;
Sn3=fa(3,1)*sg;
Sn4=fa(4,1)*sg;
%Calculamos el factor de utilizacion del nucleo del transformador para siete
escalones
fu1=4*Sn1/pi;
fu2=4*Sn2/pi;
fu3=4*Sn3/pi;
fu4=4*Sn4/pi;
%Calculamos el factor de hierro del nucleo del transformador para siete escalones
ffe1=Sn1;
ffe2=Sn2;
ffe3=Sn3;
ffe4=Sn4;
%Ordenamos los datos calculados

```

```
Datos=[0.945 Sn1 fu1 ffe1; 0.950 Sn2 fu2 ffe2; 0.955 Sn3 fu3 ffe3; 0.960 Sn4 fu4
ffe4];
disp('Datos(7): fa      sn      fu      ffe');
disp(Datos);
```

```
%tabla de los escalones
y5=[y1;y2];
N_Escalones_base=diag(y5(2,:));
N_Escalones_altura=diag(y5(1,:));
% Mostrar la solución para siete escalones para la base y altura
disp('N_escalones base (b7):');
disp(N_Escalones_base);
disp('N_escalones altura (c7):');
disp(N_Escalones_altura);
```

```
function [y] = escalon7(x)
    y(1) = (cos(x(1)))^2 - cos(x(1))*cos(x(2))-(sin(x(1)))^2;
    y(2) = cos((x(2)))^2 - (sin(x(2)))^2 + sin(x(1))*sin(x(2))-cos(x(2))*cos(x(3));
    y(3) = cos((x(3)))^2 - (sin(x(3)))^2 + sin(x(2))*sin(x(3))-cos(x(3))*cos(x(4));
    y(4) = cos((x(4)))^2 - (sin(x(4)))^2 + sin(x(3))*sin(x(4))-cos(x(4))*cos(x(5));
    y(5) = cos((x(5)))^2 - (sin(x(5)))^2 + sin(x(4))*sin(x(5))-cos(x(5))*cos(x(6));
    y(6) = cos((x(6)))^2 - (sin(x(6)))^2 + sin(x(5))*sin(x(6))-cos(x(6))*cos(x(7));
    y(7) = (cos(x(7)))^2 - (sin(x(7)))^2 + sin(x(6))*sin(x(7));
end
```

Elaboración Propia

Apéndice 09. Código de programación para el diseño del núcleo del transformador utilizando Matlab para ocho escalones.

```
x0 = [ 1 1 1 1 1 1 1 1]; % Define un vector inicial para la solucion
x = fsolve(@escalon8,x0); %Resuelve el sistema de ecuaciones no lineales
utilizando la funcion 'escalon8'
% Utilizando la funcion 'escalon8'
x = rad2deg(x); %Convierte la solucion de radianes a grados sexagesimales
% Mostrar la solucion en grados
disp('La solucion en grados es:');
disp(x);

x1= deg2rad(x);% trabajaremos con radianes para poder calcular los valores
%Calculamos la seccion geometrica para ocho escalones
y1=sin(x1);
y2=cos(x1);
y3=y1.*y2;
y4=[x; y1; y2; y3];
%Calculamos la seccion geometrica
sg=y4(4,1)+y4(4,2)+y4(4,3)+y4(4,4)+y4(4,5)+y4(4,6)+y4(4,7)+y4(4,8)..
-(y4(2,1)*y4(3,2))-(y4(2,2)*y4(3,3))-(y4(2,3)*y4(3,4))-(y4(2,4)*y4(3,5))..
-(y4(2,5)*y4(3,6))-(y4(2,6)*y4(3,7))-(y4(2,7)*y4(3,8));
% Mostrar la solucion para ocho escalones
disp('Resultado: Seno(n):');
disp(y1);
disp('Resultado: Coseno(n):');
disp(y2);
disp('Resultado: Seno*Coseno:');
disp(y3);
disp('Resp:      a      b      c      d      e      f      g
h');
disp(y4);
disp('Resultado_sg:');
disp(sg);

% calculamos los parametros de las chapas magneticas
%Utilizamos materiales normalizados
fa=[0.945; 0.950; 0.955; 0.960];
%Calculamos la seccion neta del nucleo del transformador para ocho escalones
Sn1=fa(1,1)*sg;
Sn2=fa(2,1)*sg;
Sn3=fa(3,1)*sg;
Sn4=fa(4,1)*sg;
%Calculamos el factor de utilizacion del nucleo del transformador para ocho
escalones
fu1=4*Sn1/pi;
fu2=4*Sn2/pi;
fu3=4*Sn3/pi;
fu4=4*Sn4/pi;
%Calculamos el factor de hierro del nucleo del transformador para ocho escalones
ffe1=Sn1;
ffe2=Sn2;
ffe3=Sn3;
ffe4=Sn4;
%Ordenamos los datos calculados
```

```
Datos=[0.945 Sn1 fu1 ffe1; 0.950 Sn2 fu2 ffe2; 0.955 Sn3 fu3 ffe3; 0.960 Sn4 fu4
ffe4];
disp('Datos(8): fa      sn      fu      ffe');
disp(Datos);
```

```
%tabla de los escalones
y5=[y1;y2];
N_Escalones_base=diag(y5(2,:));
N_Escalones_altura=diag(y5(1,:));
% Mostrar la solución para ocho escalones para la base y altura
disp('N_escalones base (b8):');
disp(N_Escalones_base);
disp('N_escalones altura (c8):');
disp(N_Escalones_altura);
```

```
function [y] = escalon8(x)
    y(1) = (cos(x(1)))^2 - cos(x(1))*cos(x(2))-(sin(x(1)))^2;
    y(2) = cos((x(2)))^2 - (sin(x(2)))^2 + sin(x(1))*sin(x(2))-cos(x(2))*cos(x(3));
    y(3) = cos((x(3)))^2 - (sin(x(3)))^2 + sin(x(2))*sin(x(3))-cos(x(3))*cos(x(4));
    y(4) = cos((x(4)))^2 - (sin(x(4)))^2 + sin(x(3))*sin(x(4))-cos(x(4))*cos(x(5));
    y(5) = cos((x(5)))^2 - (sin(x(5)))^2 + sin(x(4))*sin(x(5))-cos(x(5))*cos(x(6));
    y(6) = cos((x(6)))^2 - (sin(x(6)))^2 + sin(x(5))*sin(x(6))-cos(x(6))*cos(x(7));
    y(7) = cos((x(7)))^2 - (sin(x(7)))^2 + sin(x(6))*sin(x(7))-cos(x(7))*cos(x(8));
    y(8) = (cos(x(8)))^2 - (sin(x(8)))^2 + sin(x(7))*sin(x(8));
end
```

Elaboración Propia

Apéndice 10. Código de programación para el diseño del núcleo del transformador utilizando Matlab para nueve escalones.

```

x0 = [ 1 1 1 1 1 1 1 1 1]; % Define un vector inicial para la solucion
x = fsolve(@escalon9,x0); %Resuelve el sistema de ecuaciones no lineales
utilizando la funcion 'escalon9'
% Utilizando la funcion 'escalon9'
x = rad2deg(x); %Convierte la solucion de radianes a grados sexagesimales
% Mostrar la solucion en grados
disp('La solucion en grados es:');
disp(x);

x1= deg2rad(x);% trabajaremos con radianes para poder calcular los valores
%Calculamos la seccion geometrica para nueve escalones
y1=sin(x1);
y2=cos(x1);
y3=y1.*y2;
y4=[x; y1; y2; y3];
%Calculamos la seccion geometrica
sg=y4(4,1)+y4(4,2)+y4(4,3)+y4(4,4)+y4(4,5)+y4(4,6)+y4(4,7)+y4(4,8)+y4(4,9) -
(y4(2,1)*y4(3,2))-(y4(2,2)*y4(3,3))-(y4(2,3)*y4(3,4))-(y4(2,4)*y4(3,5))-
(y4(2,5)*y4(3,6))-(y4(2,6)*y4(3,7))-(y4(2,7)*y4(3,8))-(y4(2,8)*y4(3,9));
% Mostrar la solucion para nueve escalones
disp('Resultado: Seno(n):');
disp(y1);
disp('Resultado: Coseno(n):');
disp(y2);
disp('Resultado: Seno*Coseno:');
disp(y3);
disp('Resp:      a      b      c      d      e      f      g
h      i');
disp(y4);
disp('Resultado_sg:');
disp(sg);

% calculamos los parametros de las chapas magneticas
%Utilizamos materiales normalizados
fa=[0.945; 0.950; 0.955; 0.960];
%Calculamos la seccion neta del nucleo del transformador para nueve escalones
Sn1=fa(1,1)*sg;
Sn2=fa(2,1)*sg;
Sn3=fa(3,1)*sg;
Sn4=fa(4,1)*sg;
%Calculamos el factor de utilizacion del nucleo del transformador para nueve
escalones
fu1=4*Sn1/pi;
fu2=4*Sn2/pi;
fu3=4*Sn3/pi;
fu4=4*Sn4/pi;
%Calculamos el factor de hierro del nucleo del transformador para nueve escalones
ffe1=Sn1;
ffe2=Sn2;
ffe3=Sn3;
ffe4=Sn4;
%Ordenamos los datos calculados

```

```
Datos=[0.945 Sn1 fu1 ffe1; 0.950 Sn2 fu2 ffe2; 0.955 Sn3 fu3 ffe3; 0.960 Sn4 fu4
ffe4];
disp('Datos(9): fa      sn      fu      ffe');
disp(Datos);
```

```
%tabla de los escalones
y5=[y1;y2];
N_Escalones_base=diag(y5(2,:));
N_Escalones_altura=diag(y5(1,:));
% Mostrar la solución para nueve escalones para la base y altura
disp('N_escalones base (b9):');
disp(N_Escalones_base);
disp('N_escalones altura (c9):');
disp(N_Escalones_altura);
```

```
function [y] = escalon9(x)
y(1) = (cos(x(1)))^2 - (sin(x(1)))^2 - cos(x(1))*cos(x(2));
y(2) = cos((x(2)))^2 - (sin(x(2)))^2 + sin(x(1))*sin(x(2))-cos(x(2))*cos(x(3));
y(3) = cos((x(3)))^2 - (sin(x(3)))^2 + sin(x(2))*sin(x(3))-cos(x(3))*cos(x(4));
y(4) = cos((x(4)))^2 - (sin(x(4)))^2 + sin(x(3))*sin(x(4))-cos(x(4))*cos(x(5));
y(5) = cos((x(5)))^2 - (sin(x(5)))^2 + sin(x(4))*sin(x(5))-cos(x(5))*cos(x(6));
y(6) = cos((x(6)))^2 - (sin(x(6)))^2 + sin(x(5))*sin(x(6))-cos(x(6))*cos(x(7));
y(7) = cos((x(7)))^2 - (sin(x(7)))^2 + sin(x(6))*sin(x(7))-cos(x(7))*cos(x(8));
y(8) = cos((x(8)))^2 - (sin(x(8)))^2 + sin(x(7))*sin(x(8))-cos(x(8))*cos(x(9));
y(9) = (cos(x(9)))^2 - (sin(x(9)))^2 + sin(x(8))*sin(x(9));
end
```

Elaboración Propia

Apéndice 11. Código de programación para el diseño del núcleo del transformador utilizando Matlab para diez escalones.

```
x0 = [ 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1]; % Define un vector inicial para la solucion
x = fsolve(@escalon10,x0); %Resuelve el sistema de ecuaciones no lineales
utilizando la funcion 'escalon10'
% Utilizando la funcion 'escalon10'
x = rad2deg(x); %Convierte la solucion de radianes a grados sexagesimales
% Mostrar la solucion en grados
disp('La solucion en grados es:');
disp(x);

x1= deg2rad(x);% trabajaremos con radianes para poder calcular los valores
%Calculamos la seccion geometrica para diez escalones
y1=sin(x1);
y2=cos(x1);
y3=y1.*y2;
y4=[x; y1; y2; y3];
%Calculamos la seccion geometrica
sg=y4(4,1)+y4(4,2)+y4(4,3)+y4(4,4)+y4(4,5)+y4(4,6)+y4(4,7)+y4(4,8)+y4(4,9)+y4(4,10)
)-(y4(2,1)*y4(3,2))-(y4(2,2)*y4(3,3))-(y4(2,3)*y4(3,4))-(y4(2,4)*y4(3,5))-
(y4(2,5)*y4(3,6))-(y4(2,6)*y4(3,7))-(y4(2,7)*y4(3,8))-(y4(2,8)*y4(3,9))-
(y4(2,9)*y4(3,10));
% Mostrar la solucion para diez escalones
disp('Resultado: Seno(n):');
disp(y1);
disp('Resultado: Coseno(n):');
disp(y2);
disp('Resultado: Seno*Coseno:');
disp(y3);
disp('Resp:      a      b      c      d      e      f      g
h      i      j');
disp(y4);
disp('Resultado_sg:');
disp(sg);

% calculamos los parametros de las chapas magneticas
%Utilizamos materiales normalizados
fa=[0.945; 0.950; 0.955; 0.960];
%Calculamos la seccion neta del nucleo del transformador para diez escalones
Sn1=fa(1,1)*sg;
Sn2=fa(2,1)*sg;
Sn3=fa(3,1)*sg;
Sn4=fa(4,1)*sg;
%Calculamos el factor de utilizacion del nucleo del transformador para diez
escalones
fu1=4*Sn1/pi;
fu2=4*Sn2/pi;
fu3=4*Sn3/pi;
fu4=4*Sn4/pi;
%Calculamos el factor de hierro del nucleo del transformador para diez escalones
ffe1=Sn1;
ffe2=Sn2;
ffe3=Sn3;
ffe4=Sn4;
%Ordenamos los datos calculados
```

```
Datos=[0.945 Sn1 fu1 ffe1; 0.950 Sn2 fu2 ffe2; 0.955 Sn3 fu3 ffe3; 0.960 Sn4 fu4
ffe4];
disp('Datos(10): fa      sn      fu      ffe');
disp(Datos);
```

```
%tabla de los escalones
```

```
y5=[y1;y2];
N_Escalones_base=diag(y5(2,:));
N_Escalones_altura=diag(y5(1,:));
% Mostrar la solución para diez escalones para la base y altura
disp('N_escalones base (b10):');
disp(N_Escalones_base);
disp('N_escalones altura (c10):');
disp(N_Escalones_altura);
```

```
function [y] = escalon10(x)
    y(1) = (cos(x(1)))^2 - (sin(x(1)))^2 - cos(x(1))*cos(x(2));
    y(2) = cos((x(2)))^2 - (sin(x(2)))^2 + sin(x(1))*sin(x(2))-cos(x(2))*cos(x(3));
    y(3) = cos((x(3)))^2 - (sin(x(3)))^2 + sin(x(2))*sin(x(3))-cos(x(3))*cos(x(4));
    y(4) = cos((x(4)))^2 - (sin(x(4)))^2 + sin(x(3))*sin(x(4))-cos(x(4))*cos(x(5));
    y(5) = cos((x(5)))^2 - (sin(x(5)))^2 + sin(x(4))*sin(x(5))-cos(x(5))*cos(x(6));
    y(6) = cos((x(6)))^2 - (sin(x(6)))^2 + sin(x(5))*sin(x(6))-cos(x(6))*cos(x(7));
    y(7) = cos((x(7)))^2 - (sin(x(7)))^2 + sin(x(6))*sin(x(7))-cos(x(7))*cos(x(8));
    y(8) = cos((x(8)))^2 - (sin(x(8)))^2 + sin(x(7))*sin(x(8))-cos(x(8))*cos(x(9));
    y(9) = cos((x(9)))^2 - (sin(x(9)))^2 + sin(x(8))*sin(x(9))-cos(x(9))*cos(x(10));
    y(10) = (cos(x(10)))^2 - (sin(x(10)))^2 + sin(x(9))*sin(x(10));
end
```

Elaboración Propia