

# Proyecto Trabajo Final

Agosto. 2015



## CÁLCULO DE TRANSFORMADORES

**Autor**  
**Alumno:** Cabrera, Julio Adolfo  
**Carrera:** Ingeniería Eléctrica

**Tutor:** Dimenna, Claudio  
**Co-Tutor:** Macri, Mario

**Evaluadores:** Di Mauro, Guillermo  
Suarez, Juan Antonio  
Stecca, Juan Carlos



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-  
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

*A Dios  
A mi familia  
A mis amigos*

*Dedico esta tesis A. Dios. A mis padres quienes me dieron vida, educación, apoyo y el mejor ejemplo. A mi esposa que me ha acompañado hasta el fin del mundo solamente con una promesa de amor, a mis compañeros de estudio, a mis maestros y amigos, a ellos quiero agradecerles por haber hecho que estos años sean más que un concepto aprendido o un número en un papel transformándolos en experiencias que marcarán mi vida para siempre.*

## INDICE

1	INTRODUCCION .....	5
2	OBJETIVOS.....	6
3	JUSTIFICACIÓN.....	7
4	ANTECEDENTES, ESTADO DEL ARTE .....	7
4.1	EVOLUCIÓN DEL TRANSFORMADOR .....	7
4.2	DEFINICIONES FUNDAMENTALES .....	10
4.2.1	LA CONSTRUCCIÓN DEL NÚCLEO.....	10
4.2.2	ELEMENTOS DE LOS NÚCLEOS DE TRANSFORMADORES.....	11
4.2.3	TIPOS DE NÚCLEOS.....	11
4.2.4	NÚCLEO MONOFÁSICO.....	12
4.2.5	NÚCLEO TRIFÁSICO.....	12
4.2.6	TIPO ACORAZADO.....	12
4.2.7	HERRAJES O ARMADURA.....	13
4.2.8	“LOS DEVANADOS DE LOS TRANSFORMADORES” .....	13
4.2.9	DEVANADOS DE BAJA TENSIÓN.....	13
4.2.10	DEVANADOS DE ALTA TENSIÓN.....	13
4.2.11	POSICIÓN DE LOS DEVANADOS.....	14
4.2.12	AISLAMIENTO EXTERNO DE LOS DEVANADOS.....	14
4.2.13	CONEXIÓN DE LOS DEVANADOS.....	15
4.2.14	MATERIALES ELÉCTRICOS USADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE TRANSFORMADORES.....	15
4.2.15	MÉTODOS DE ENFRIAMIENTO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA.....	16
4.2.16	FUNDAMENTO FÍSICO DEL TRANSFORMADOR.....	16
4.2.17	EL TRANSFORMADOR REAL.....	19
4.2.18	LA RELACIÓN DE TENSIÓN A TRAVÉS DE UN TRANSFORMADOR.....	20
4.2.19	LA CORRIENTE DE MAGNETIZACIÓN.....	23
4.2.20	CIRCUITOS EQUIVALENTES.....	23
4.2.21	REGULACIÓN DE TENSIÓN.....	25
4.3	PROCESO DE CÁLCULO DE UN TRANSFORMADOR.....	26
4.3.1	DATOS PRINCIPALES.....	27
4.3.2	DIMENSIONES DEL NÚCLEO .....	27



4.3.3	BOBINADOS.....	32
4.3.4	DISTANCIAS AISLANTES.....	33
4.3.5	DISTRIBUCIÓN DEL BOBINADO.....	36
4.3.6	CALENTAMIENTO DE LOS BOBINADOS.....	39
4.3.7	DIMENSIONES DE LA CUBA.....	40
4.3.8	PÉRDIDAS TOTALES.....	41
4.3.9	CALENTAMIENTO.....	44
4.3.10	CONEXIÓN DEL TRANSFORMADOR.....	47
4.3.11	RELÉ BUCHHOLZ.....	48
4.4	UTILIZACIÓN DE ENTORNO GRAFICO EN MATLAB.....	49
4.4.1	INTRODUCCIÓN.....	49
4.4.2	Inicio.....	50
4.4.3	Propiedades de los componentes.....	53
4.4.4	Funcionamiento de una aplicación GUI.....	54
4.4.5	Manejo de datos entre los elementos de la aplicación y el archivo .m.....	55
4.4.6	Sentencias GET y SET.....	55
4.4.7	Manipulación de archivos.....	56
4.4.8	Formatos de archivo.....	57
4.4.9	Cargar datos usando load.....	57
4.4.10	Entrada y Salida de bajo nivel.....	58
4.4.11	¿Qué es el formato?.....	59
5	METODOLOGÍA Y RESULTADOS.....	61
5.1	DIAGRAMA DE FLUJO.....	61
5.2	CREACIÓN DE INTERFAZ DE INGRESO DE PARÁMETROS DEL TRANSFORMADOR.....	62
5.2.1	CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR, PARÁMETROS INICIALES.....	62
5.2.2	CÁLCULO DE TENSIONES Y CORRIENTES POR BOBINAS.....	65
5.2.3	CÁLCULO DE DIMENSIONES DEL NÚCLEO.....	69
5.2.4	ESTANDARIZACIÓN DE VALORES CALCULADOS.....	71
5.2.5	CÁLCULO DE PÉRDIDAS Y VERIFICACIÓN DEL CALENTAMIENTO MÁXIMO.....	71
5.2.6	DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LA CUBA.....	73
5.2.7	CÁLCULO DE PÉRDIDAS.....	74

5.2.8	CÁLCULO DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS.....	75
5.2.9	CÁLCULO DE REFRIGERACIÓN.....	76
5.2.10	MODELADO Y COORDINACIÓN DE PROTECCIONES.....	79
5.3	INTERFAZ DE OBTENCIÓN DE DATOS.....	80
5.3.1	INICIO DEL PROGRAMA.....	80
5.3.2	VALORES DE DISEÑO.....	82
5.3.3	PANEL BOBINADOS.....	83
5.3.4	PANEL DIMENSIONES.....	84
5.3.5	PANEL AISLACIONES.....	85
5.3.6	PANEL PÉRDIDAS.....	86
5.3.7	PANEL PARÁMETROS.....	87
5.3.8	PANEL MODELADO.....	88
5.3.9	MENÚ DE REPORTES.....	91
5.3.10	MENÚ DE PROTECCIONES.....	92
6	CONCLUSIONES Y PROPUESTAS.....	95
6.1	RESULTADOS.....	95
6.2	IMPACTO AMBIENTAL.....	95
6.3	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	96
7	RESUMEN.....	97
8	BIBLIOGRAFÍA.....	97
9	ANEXO.....	98



## 1 INTRODUCCION

La invención del transformador y el desarrollo simultáneo de las fuentes de potencia alterna eliminaron para siempre las restricciones referentes al alcance y al nivel de tensión de los sistemas de potencia.

Un transformador cambia, idealmente, a un nivel de tensión alterno a otro nivel de tensión sin afectar la potencia que se suministra. Si un transformador eleva el nivel de tensión en un circuito, debe disminuir la corriente para mantener la potencia que entra en el dispositivo igual a la potencia que sale de él. De esta manera, a la potencia eléctrica alterna que se genera en un sitio determinado, se le eleva la tensión para transmitirla a largas distancias con pocas pérdidas y luego se reduce para dejarla nuevamente en el nivel de utilización final. Puesto que las pérdidas de transmisión en las líneas de un sistema de potencia son proporcionales al cuadrado de la corriente, al elevar con transformadores 10 veces la tensión de transmisión, se reduce la corriente en el mismo número de veces, y las pérdidas de transmisión se reducen 100 veces. Sin el transformador simplemente no sería posible utilizar la potencia eléctrica en muchas de las formas que se utilizan hoy en día.

En un sistema moderno de potencia se genera potencia eléctrica a tensiones de 12 a 25KV. Los transformadores elevan la tensión hasta niveles comprendidos entre 110KV y cerca de 1000 KV para ser transmitida a grandes distancias con pocas pérdidas. Posteriormente, los transformadores bajan la tensión a un nivel entre 12KV y 66KV para su distribución local y para permitir que la potencia eléctrica se pueda utilizar con seguridad en los hogares, oficinas y fábricas a voltajes tan bajos como 380-220V.

El sistema de transmisión y distribución por corriente alterna se ha hecho casi universal a causa de que el transformador hace posible el funcionamiento de las diferentes partes del sistema a sus tensiones más adecuadas. Otros factores importantes que favorecen los sistemas de corriente alterna son las excelentes cualidades de los generadores síncronos y de los motores de inducción. No es exagerado afirmar que sin la simplicidad, manejabilidad y gran rendimiento del transformador, no hubiera sido posible el enorme desarrollo de los sistemas de transmisión y distribución eléctrica de los últimos cincuenta años.

Los transformadores son, probablemente, los aparatos electromagnéticos más ampliamente utilizados. Varían muchísimo en tamaño y deben diseñarse para reunir los requisitos de una gran variedad de condiciones de funcionamiento. Por ejemplo, los transformadores de sistemas de potencia suelen funcionar con tensión y frecuencia nominalmente constantes, y tiene más importancia un buen rendimiento, puesto que la potencia que interviene es grande.

Los transformadores de los sistemas de potencia se clasifican en transformadores de potencia y transformadores de distribución, según se utilicen ordinariamente en las centrales y subcentrales generadoras de potencia o en las redes de distribución. Los transformadores montados en lo alto de postes o subterráneos, constituyen la última transformación de tensión entre el sistema de la central y el consumidor de la energía eléctrica reciben el nombre de transformadores de distribución. Constituyen un elemento importantísimo entre los transformadores fabricados. Los transformadores de distribución se fabrican de tensión y frecuencia normalizadas y de potencias aparentes que llegan hasta los 1000 KVA. Se fabrican siempre en serie, y los menores suelen encontrarse siempre en el comercio. Los



transformadores grandes, cuyas potencias aparentes son mayores a los 1000 KVA reciben el nombre de transformadores de potencia. Los mismos principios se aplican al diminuto transformador del radioreceptor que al gigantesco de un sistema de potencia. No obstante, no debe concluirse que sea suficiente el conocimiento de estos principios para realizar el análisis de un transformador, ya que rara vez conviene, o es posible, aplicarlos exactamente. Los métodos matemáticos disponibles o son inadecuados o son complicados para poder tratar las configuraciones reales de los campos eléctrico y magnético existentes en un transformador, por lo que ha sido necesario idear métodos de análisis aproximados que salven estas dificultades. La elección del método aproximado apropiado al análisis de un problema específico cualquiera, no sólo depende de un conocimiento completo de la teoría física, sino también, de la experiencia.

El estudio de los Transformadores de Distribución es un campo que puede llevar a una optimización de gran parte del sistema de distribución. Es importante aclarar que el diseño de este software deja más espacios de estudio en el campo de análisis en lo que corresponde al área de Distribución de Energía Eléctrica.

El uso de herramientas de programación se ha considerado muy necesario actualmente, debido a la rapidez y versatilidad que se le puede dar a cualquier aplicación para lograr un alto desempeño sobre la tarea requerida. Es por esto que se decidió realizar este proyecto con la ayuda de Matlab, ya que ayuda a dar una visión gráfica y numérica de los aspectos requeridos en el aplicativo.

## 2 OBJETIVOS

Para realizar el cálculo de un transformador es hoy en día es necesario de disponer de cierta cantidad de datos técnicos y además para ello se deben realizar una serie de cálculos iterativos que demoran tiempo y pueden llevar a errores sistemáticos.

Por otra parte hay determinadas empresas dentro de la argentina que realizan distribución de energía eléctrica en tensiones no normalizadas con motivo de realizar una distribución en media tensión y luego poder hacer una distribución en baja tensión a una tensión mayor a la normalizada con el fin de ampliar el largo de una línea de baja tensión. Para ello se necesitan máquinas especiales tanto transformadores como motores y equipos de protección y maniobra de tensiones no normalizadas.

También se ve la necesidad de ahorrar costos de fabricación pero sin olvidar el horizonte de aumentar el rendimiento de la máquina evitando pérdidas durante la utilización de la máquina, lo cual conlleva a un rendimiento óptimo de la instalación.

Para esto se vio la necesidad de crear una herramienta dinámica para obtener datos de diseño de transformador y así disponer de información útil tanto para la fabricación del mismo como para supervisar en caso de la compra de una máquina de estas características.

Específicamente se quiere:

- \_ Diseñar un algoritmo de cálculo para transformadores de distribución.
- \_ Diseñar una interfaz gráfica donde poder implementar el algoritmo de cálculo de una forma sencilla y rápida.
- \_ Obtener un modelado en tres dimensiones del transformador de diseño para disponer de una herramienta que permita visualizar el diseño a escala.



- \_ Desarrollar una herramienta versátil capaz de vincular un software de simulación como Matlab y uno de dibujo asistido por computadora como Rhinoceros.
- \_ Obtener parámetros para poder operar el transformador y coordinar elementos de protección.

### **3 JUSTIFICACIÓN**

El gran crecimiento de la demanda de energía eléctrica ha llevado a proporcionar alternativas para hacer de esta un uso más racional y eficiente, aprovechando en su mayoría los recursos que poseemos y obteniendo así los mejores beneficios, en este caso, desde el punto de vista del operador de red y del usuario.

El desarrollo de este estudio se considera conveniente, dada la necesidad de optimización técnica y económica que tienen todos los agentes involucrados en la cadena de distribución de energía.

Por lo tanto, se desarrollará un software para la selección del transformador, que garantice la optimización técnica y económica de este, permitiendo que los sistemas de distribución se ajusten a las necesidades macroeconómicas.

Además, la optimización de los transformadores de distribución es de gran importancia ya que son elementos representativos en las empresas de distribución, bien sea, en el mantenimiento preventivo y correctivo, como en inversión por expansión del sistema.

De esto, toda mejora que se realice sobre los mismos redundará en reducción de costos, reducción en inversión, entre otros.

### **4 ANTECEDENTES, ESTADO DEL ARTE**

#### **4.1 EVOLUCIÓN DEL TRANSFORMADOR**

El progreso de la humanidad ha estado estrechamente ligado a la utilización de la energía. El hombre de las cavernas inició la ruta de la civilización cuando utilizó el fuego para obtener luz y calor, y cada vez que el hombre ha encontrado una nueva fuente o creado un nuevo procedimiento para aprovecharla, ha logrado grandes avances.

El aprovechamiento de la fuerza de tracción de los animales, permitió el desarrollo de la agricultura. La utilización de la energía del viento mediante la invención de la vela dio un fuerte impulso a la navegación, al comercio y al intercambio de ideas y conocimientos entre los pueblos de la antigüedad. La invención de la máquina de vapor propició la transición del trabajo artesanal a la producción masiva.

La investigación de los fenómenos eléctricos no fueron la excepción y es a partir de los estudios detallados de este fenómeno, realizados a principios del siglo XVIII, que se dieron grandes descubrimientos científicos, y al mismo tiempo aplicaciones tecnológicas que hicieron posible la generación de energía eléctrica a partir de la transformación de otro tipo de energía. Estas fuentes de energía se localizaban generalmente en zonas distantes a los centros de consumo, por lo que la energía eléctrica en un principio se distribuía en corriente directa. Conforme aumentó el uso de la energía eléctrica, comenzó la aplicación continua de esta. Así mismo, las



distancias del centro de generación al de consumo se fueron haciendo cada vez mayores, lo que evidenció los inconvenientes de la distribución de la energía en corriente continua. Lo anterior dio como resultado que durante los primeros 70 años del siglo XVIII se hicieran tentativas para la utilización de la energía eléctrica en forma de corriente alterna.

No fue sino hasta el año de 1878 cuando el científico ruso P.N Yablochkov inventó el primer transformador, cuyo principio de funcionamiento se remonta al año de 1831, en el que Michael Faraday descubre las leyes electromagnéticas que rigen los principios de operación y construcción de esta máquina eléctrica.

El primer sistema de distribución de potencia que se usó en Estados Unidos fue uno de corriente directa de 120KW inventado por Thomas Alba Edison para suministrar potencia a las bombillas incandescentes. La primera central de potencia de Edison entró en operación en la ciudad de Nueva York en Septiembre de 1882. Por desgracia, este sistema de potencia generaba y transmitía potencia a tan bajos voltajes que se requerían corrientes muy altas para suministrar cantidades significativas de potencia. Estas corrientes altas ocasionaban enormes caídas de tensión y pérdidas de potencia en las líneas de transmisión lo cual restringían mucho el área de servicio de las centrales de generación. En la década de 1880, las centrales generadoras se localizaban a muy pocas calles entre sí para evitar este problema. El hecho de no poder transmitir potencias a sitios lejanos con los sistemas de potencia de CC de baja tensión, significó que las estaciones generadoras fueran de poca capacidad, locales y por lo tanto, relativamente ineficientes.

A finales del siglo XIX, Tesla logra construir el motor de inducción de corriente alterna y trabaja en los laboratorios Westinghouse, donde concibe el sistema polifásico para trasladar la electricidad a largas distancias. Algunos de los trabajos de Tesla involucran un sistema de transmisión de electricidad inalámbrico usando una red eléctrica resonante lo que en aquél tiempo se conocía como

"corriente alterna de alta frecuencia" (hoy se considera de baja frecuencia), sólo se necesitaba un conductor para alimentar un sistema eléctrico, sin necesidad de otro metal ni un conductor de tierra. [5]. Un transformador de alta frecuencia, de núcleo de aire, fuertemente acoplado, cuya salida alimenta una bobina resonante, algunas veces llamada "bobina extra", o simplemente una "secundaria superior".

Sistemas modernos de tres bobinas generalmente colocan la secundaria superior a cierta distancia del transformador, o lo hacen de un diámetro considerablemente menor; no se busca acoplamiento magnético con la secundaria superior, porque cada secundaria está diseñada específicamente para su papel.

Las bobinas Tesla conseguían una gran ganancia en tensión acoplando dos circuitos LC resonantes, usando transformadores con núcleo de aire. A diferencia de los transformadores convencionales, cuya ganancia está limitada a la razón entre los números de vueltas en los arrollamientos, la ganancia en tensión de una bobina Tesla es proporcional a la raíz cuadrada de la razón de las inductancias secundaria y primaria.

A partir de esta fecha, las diferentes generaciones de transformadores han experimentado una serie de cambios entre las que se pueden citar:

1878 Transformador tipo seco con circuito magnético abierto.

1885 Transformador tipo seco con núcleo cerrado, construido con conductores aislados.

1891 Transformador sumergido en líquido aislante para tensiones de 30KV.



1893 Se consigue transmitir energía electromagnética sin cables, con el radio transmisor.

1896 Se construyó la primera central hidroeléctrica en la ciudad de Búfalo, gracias a los desarrollos de Tesla la corriente alterna sustituyó a la continua.

En el desarrollo y perfeccionamiento de los transformadores han influido en varios factores. Las propiedades físicas de los materiales de que están contruidos (especialmente los aislantes y materiales magnéticos para núcleos), han mejorado en gran manera. La experiencia ha llevado a un empleo más eficaz de los materiales disponibles y a mejorar los métodos de conjuntamiento de los mismos. El empleo de aceite como aislante y como medio de refrigeración ha hecho posible la construcción de grandes transformadores de potencia de alta tensión. Para el cálculo de los detalles del diseño se han desarrollado métodos más exactos. Los fundamentos sobre los que se apoya gran parte de este progreso son los principios de los campos eléctrico y magnético y de la inducción electromagnética.

Generaciones posteriores de transformadores han sufrido cambios particulares, tales como:

- Bobinas fabricadas con conductores forradas con barniz de alta rigidez dieléctrica.
- En lo referente a los aislamientos, tales como cartón y papel empleado en transformadores sumergidos en aceite han evolucionado considerablemente, fabricándose en la actualidad con rigidez dieléctrica muy aceptable, lo que ha originado una disminución en las dimensiones del conjunto interno y consecuentemente del tanque.
- El líquido empleado también ha sido de diferentes tipos, en un principio se empleaba el aceite dieléctrico derivado del petróleo, así como dos líquidos pertenecientes a la familia de los Bifelinos Policlorados (PBC's por sus siglas en el idioma inglés), como son Askarel y Pyranol. En la actualidad los líquidos pertenecientes a esta familia no está permitido usarlos, pudiéndose emplear: aceite mineral, aceite de silicona y más recientemente aceite vegetal, cada uno con sus propiedades físico-químicas y eléctricas particulares.
- En cuanto al núcleo, anteriormente se empleaba la chapa magnética laminada en caliente, actualmente se utiliza chapa magnética de grano orientado laminada en frío, característica que permite disminuir las pérdidas en el orden del 50% respecto a la lámina forjada en caliente. El aislamiento entre chapas magnéticas, puede ser de diversa naturaleza. Fue de uso general el papel que se pegaba antes del corte en una de las caras de la chapa magnética; posteriormente se utilizó el barniz (silicato de sodio). Actualmente las chapas de grano orientado vienen preparadas mediante un tratamiento especial (termoquímico, nombre comercial "carlita"), que proporcionaba el aislamiento entre ambas caras. En consecuencia el aislamiento ya no es operación que deba efectuar el constructor, como lo fue en métodos anteriores. También es notable el progreso obtenido en otro aspecto llamado factor de relleno o de aprovechamiento, cuyo factor es el cociente de dividir la sección en hierro del núcleo, también llamada útil, por la sección total (hierro más aislamiento).



## 4.2 DEFINICIONES FUNDAMENTALES

El transformador, es un dispositivo que no tiene partes móviles, el cual transfiere energía de un circuito a otro bajo el principio de inducción electromagnética. La transferencia de energía la hace por lo general con cambios en los de voltajes de corrientes.

Un transformador elevador recibe la potencia a un valor más elevado, en tanto que un transformador reductor recibe la potencia a un valor bajo.

Sustancialmente se puede decir que un transformador está constituido por un núcleo de material magnético que forma un circuito cerrado, y sobre de cuyas columnas o piernas se localizan los devanados, uno denominado "primario" que recibe la energía y el otro secundario, que se cierra sobre un circuito de utilización al cual entrega la energía.

Los devanados se encuentran eléctricamente aislados entre sí, un transformador consta de dos partes esenciales:

- El núcleo magnético.
- Los devanados.

Están relacionados con otros, elementos destinados a las conexiones mecánicas y eléctricas entre distintas partes al sistema de enfriamiento, al medio de transporte y a la protección de la maquina en general, en cuanto a las disposiciones constructivas, el núcleo determina características relevantes, de manera que se establece una diferencia fundamental en la construcción de transformadores, dependiendo de la forma del núcleo, y puede ser llamado "núcleo tipo columnas" y el "núcleo tipo acorazado", existen otros aspectos que establecen diferencias entre tipos de transformadores, como es el ejemplo del sistema de enfriamiento, que establece la forma de disipación del calor producido en los mismos, o bien en término de su potencia y el voltaje para aplicaciones, como por ejemplo:

### 4.2.1 LA CONSTRUCCIÓN DEL NÚCLEO.

El núcleo magnético está formado por laminaciones de acero que tienen pequeños porcentajes de silicio (alrededor del 4%) y que se denominan "laminaciones magnéticas", estas laminaciones tienen la propiedad de tener pérdidas relativamente bajas por efecto de histéresis y de corrientes circulantes.

Están formados por un conjunto de laminaciones acomodadas en la forma y dimensiones requeridas. La razón de usar laminaciones de acero al silicio en los núcleos de las máquinas eléctricas, es que el silicio aumenta la resistividad del material y entonces hace disminuir la magnitud de las corrientes parásitas o circulantes y en consecuencia las pérdidas por este concepto.



#### 4.2.2 ELEMENTOS DE LOS NÚCLEOS DE TRANSFORMADORES.

En los núcleos magnéticos de los transformadores tipo columna se distinguen dos partes principales: "las columnas" o piernas y los yugos". En las columnas se alojan los devanados y los yugos unen entre sí a las columnas para cerrar el circuito magnético.

Debido a que las bobinas se deben montar bajo un cierto procedimiento y desmontar cuando sea necesario por trabajos de mantenimiento, en ambos casos los núcleos se arman con "juegos" de laminaciones para columnas y yugos que se arman por capas de arreglos "pares" e "impares".

Cuando se han armado los niveles a base de juegos de laminaciones colocadas en "pares" e "impares" el núcleo se sujeta usando tornillos opresores y separados por medio de los tornillos tensores.

En cuanto a los Yugos, se refiere, no estando vinculados estos con los devanados, pueden ser, entonces, rectangulares, aun cuando pueden tener también escalones para mejorar el enfriamiento.

#### 4.2.3 TIPOS DE NÚCLEOS.

Cuando se ha mencionado con anterioridad, los núcleos para transformadores se agrupan básicamente en las siguientes categorías:

- a) Tipo núcleo o de columnas.
- b) Tipo acorazado.



Figura 4.2.1– Transformador de columnas.-

Existen distintos tipos de núcleos tipos columna, que están caracterizados por la posición relativa de las columnas y de los yugos.

#### 4.2.4 NÚCLEO MONOFÁSICO.

Se tienen dos columnas unidas en las partes inferior y superior por medio de un yugo, en cada una de estas columnas se encuentran colocados la mitad del devanado primario y la mitad del devanado secundario.

#### 4.2.5 NÚCLEO TRIFÁSICO.

Se tienen tres columnas dispuestas sobre el mismo plano unidas en sus partes inferior y superior por medio de yugos. Sobre cada columna se colocan los devanados primarios y secundarios de una fase. Las corrientes magnetizantes de las tres fases son distintas entre sí, debido principalmente a que el circuito magnético de las columnas externas es más largo que el correspondiente a la columna central. Este desequilibrio, tomando en cuenta que las corrientes magnetizantes de las tres fases son distintas entre sí, debido principalmente que el circuito, magnético de las columnas externas es más largo que el correspondiente a la columna central. Este desequilibrio, tomando en cuenta que la corriente de vacío es bastante baja, tiene influencia solamente para las condiciones de operación en vacío.

#### 4.2.6 TIPO ACORAZADO.

Este tipo de núcleo acorazado, tiene la ventaja con respecto al llamado tipo columna, de reducir la dispersión magnética, su uso es más común en los transformadores monofásicos (de potencia fraccionaria). En el núcleo acorazado, los devanados se localizan sobre la columna central, y cuando se trata de transformadores pequeños, las laminaciones se hacen en troqueles. Las formas de construcción pueden ser distintas y varían de acuerdo con la potencia.



Figura 4.2.2– Transformador del tipo acorazado.-



#### 4.2.7 HERRAJES O ARMADURA.

Como se ha mencionado antes, los núcleos de los transformadores tienen partes que cumplen con funciones puramente mecánicas de sujeción de las laminaciones y estructuras, estas partes o elementos se conocen como herrajes o armadura y se complementan con componentes, como fibra de vidrio o madera para protección de la sujeción de los yugos.

#### 4.2.8 “LOS DEVANADOS DE LOS TRANSFORMADORES”

Los devanados de los transformadores se pueden clasificar en baja y alta tensión, esta distinción es de tipo global y tiene importancia para los propósitos de la realización práctica de los devanados debido a que los criterios constructivos para la realización de los devanados de baja tensión, son distintos de los usados para los devanados de alta tensión.

En este tipo de transformadores los devanados primario y secundario son concéntricos y bobinado sobre un soporte aislante único. Por lo Gral. Se usan conductores de cobre esmaltado, devanados en espiral y con capas sobre puestas. Por lo Gral., el devanado de menor tensión se instala más cerca del núcleo, interponiendo un cilindro de papel aislante y mediante separadores se instala en forma concéntrica al devanado de tensión mayor.

Los extremos de los devanados (denominados también principio y final de devanado) se protegen con aislante de forma de tubo conocido como “spaghetti”.

#### 4.2.9 DEVANADOS DE BAJA TENSIÓN.

Están constituidos por lo general, de una sola espiral (algunas veces en 2 o 3 capas sobrepuestas), con alambres rectangulares o circulares aislados. El conductor redondo o circular se usa generalmente para potencias pequeñas y tiene diámetros no superiores a 3 o 3.5mm. El aislamiento de los conductores, cuando son cilíndricos, pueden ser de algodón, de papel, y conductor esmaltado. En transformadores con aceite también se utilizan conductores aislados con barniz poliéster.

Para transformadores de mediana y gran potencia, se recurre al uso de una-pletina o solera de cobre aislada, el aislamiento es por lo general de papel. En el caso de que las corrientes que circulen el devanado sean elevadas ya sea por facilidad de manipulación en la construcción o bien para reducir las corrientes parásitas, se puede construir el devanado con más de una solera o pletina en paralelo.

#### 4.2.10 DEVANADOS DE ALTA TENSIÓN.

Los devanados de alta tensión, tienen (en comparación con los de baja tensión), muchas espiras, y la corriente que circula por ellos, es relativamente baja, por lo que son de conductores de cobre de sección circular con diámetro de 2.5 a 3.0 mm. Con respecto a las características constructivas, se tienen variantes de fabricante a



fabricante, hay básicamente dos tipos, el llamado "tipo bobina" formados de varias capas de conductores, estas bobinas tienen forma discoidal, estas bobinas se conectan, por lo general, en serie para dar el número total de espiras de una fase. El otro tipo es el llamado "de capas" constituido por una sola bobina con varias capas, esta bobina es de longitud equivalente a las varias bobinas discoidales que constituirían el devanado equivalente, por lo general, el número de espiras por capa en este tipo de devanado; es superior al constituido de varias bobinas discoidales.

#### 4.2.11 POSICIÓN DE LOS DEVANADOS.

La disposición de los devanados en los transformadores, debe ser hecha de tal forma, que se concilien en la mejor forma las dos exigencias que son contrastantes entre sí, del aislamiento y de la menor dispersión del flujo. La primera requiere de la mayor separación entre devanados, en tanto que la segunda, requiere que el primario se encuentre lo más cercano posible del secundario. En la práctica, se alcanza una solución conveniente del problema con la disposición de los devanados dentro de los siguientes tipos:

- Concéntrico.
- Concéntrico doble.
- Alternado.

En el tipo concéntrico, cada uno de los devanados está distribuido a lo largo de toda la columna, el devanado de tensión más baja se encuentra en la parte interna (más cercana al núcleo) y aislado convenientemente del mismo, y del de tensión más elevada, por medio de tubos aislantes (cartón baquelizado, baquelita, etc.).

En la disposición de concéntrico doble, el devanado de tensión más baja se divide en dos mitades dispuestas respectivamente al interior y al exterior uno de otro.

En el llamado tipo alternado, los dos devanados están subdivididos cada uno en una cinta número de bobinas que están dispuestas en las columnas en forma alternada.

Las consideraciones que orientan desde el punto de vista de diseño, la disposición de los devanados, son aquellos referentes al enfriamiento, el aislamiento, la reactancia de dispersión y a los esfuerzos mecánicos.

El llamado concéntrico doble tiene la prerrogativa de dar lugar a la reactancia de dispersión con valor de alrededor de la mitad de aquel relativo al concéntrico simple.

El tipo alternado, en cambio, permite variar tales reactancias, repartiendo en forma distinta las posiciones de las bobinas de los dos devanados. Para los esfuerzos mecánicos son mejor las disposiciones de tipo alternado, pues permite que el transformador soporte mejor los esfuerzos mecánicos.

#### 4.2.12 AISLAMIENTO EXTERNO DE LOS DEVANADOS.

Los devanados primario y secundario, deben estar aislados entre sí, generalmente estos aislamientos de por medio pueden ser de madera, baquelita o materiales aislantes similares que además cumplan con funciones refrigerantes.

La aislación de los transformadores trifásicos se efectúa separando convenientemente las columnas, entre las cuales se interponen algunas veces separadores o diafragmas de cartón tratado o bien de baquelita.



La aislación externa se logra por medio de las boquillas a las que se conectan las terminales de los devanados.

#### 4.2.13 CONEXIÓN DE LOS DEVANADOS.

Cuando se construye un devanado, se puede bobinar en el sentido a la derecha o a la izquierda (con respecto al sentido de las manecillas del reloj), se ha observado que una corriente que tiene un determinado sentido, produce un flujo magnético en sentido opuesto, se tiene un devanado construido hacia la izquierda o un devanado hacia la derecha, esto se debe tomar en consideración, para evitar que con las conexiones que se realicen, se tengan flujos opuestos o voltajes inducidos opuestos. En general, cada fabricante adopta un sentido único de devanado para todas las bobinas, tanto secundarias como primarias.

#### 4.2.14 MATERIALES ELÉCTRICOS USADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE TRANSFORMADORES.

##### Conductores eléctricos

Los materiales usados como conductores en los transformadores, al igual que los usados en otras máquinas eléctricas, deben ser de alta conductividad, ya que con ellos se fabrican las bobinas. Los requisitos fundamentales que deben cumplir los materiales conductores, son los siguientes:

1. La más alta conductividad posible.
2. El menor coeficiente posible de temperatura por resistencia eléctrica.
3. Una adecuada resistencia mecánica.
4. Deben ser dúctiles y maleables.
5. Deben ser fácilmente soldables.
6. Tener una adecuada resistencia a la corrosión.

##### La temperatura y los materiales aislantes

Uno de los factores que más afectan la vida de los aislamientos, es la temperatura de operación de las máquinas eléctricas, esta temperatura está producida principalmente por las pérdidas y en el caso específico de los transformadores, durante su operación, estas pérdidas están localizadas en los siguientes elementos principales:

El núcleo o circuito magnético, aquí las pérdidas son producidas por el efecto de histéresis y las corrientes circulantes en las laminaciones, son dependientes de la inducción, es decir, influye el voltaje de operación.

Los devanados, aquí las pérdidas se deben principalmente al efecto joule y en menos medida por corrientes de Foucault, estas pérdidas en los devanados son dependientes de la carga en el transformador.

Se presentan también pérdidas en las uniones o conexiones que se conocen también como "puntos calientes" así como en los cambiadores de derivaciones.

Todas estas pérdidas producen calentamiento en los transformadores, y se debe eliminar este calentamiento a valores que no resultan peligrosos para los aislamientos, por medio de la aplicación de distintos medios de enfriamiento.

Con el propósito de mantener en forma confiable y satisfactoria la operación de las máquinas eléctricas, el calentamiento de cada una de sus partes, se debe controlar dentro de ciertos límites previamente definidos. Las pérdidas en una máquina eléctrica son importantes no tanto porque constituyan una fuente de ineficiencia, sino porque pueden representar una fuente importante de elevación de temperatura para los devanados, esta elevación de temperatura puede producir efectos en los aislamientos de los propios devanados, o bien en los aislamientos entre devanados y el núcleo, por esta razón, es siempre importante que todos los aislamientos entre devanados y el núcleo, por esta razón, es siempre importante que todos los aislamientos ese mantengan dentro de los límites de temperatura que garanticen su correcta operación, sin perder su efectividad.

#### 4.2.15 MÉTODOS DE ENFRIAMIENTO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA.

Como ya se mencionó antes, el calor producido por las pérdidas en los transformadores afecta la vida de los aislamientos, por esta razón es importante que este calor producido disipe de manera que se mantenga dentro de los límites tolerables por los distintos tipos de aislamiento.

La transmisión del calor puede las etapas siguientes en los transformadores:

- Conducción a través del núcleo, bobinas y demás elementos hasta la superficie.
- Transmisión por convección en el caso de los transformadores secos.
- Para los transformadores en aceite, el calor se transmite por convección a través de/éste dieléctrico.

#### 4.2.16 FUNDAMENTO FÍSICO DEL TRANSFORMADOR.

El transformador ideal:

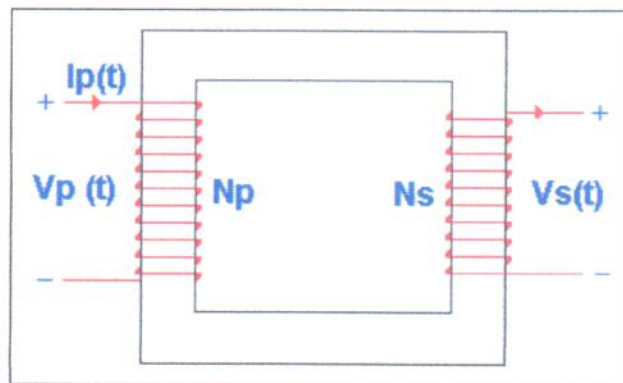


Figura 4.2.3— Esquema de transformador.-

Un transformador ideal es una máquina sin pérdidas, con una bobina de entrada y una bobina de salida. Las relaciones entre las tensiones de entrada y de salida, y entre la intensidad de entrada y de salida, se establece mediante dos ecuaciones sencillas. La figura muestra un transformador ideal.



El transformador tiene  $N_p$  espiras de alambre sobre su lado primario y  $N_s$  de espiras de alambre en su lado secundario. La relación entre la tensión  $V_p(t)$  aplicada al lado primario del transformador y la tensión  $V_s(t)$  inducido sobre su lado secundario es

$$\frac{V_p(t)}{V_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (4.2.1)$$

*Dónde:*

$V_p$  : Tensión primaria.

$V_s(t)$  : Tensión secundaria.

$N_p$  : Número de espiras primario.

$N_s$  : Número de espiras secundario.

$a$  : Relación de transformación

En donde  $a$  se define como la relación de espiras del transformador.

La relación entre la corriente  $i_p(t)$  que fluye en el lado primario del transformador y la corriente  $i_s(t)$  que fluye hacia fuera del lado secundario del transformador es:

$$N_p * i_p(t) = N_s * i_s(t) \quad (4.2.2)$$

$$\frac{i_p(t)}{i_s(t)} = \frac{1}{a} \quad (4.2.3)$$

*Dónde:*

$i_p(t)$  : Corriente primaria.

$i_s(t)$  : Corriente secundaria.

$N_p$  : Número de espiras primario.

$N_s$  : Número de espiras secundario.

$a$  : Relación de transformación

En términos de cantidades fasoriales, estas ecuaciones son:

$$\frac{V_p}{V_s} = a \quad (4.2.4)$$

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{1}{a} \quad (4.2.5)$$

Nótese que el ángulo de la fase de  $V_p$  es el mismo que el ángulo de  $V_s$  y la fase del ángulo  $I_p$  es la misma que la fase del ángulo de  $I_s$ . La relación de espiras del transformador ideal afecta las magnitudes de las tensiones e intensidades, pero no sus ángulos.

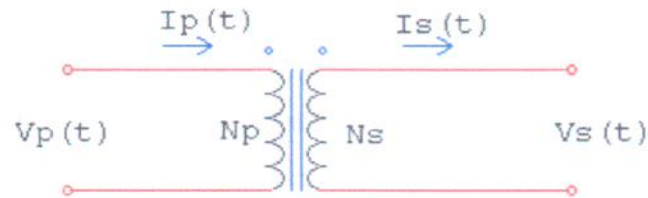


Figura 4.2.3– Esquema eléctrico del transformador.-

Las ecuaciones anteriores describen la relación entre las magnitudes y los ángulos de las tensiones y las intensidades sobre los lados primarios y secundarios del transformador.

La potencia activa suministrada al transformador por el circuito primario se expresa por medio de la ecuación

$$P_{ent} = V_p * I_p * \cos \varphi \quad (4.2.6)$$

Dónde:

$P_{ent}$  : Potencia activa de entrada

$V_p$  : Tensión primaria.

$I_p$  : Corriente primaria.

$\cos \varphi$  : Factor de potencia

La potencia activa que el circuito secundario suministra a sus cargas se establece por la ecuación:

$$P_{sal} = V_s * I_s * \cos \varphi \quad (4.2.7)$$

Dónde:

$P_{sal}$  : Potencia activa de salida

$V_s$  : Tensión primaria.

$I_s$  : Corriente primaria.

$\cos \varphi$  : Factor de potencia

Puesto que los ángulos entre la tensión y la intensidad no se afectan en un transformador ideal, las bobinas primaria y secundaria de un transformador ideal tienen el mismo factor de potencia.

La potencia de salida de un transformador ideal es igual a su potencia de entrada.

La misma relación se aplica a la potencia reactiva Q y la potencia aparente S.

$$Q_{ent} = V_p * I_p * \sen \varphi = V_s * I_s * \sen \varphi = Q_{sal} \quad (4.2.8)$$

Dónde:

$Q_{ent}$  : Potencia reactiva de entrada

$V_p$  : Tensión primaria.

$I_p$  : Corriente primaria.

$Q_{sal}$  : Potencia reactiva de salida

$V_s(t)$  : Tensión secundaria.

$I_s$  : Corriente secundaria.



$$S_{ent} = V_p * I_p = V_s * I_s = S_{sal} \quad (4.2.9)$$

Dónde:

$S_{ent}$  : Potencia aparente de entrada

$V_p$  : Tensión primaria.

$I_p$  : Corriente primaria.

$S_{sal}$  : Potencia reactiva de salida

$V_s(t)$  : Tensión secundaria.

$I_s$  : Corriente secundaria.

La impedancia de un elemento se define como la relación fasorial entre la tensión y la intensidad que lo atraviesan:

$$Z_l = \frac{V_l}{I_l} \quad (4.2.10)$$

#### 4.2.17 EL TRANSFORMADOR REAL.

Para entender el funcionamiento de un transformador real, refirámonos a la figura. Esta nos muestra un transformador que consiste en dos bobinas de alambre enrolladas alrededor de un núcleo del transformador. La bobina primaria del transformador está conectada a una fuente de tensión de CA y la bobina secundaria está en circuito abierto.

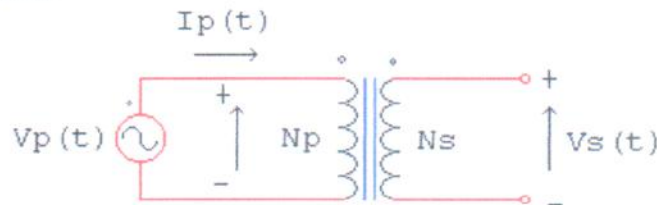


Figura 4.2.4– Funcionamiento transformador real.-

La base del funcionamiento del transformador se puede derivar de la ley de Faraday

$$e_{ent} = \frac{d\phi}{dt} \quad (4.2.11)$$

Dónde:

$e_{ent}$  : Tensión de entrada.

$\phi$  : Flujo magnético.

En donde  $\phi$  es el flujo magnético ligado de la bobina, a través de la cual se induce la tensión. El flujo ligado total es la suma de los flujos que pasan por cada vuelta de la bobina, sumando tantas veces cuantas vueltas tenga dicha bobina:

$$\phi = n * \phi_i \quad (4.2.12)$$

Dónde:

$\phi_i$  : Flujo individual.

$n$  : Número de vueltas.

El flujo magnético total que pasa por entre una bobina no es sólo  $N\phi$ , en donde  $N$  es el número de espiras en la bobina, puesto que el flujo que pasa por entre cada espira es ligeramente diferente del flujo en las otras vueltas, y depende de la posición de cada una de ellas en la bobina.

Sin embargo, es posible definir un flujo promedio  $\phi_p$  por espira en la bobina. Si el flujo magnético total de todas las espiras es  $\phi_t$  y si hay  $N$  espiras, entonces el flujo promedio por espira se establece por

$$\phi_p = \frac{\phi_t}{N} \quad (4.2.13)$$

Dónde:

$\phi_p$  : Flujo promedio.

$\phi_t$  : Flujo total.

$N$  : Número de espiras.

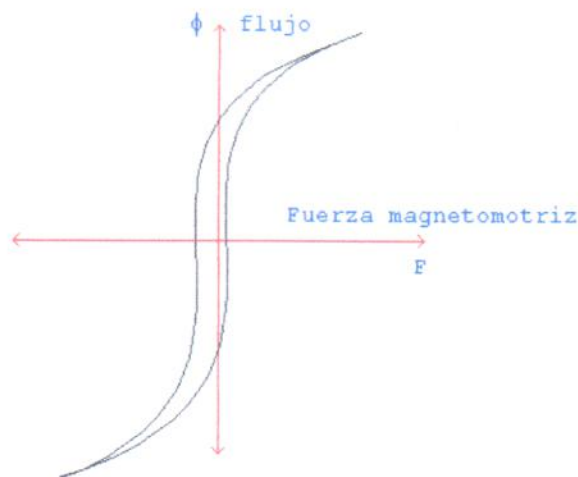


Figura 4.2.5– Curva de histéresis.-

$$e_{ent} = N \frac{d\phi}{dt} \quad (4.2.14)$$

Dónde:

$e_{ent}$  : Tensión de entrada.

$N$  : Número de espiras.

$\phi$  : Flujo magnético.

#### 4.2.18 LA RELACIÓN DE TENSIÓN A TRAVÉS DE UN TRANSFORMADOR.

Si la tensión de la fuente es  $V_p(t)$ , entonces esa tensión se aplica directamente a través de las espiras de la bobina primaria del transformador. ¿Cómo reaccionará el transformador a la aplicación de esta tensión? La ley de Faraday nos explica que es lo que pasará. Cuando la ecuación anterior se resuelve para el flujo promedio presente en la bobina primaria del transformador, el resultado es:



$$\phi = \frac{1}{N_p} = V_p(t)dt \quad (4.2.15)$$

Dónde:

$\phi$  : Flujo magnético.

$N_p$  : Número de espiras primario.

$V_p$  : Tensión primaria.

Esta ecuación establece que el flujo promedio en la bobina es proporcional a la integral de la tensión aplicada a la bobina y la constante de proporcionalidad es la recíproca del número de espiras en la bobina primaria.

$$\frac{1}{N_p}$$

Este flujo está presente en la bobina primaria del transformador. ¿Qué efecto tiene este flujo sobre la bobina secundaria? El efecto depende de cuánto del flujo alcanza a la bobina secundaria; algunas de las líneas del flujo dejan el hierro del núcleo y más bien pasan a través del aire. La porción del flujo que va a través de una de las bobinas, pero no de la otra se llama flujo de dispersión. El flujo en la bobina primaria del transformador, puede así, dividirse en dos componentes: un flujo mutuo, que permanece en el núcleo y conecta las dos bobinas y un pequeño flujo de dispersión, que pasa a través de la bobina primaria pero regresa a través del aire, desviándose de la bobina secundaria.

$$\phi_p = \phi_m + \phi_{lp} \quad (4.2.16)$$

Dónde:

$\phi_p$  : Flujo promedio total del primario.

$\phi_m$  : Componente del flujo de enlace entre las bobinas primaria y secundaria.

$\phi_{lp}$  : Flujo de dispersión del primario.

Hay una división similar del flujo en la bobina secundaria entre el flujo mutuo y el flujo de dispersión que pasa a través de la bobina secundaria pero regresa a través del aire, desviándose de la bobina primaria:

$$\phi_s = \phi_m + \phi_{ls} \quad (4.2.17)$$

Dónde:

$\phi_s$  : Flujo promedio total del secundario.

$\phi_m$  : Componente del flujo para enlazar entre las bobinas primaria y secundaria.

$\phi_{ls}$  : Flujo de dispersión del secundario.

Con la división del flujo primario promedio entre los componentes mutuos y de dispersión, la ley de Faraday para el circuito primario puede ser reformulada como:

$$V_p(t) = N_p \frac{d\phi_p}{dt} = N_p \frac{d\phi_m}{dt} + N_p \frac{d\phi_{lp}}{dt} \quad (4.2.18)$$

Dónde:

$\phi_p$  : Flujo promedio total del primario.

$\phi_m$  : Componente del flujo de enlace entre las bobinas primaria y secundaria.

$\phi_{lp}$  : Flujo de dispersión del primario.

$N_p$  : Número de espiras primario.

$V_p$  : Tensión primaria.

El primer término de esta expresión puede denominarse  $e_p(t)$  y el segundo  $e_{lp}(t)$ . Si esto se hace, entonces la ecuación anterior se puede escribir así:

$$V_p(t) = e_p(t) + e_{lp}(t) \quad (4.2.19)$$

La tensión sobre la bobina secundaria del transformador, puede expresarse también en términos de la ley de Faraday como:

$$V_s(t) = N_s \frac{d\phi_s}{dt} = N_s \frac{d\phi_m}{dt} + N_s \frac{d\phi_{lp}}{dt} = e_s(t) + e_{ls}(t) \quad (4.2.20)$$

La tensión primaria, debido al flujo mutuo, se establece por:

$$e_p(t) = N_p \frac{d\phi_m}{dt} \quad (4.2.21)$$

Y la secundaria debido al flujo mutuo por:

$$e_s(t) = N_s \frac{d\phi_m}{dt} \quad (4.2.22)$$

Obsérvese de estas dos relaciones que

$$\frac{e_p(t)}{N_p} = \frac{d\phi_m}{dt} = \frac{e_s(t)}{N_s} \quad (4.2.23)$$

Por consiguiente:

$$\frac{e_p(t)}{e_s(t)} = \frac{N_p}{N_s} = a \quad (4.2.24)$$

Esta ecuación significa que la relación entre la tensión primaria, causada por el flujo mutuo, y la tensión secundaria, causada también por el flujo mutuo, es igual a la relación de espiras del transformador. Puesto que en un transformador bien diseñado  $\phi_m \Rightarrow \phi_{lp} \Rightarrow \phi_{ls}$ , la relación de tensión total en el primario y la tensión total en el secundario es aproximadamente:

$$\frac{V_p(t)}{V_s(t)} \Rightarrow \frac{N_p}{N_s} = a \quad (4.2.25)$$

Dónde:

$V_p(t)$ : Tensión primaria.

$V_s(t)$ : Tensión secundaria.

$N_p(t)$ : Número de espiras primaria.

$N_s(t)$ : Número de espiras secundarias.

$a$ : Relación de transformación.

Cuanto más pequeños son los flujos dispersos del transformador, tanto más se aproxima la relación de su tensión total al transformador ideal.



#### 4.2.19 LA CORRIENTE DE MAGNETIZACIÓN.

Cuando una fuente de potencia de CA se conecta a un transformador fluye una corriente en su circuito primario, aun cuando su circuito secundario esté en circuito abierto. Esta corriente es la corriente necesaria para producir un flujo en el núcleo ferromagnético real. Consta de dos componentes:

- La corriente de magnetización  $i_m$  que es la corriente necesaria para producir el flujo en el núcleo del transformador.
- La corriente de pérdidas en el núcleo  $i_{h+e}$ , que es la corriente necesaria para compensar las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas.
- La corriente de magnetización en el transformador no es sinusoidal. Los componentes de más alta frecuencia en la corriente de magnetización se deben a la saturación magnética en el núcleo del transformador.
- Una vez que la intensidad máxima de flujo alcanza el punto de saturación en el núcleo, un pequeño aumento en la intensidad pico de flujo requiere un aumento muy grande en la corriente de magnetización máxima.
- La componente fundamental de la corriente de magnetización retrasa la tensión aplicada al núcleo en  $90^\circ$ .
- Los componentes de más alta frecuencia en la corriente de magnetización pueden ser más bien grandes, comparados con la componente fundamental. En general, cuanto más se impulse un núcleo de transformador hacia la saturación, tanto más grandes se volverán los componentes armónicos.

La otra componente de la corriente en vacío en el transformador es la corriente necesaria para producir la potencia que compense las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas en el núcleo. Esta es la corriente de pérdidas en el núcleo. Supongamos que el flujo en el núcleo es sinusoidal. Puesto que las corrientes parásitas en el núcleo son proporcionales a  $\frac{d\phi}{dt}$ , las corrientes parásitas son las más

grandes cuando el flujo en el núcleo está pasando a través de 0 Wb. La pérdida por histéresis es no lineal en alto grado, pero también es la más grande mientras el flujo en el núcleo pasa por 0.

La corriente total en vacío, en el núcleo, se llama la corriente de excitación del transformador. Es, simplemente, la suma de la corriente de magnetización y la corriente por pérdidas en el núcleo:

$$i_{ex} = i_m + i_{h+e} \quad (4.2.26)$$

Dónde:

$i_{ex}$  : Corriente de excitación.

$i_m$  : Corriente de magnetización.

$i_{h+e}$  : Corriente de pérdidas en el núcleo.

#### 4.2.20 CIRCUITOS EQUIVALENTES.

Las pérdidas que ocurren en los transformadores reales tienen que explicarse en cualquier modelo fiable de comportamiento de transformadores:

1. Las pérdidas en el cobre son pérdidas por resistencias en las bobinas primaria y secundaria del transformador. Son proporcionales al cuadrado de la corriente de dichas bobinas.



2. Pérdidas de corrientes parásitas. Las pérdidas por corrientes parásitas son pérdidas por resistencia en el núcleo del transformador. Son proporcionales al cuadrado de la tensión aplicada al transformador.
3. Pérdidas por histéresis. Las pérdidas por histéresis están asociadas a los reacomodamientos de los dominios magnéticos en el núcleo durante cada medio ciclo. Ellos son una función compleja, no lineal, de la tensión aplicada al transformador.
4. Flujo de dispersión. Los flujos  $\phi_{lp}$  y  $\phi_{ls}$  que salen del núcleo y pasan solamente a través de una de las bobinas de transformador son flujos de dispersión. Estos flujos escapados producen una autoinductancia en las bobinas primaria y secundaria y los efectos de esta inductancia deben tenerse en cuenta.

Es posible construir un circuito equivalente que tenga en cuenta todas las imperfecciones principales de los transformadores reales. Cada imperfección principal se considera a su turno y su efecto se incluye en el modelo del transformador.

Aunque es posible construir un modelo exacto de un transformador, no es de mucha utilidad. Para analizar circuitos prácticos que contengan transformadores, normalmente es necesario convertir el circuito entero en un circuito equivalente, con un nivel de tensión único. Por tanto, el circuito equivalente se debe referir, bien a su lado primario o bien al secundario en la solución de problemas.

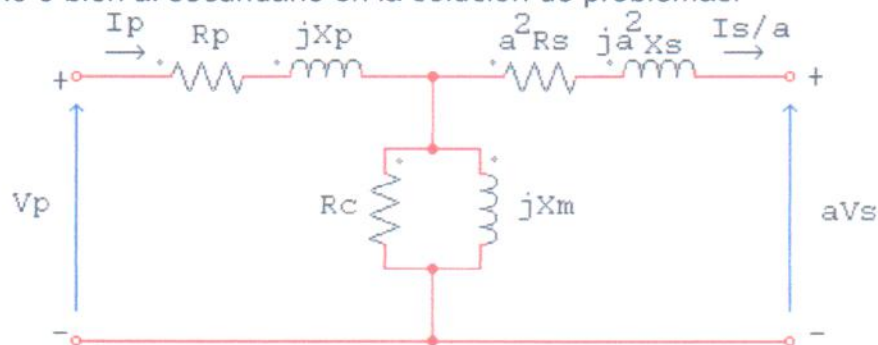


Figura 4.2.6– Circuito equivalente del transformador referido a su lado primario.-

La rama de excitación tiene muy poca corriente en comparación con la corriente de carga de los transformadores. De hecho, es tan pequeña que bajo circunstancias normales causa una caída completamente desechable de tensión en  $R_p$  y  $X_p$ .

Como esto es cierto, se puede producir un circuito equivalente simplificado y funciona casi tan bien como el modelo original. La rama de excitación simplemente se mueve hacia la entrada del transformador y las impedancias primaria y secundaria se dejan en serie entre sí. Estas impedancias sólo se adicionan, creando los circuitos equivalentes aproximados, como se ve en las siguientes figuras (a) y (b).

En algunas aplicaciones, la rama de excitación puede desecharse totalmente sin causar ningún error serio. En estos casos, el circuito equivalente del transformador se reduce a los circuitos sencillos de las figuras (c) y (d).



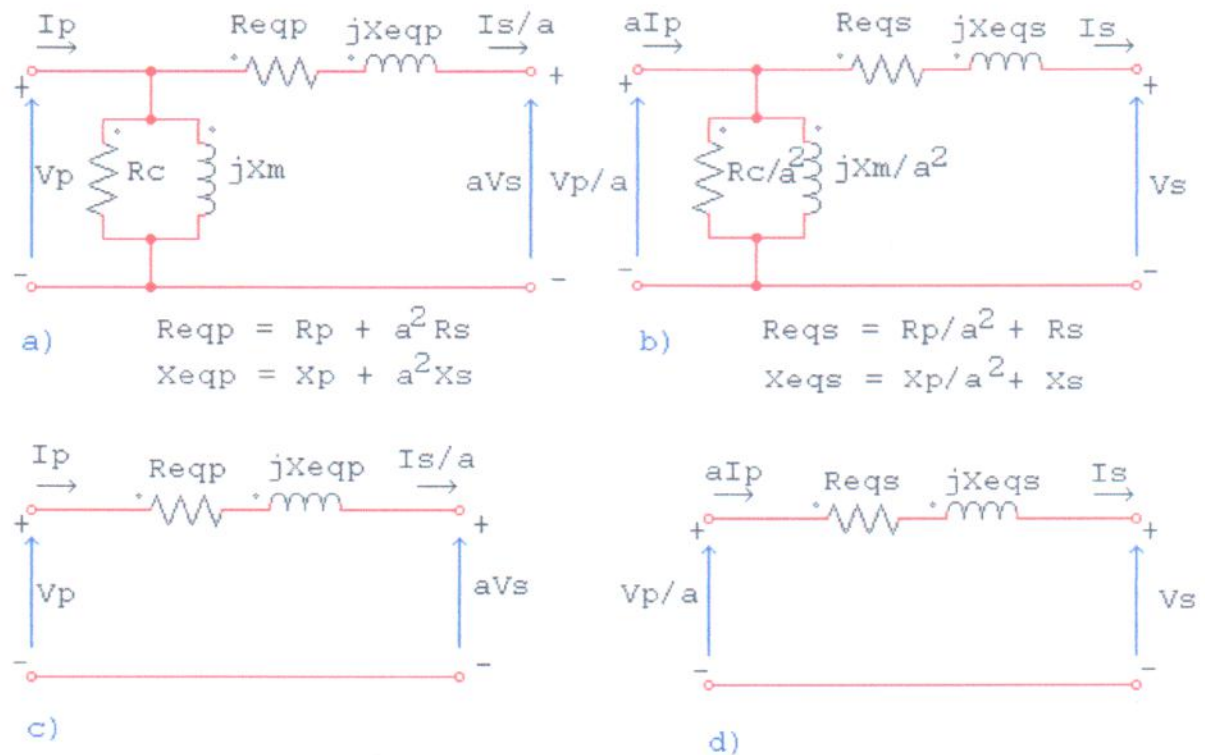


Figura 4.2.7– Circuitos equivalentes del transformador.-

#### 4.2.21 REGULACIÓN DE TENSIÓN.

Para obtener la regulación de tensión en un transformador se requiere entender las caídas de tensión que se producen en su interior. Consideremos el circuito equivalente del transformador simplificado: los efectos de la rama de excitación en la regulación de tensión del transformador puede ignorarse, por tanto solamente las impedancias en serie deben tomarse en cuenta. La regulación de tensión de un transformador depende tanto de la magnitud de estas impedancias como del ángulo fase de la corriente que circula por el transformador. La forma más fácil de determinar el efecto de la impedancia y de los ángulos de fase de la intensidad circulante en la regulación de voltaje del transformador es analizar el diagrama fasorial.

La tensión fasorial  $V_s$  se supone con un ángulo de  $0^\circ$  y todas las demás tensiones e intensidades se comparan con dicha suposición. Si se aplica la ley de tensiones de Kirchhoff al circuito equivalente, la tensión primaria se halla:

$$\frac{V_p}{a} = V_s + R_{eq} I_s + jX_{eq} I_s \quad (4.2.27)$$

Dónde:

$V_p$  : Tensión primario

$a$  : Relación de transformación

$V_s$  : Tensión secundaria

$R_{eq}$  : Resistencia equivalente

$I_s$  : Corriente secundario

$X_{eq}$  : Reactancia equivalente

Un diagrama fasorial de un transformador es una representación visual de esta ecuación.

Dibujamos un diagrama fasorial de un transformador que trabaja con un factor de potencia retrasado. Es muy fácil ver que  $V_p / a > V_s$  para cargas en retraso, así que la regulación de tensión de un transformador con tales cargas debe ser mayor que cero.



Figura 4.2.7– Diagrama fasorial de un transformador con factor de potencia en retraso.-

Ahora vemos un diagrama fasorial con un factor de potencia igual a uno. Aquí nuevamente se ve que la tensión secundaria es menor que la primaria, de donde  $V_r = 0$ . Sin embargo, en este caso la regulación de tensión es un número más pequeño que el que tenía con una corriente en retraso.



Figura 4.2.8– Diagrama fasorial de un transformador con factor de potencia unitario.-

Si la corriente secundaria está adelantada, la tensión secundaria puede ser realmente mayor que la tensión primaria referida. Si esto sucede, el transformador tiene realmente una regulación negativa como se ilustra en la figura.

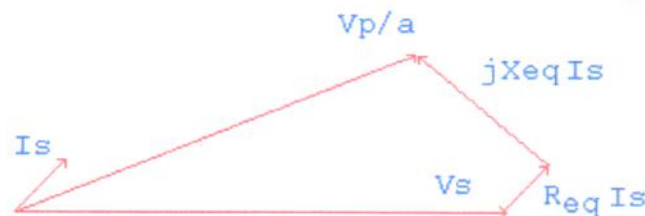


Figura 4.2.9– Diagrama fasorial de un transformador con factor de potencia en adelanto.-

### 4.3 PROCESO DE CÁLCULO DE UN TRANSFORMADOR

Cabe destacar que para el cálculo completo del transformador se sigue la metodología de cálculo del libro *CÁLCULO INDUSTRIAL DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS TOMO I y II* – Corrales Martín Juan y las distancias aconsejadas en el mismo.



#### 4.3.1 DATOS PRINCIPALES.

En este proceso se deben tener los parámetros iniciales de cálculo de la máquina a calcular

- Transformador trifásico;  $m=3$  (número de fases);
- Potencia primaria absorbida [kVA]
- Tensión primaria, compuesta [kV]
- Tensión secundaria, compuesta en vacío [kV]
- Conexiones
- Frecuencia  $f=50$ [Hz] (en argentina)
- Tipo de refrigeración (ONAN, ONAF, etc.)
- Servicio continuo
- Regulación de tensión
- Tensiones primarias por fase de cada una de las tomas
- Corrientes de fase primarias por fase:

$$I_{f1} = \frac{P/3}{U_{f1}} \quad (4.3.1)$$

- Corrientes secundarias por fase:

$$I_{f2} = \frac{P/3}{U_{f2}} \quad (4.3.2)$$

#### 4.3.2 DIMENSIONES DEL NÚCLEO

Valores provisionales:

Se toman valores provisionales para iniciar el cálculo y el proceso de iteración

- Diámetro del núcleo D

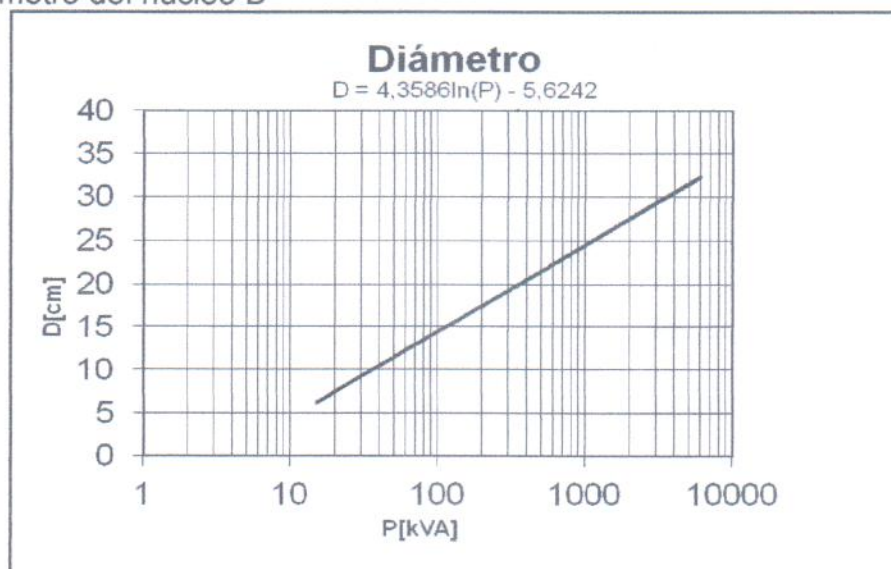


Figura 4.3.1– Diámetro del núcleo en [cm] para distintas potencias.-

- Potencia específica C

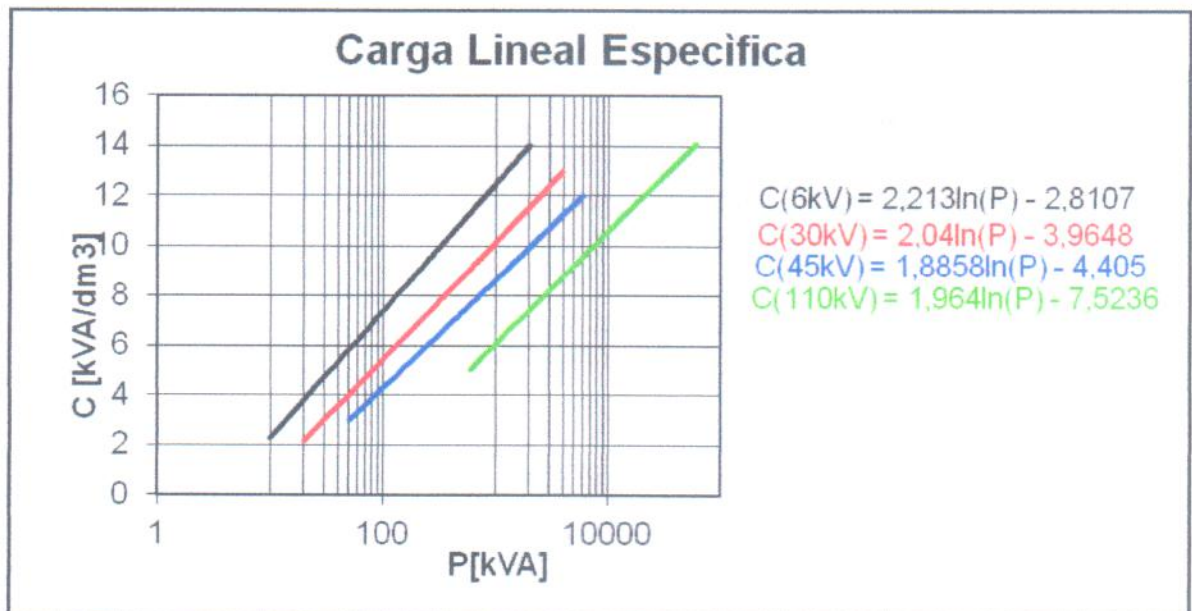


Figura 4.3.2-.Potencia específica en función de la potencia del transformador.-

$$C = \frac{P_{bl} / m}{V} = \frac{f}{22,5} \frac{q}{100} \hat{B} \quad (4.3.3)$$

Dónde:

$q$ : Carga lineal específica

$B$ : Inducción senoidal

$f$ : Frecuencia

$P_{bl}$ : Potencia del transformador

$m$ : Número de fases

$C$ : Carga lineal específica

- Volumen prismático por columna

$$V_c = \frac{P_{bl} / m}{C} \quad (4.3.4)$$

Dónde:

$P_{bl}$ : Potencia del transformador

$m$ : Número de fases

$C$ : Carga lineal específica

- Longitud de columna

$$L = \frac{V_c}{D^2} \quad (4.3.5)$$

Dónde:

$L$ : Longitud de columna

$V_c$ : Volumen de columna

$D$ : Diámetro del núcleo



- Anchura de la ventana a

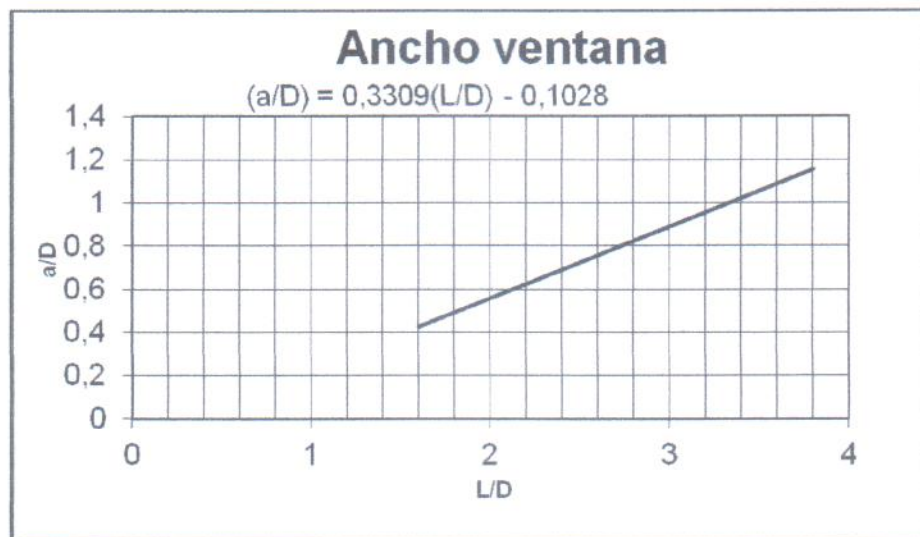


Figura 4.3.3—Relación ente alto de columna y ancho de ventana.-

- Distancia entre ejes de columnas

$$M = D + a \quad (4.3.6)$$

Dónde:

*M*: Distancia entre ejes de columnas

*a*: Ancho de ventana

*D*: Diámetro del núcleo

- Inducción máxima senoidal en vacío  $\hat{B}$

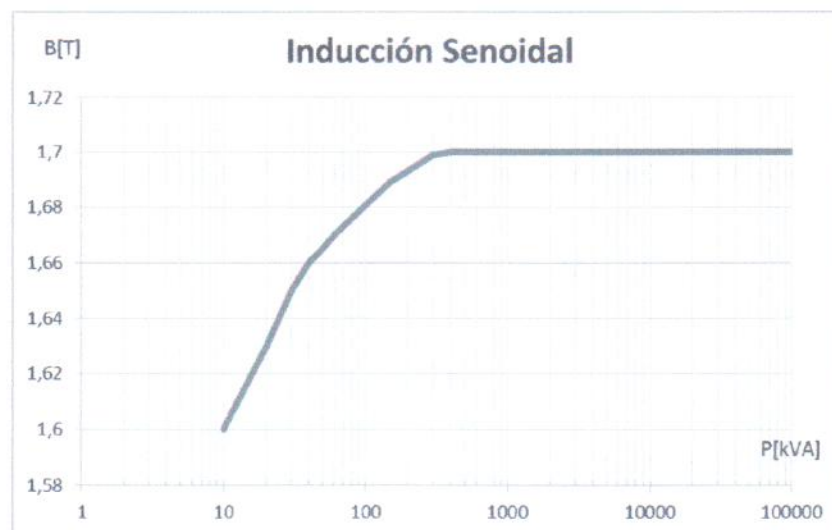


Figura 4.3.4—Inducción senoidal en vacío en función de la potencia.-

- Factor de utilización del núcleo

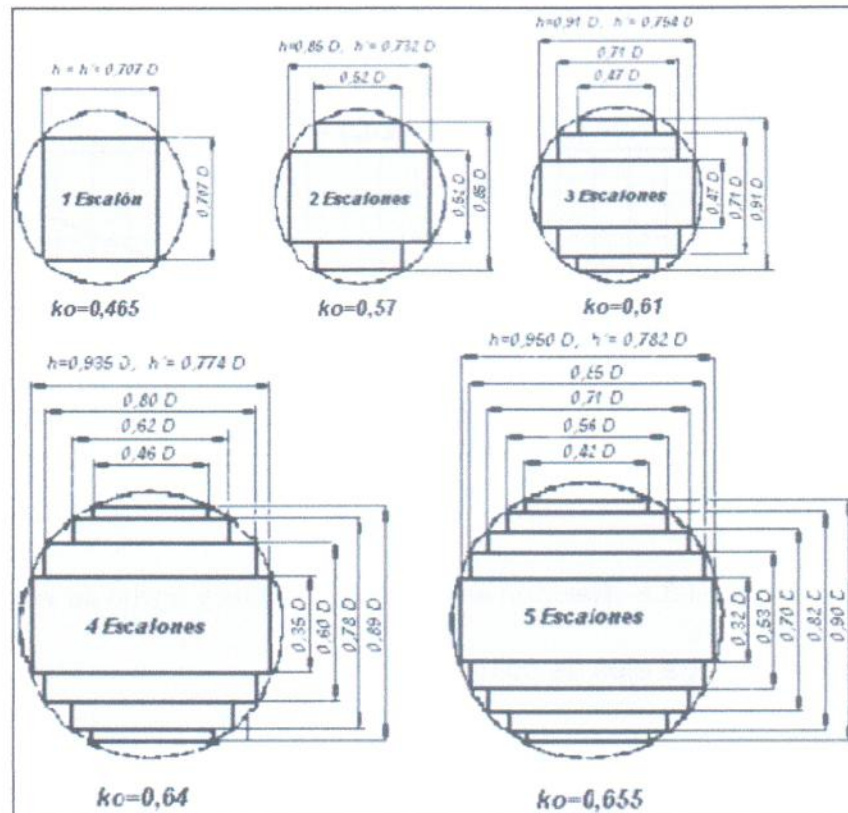


Figura 4.3.5—Factor de utilización  $K_o$ .-

- Sección total neta por columna, para 50 [Hz]

$$S_n = k_{fe} k_g \frac{\pi}{4} D^2 \quad (4.3.7)$$

- Espiras de baja tensión por columna. Para 50 [Hz]

$$N_2 = \frac{U_{02}}{k_0 \left( \frac{D}{6,71} \right)^2 \cdot B_{no}} \quad (4.3.8)$$

Dónde:

$k_0$  : Factor de utilización

$N_2$  : Cantidad de espiras bobinado BT

$U_{02}$  : Tensión de fase bobinado BT

$D$  : Diámetro del núcleo

$B$  : Inducción senoidal



- Carga lineal específica

$$q = \frac{N_2 I_{f2}}{L} \quad (4.3.9)$$

Dónde:

$q$ : Carga lineal específica

$N_2$ : Cantidad de espiras bobinado BT

$I_{f2}$ : Corriente de fase bobinado AT

$L$ : Largo de columna del núcleo.

Valores definitivos

Ahora se redondean los valores anteriormente obtenidos con el fin de estandarizar medidas para el diseño

- Espiras por fase secundarias (adoptadas)
- Diámetro del núcleo (adoptado)
- Sección por columna
- Inducción senoidal en el núcleo. Para  $f=50$  [Hz]
- Longitud por columna (adoptado)
- Carga lineal específica media
- Anchura de ventana (adoptado) para tener una mejor distribución de los bobinados
- Proporciones de la ventana (según figura 4.3.3)

De aquí se obtiene la relación óptima

- Distancias entre columnas

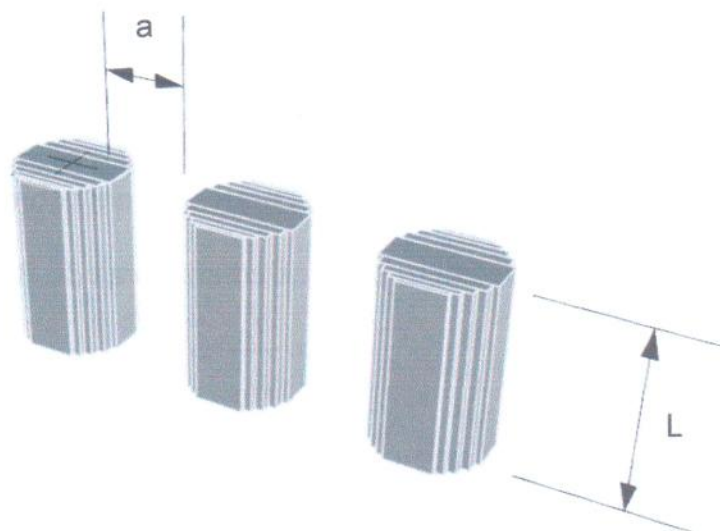


Figura 4.3.6—.Esquema de dimensiones y distancia entre columnas.-

### 4.3.3 BOBINADOS

Se procede a calcular el número de espiras y la sección del conductor, tanto en el bobinado primario como el secundario

- Espiras del primario

$$N_1 = N_2 \frac{U_{f1}}{U_{f2}} \quad (4.3.10)$$

*Dónde:*

$N_1$  : Cantidad de espiras bobinado AT

$N_2$  : Cantidad de espiras bobinado BT

$U_{f1}$  : Tensión de fase bobinado AT

$U_{f2}$  : Tensión de fase bobinado BT

- Espiras entre tomas
- Tensión por espiras

$$U_{espira} = \frac{U_n}{n_{esp}} \quad (4.3.11)$$

*Dónde:*

$U_{espira}$  : Tensión por espira

$U_n$  : Tensión nominal

$n_{esp}$  : Número de espiras

- Densidad de corriente en el bobinado de BT

La densidad de corriente en los transformadores al aire suele hallarse alrededor de 1.75 A/mm<sup>2</sup> y en los de distribución normal en aceite viene a quedar comprendida entre los 3 y 3,5 A/mm<sup>2</sup>. Con circulación forzada, en transformadores mayores, se llega a veces hasta 5 A/mm<sup>2</sup>.

Se debe ajustar la densidad de corriente a un valor fraccionario para llegar, después de un tanteo previo, a dimensiones comerciales del cobre.

- Sección de cobre para los conductores de B.T

$$S_2 = \frac{I_2}{\Delta_2} \quad (4.3.12)$$

*Dónde:*

$S_2$  : Sección de cobre bobinado BT

$I_2$  : Corriente Bobinado BT

$\Delta_2$  : Densidad de corriente bobinado BT



- Densidad de corriente en el bobinado de A.T.  $\Delta_1 [A/mm^2]$   
 Con la intensidad correspondiente a la toma de máxima corriente.
- Sección de cobre por conductor de A.T.

$$S_1 = \frac{I_1}{\Delta_1} \quad (4.3.13)$$

Dónde:

$S_1$  : Sección de cobre bobinado AT

$I_1$  : Corriente Bobinado AT

$\Delta_1$  : Densidad de corriente bobinado AT

- Recubrimiento de los conductores (aislamiento entre espiras)  
 B.T. – Doble capa de papel 0,25 [mm]  
 A.T. – Cinta de algodón solapado a  $\frac{1}{2} = 0,6$  [mm]

#### 4.3.4 DISTANCIAS AISLANTES.

En esta sección se procede a calcular las distancias aislantes a respetar según las tensiones en juego para cada bobinado

- Entre bobinado de B.T y columna

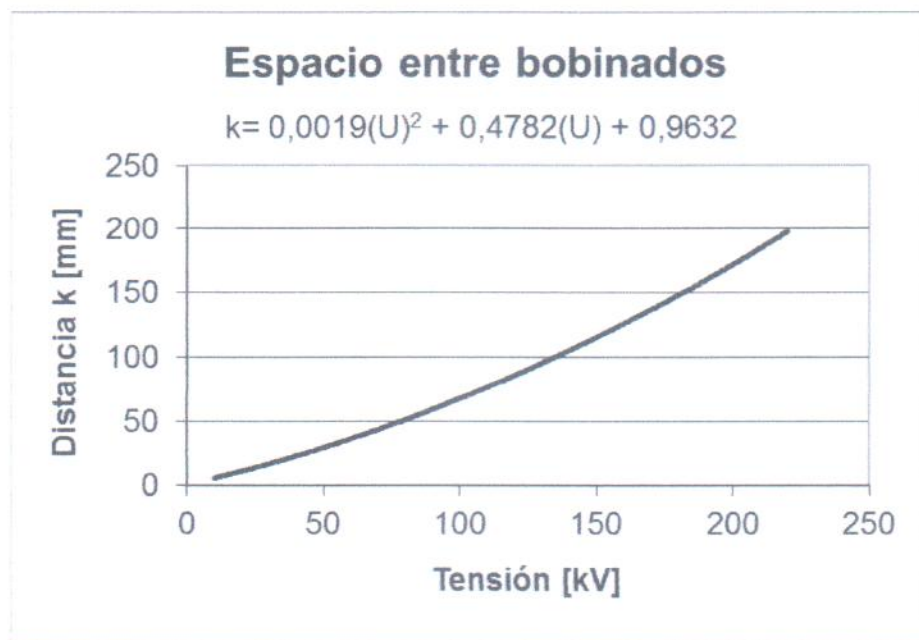


Figura 4.3.7– Distancia entre bobinado de BT y columna [mm].-

Dónde:

$k$ : Distancia entre bobinado de BT y columna.

- Grosor del tubo aislante entre B.T. y núcleo

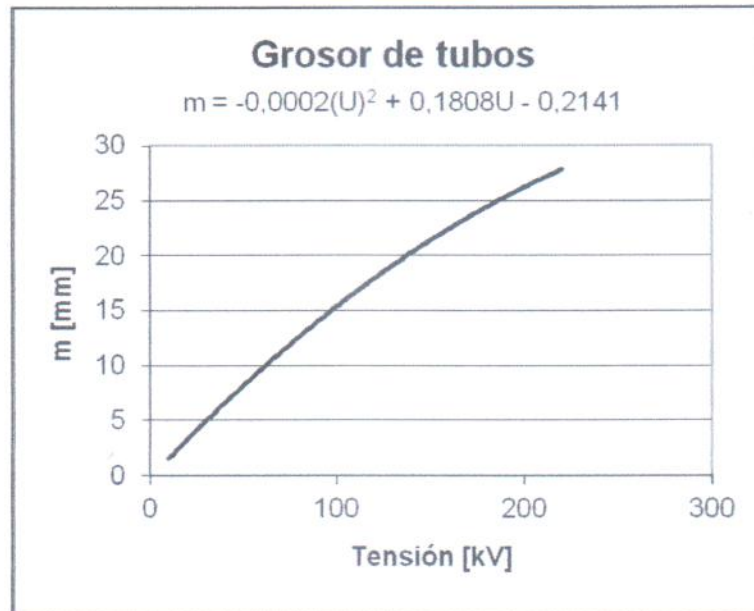


Figura 4.3.8– Grosor tubo aislante entre bobinado BT y núcleo.-

Dónde:

*m*: Grosor de tubos aislantes.

- Distancias radiales entre bobinas de B.T. y A.T.

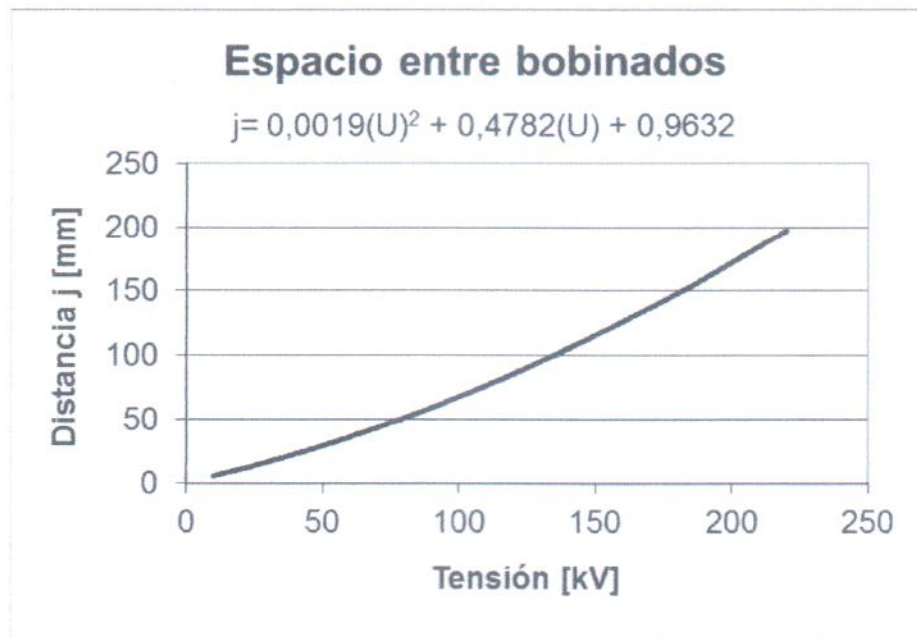


Figura 4.3.9– Espacio entre bobinados.-

Dónde:

*j*: Distancia entre bobinado de BT y AT



- Grosor de los tubos entre B.T. y A.T.

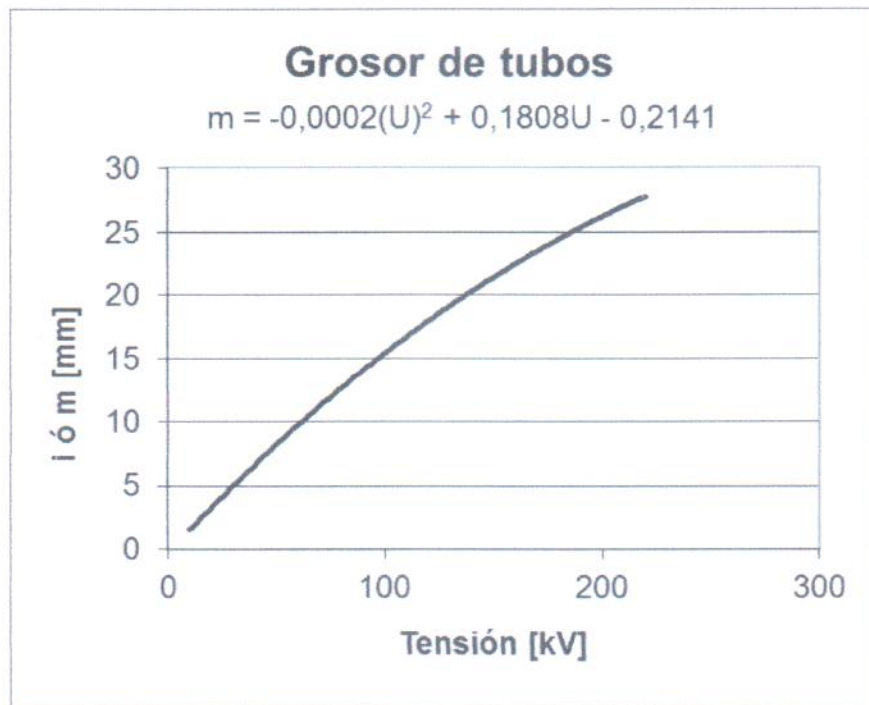


Figura 4.3.10– Grosor de los tubos.-

Dónde:

*i*: Grosor de tubos aislantes.

- Distancia entre bobinas de A.T. de columnas sucesiva

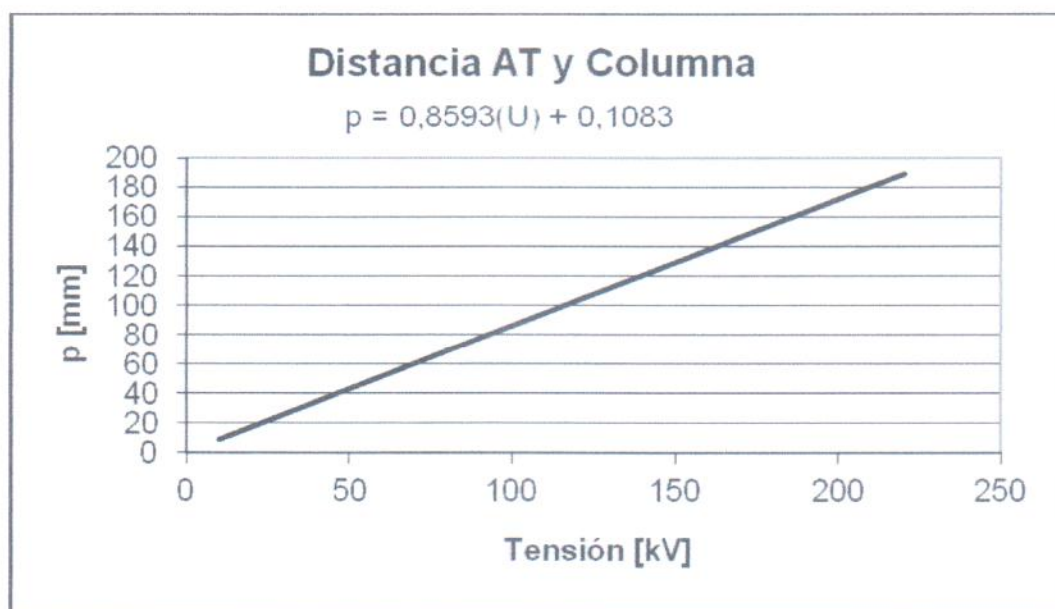


Figura 4.3.11– Distancia entre bobinado y columna.-

Dónde:

*p*: Distancia entre bobinado de AT y columna

$$A = 2 * o + (n^{\circ} bobinas - 1) * a \quad (4.3.14)$$

Dónde:

*A*: Espacio axial total ocupado por las distancias aislantes

*o*: Distancia entre el bobinado y el yugo

*a*: Distancia entre bobinas

- Longitud disponible para el bobinado de B.T:

$$B = L - A \quad (4.3.15)$$

Dónde:

*B*: Longitud disponible para el bobinado de BT

*L*: Largo de la columna

*a*: Espacio axial total ocupado por las distancias aislantes

- Radialmente

- Grueso radial del bobinado de B.T  $\delta_2$
- Espacio radial total ocupado por las distancias aislantes:

$$C = k + j + \frac{p}{2} + m + i \quad (4.3.16)$$

Dónde:

*C*: Espacio total utilizado por las distancias aislantes.

*k*: Distancia entre bobinado de BT y columna.

*j*: Distancia entre bobinado de BT y AT

*p*: Distancia entre bobinado de AT y columna

*m/i*: Grosor de tubos aislantes.

- Espacio radial disponible para los bobinados

$$E = \frac{a}{2} - C \quad (4.3.17)$$

Dónde:

*E*: Espacio radial disponible para los bobinados

*a*: Ancho de ventana.

*C*: Espacio total utilizado por las distancias aislantes.

- Espacio Radial disponible para el bobinado de A.T.

$$\delta_1 = E - \delta_2 \quad (4.3.18)$$



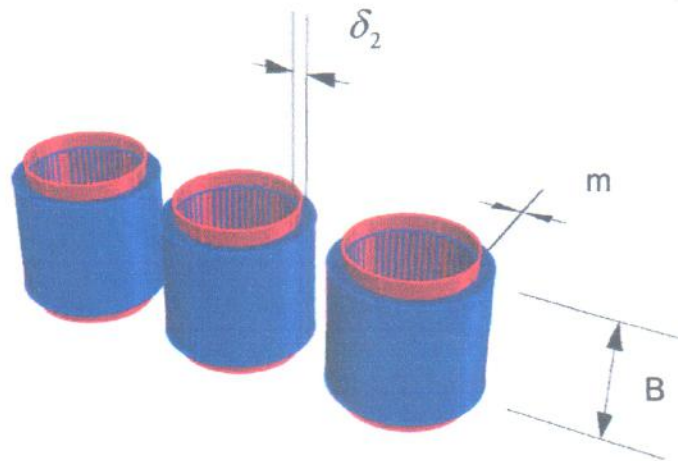


Figura 4.3.14– Espacio ocupado por el bobinado de BT.-

Bobinado de A.T.

- Dimensiones del conductor de A.T.
- Axialmente:

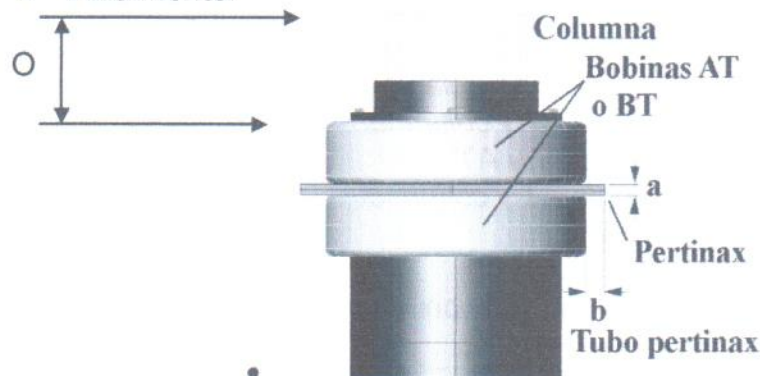


Figura 4.3.15– Distancias axiales bobinado AT.-

- Longitud disponible para el bobinado de A.T

$$A = 2 * o + (n^{\circ} bobinas - 1) * a \quad (4.3.14)$$

$$B = L - A \quad (4.3.15)$$

Dónde:

B: Longitud disponible para el bobinado de AT

L: Largo de la columna

A: Espacio axial total ocupado por las distancias aislantes

- Radialmente
  - Grosor radial del bobinado de A.T  $\delta_1$

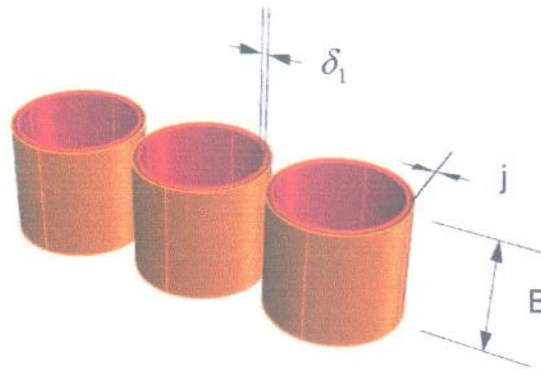


Figura 4.3.16– Espacio ocupado por el bobinado de AT.-

#### 4.3.6 CALENTAMIENTO DE LOS BOBINADOS.

Una vez dimensionada la máquina es necesario determinar el calentamiento de la misma para que con la correcta elección de un sistema de refrigeración, ésta pueda operar bajo los estándares de diseño, sin que se produzcan efectos a mediano y largo plazo.

##### BOBINADO DE B.T. y AT

- Carga lineal por bobina

$$q_b = \frac{N_b I_b}{L_b} \quad (4.3.19)$$

Dónde:

$q_b$  : Carga lineal por bobina.

$L_b$  : Largo de la bobina

$N_b$  : Número de espiras por bobina.

$I_b$  : Corriente que atraviesa por la bobina.

- Índice de calentamiento

$$(q_b \Delta) \quad (4.3.20)$$

- Relación rectangular de la bobina

$$\frac{b}{h} \quad (4.3.21)$$



- Calentamiento sobre la temperatura del aceite

Para  $\frac{b}{h}$  y  $(q_b \Delta)$  De acuerdo a la siguiente tabla:

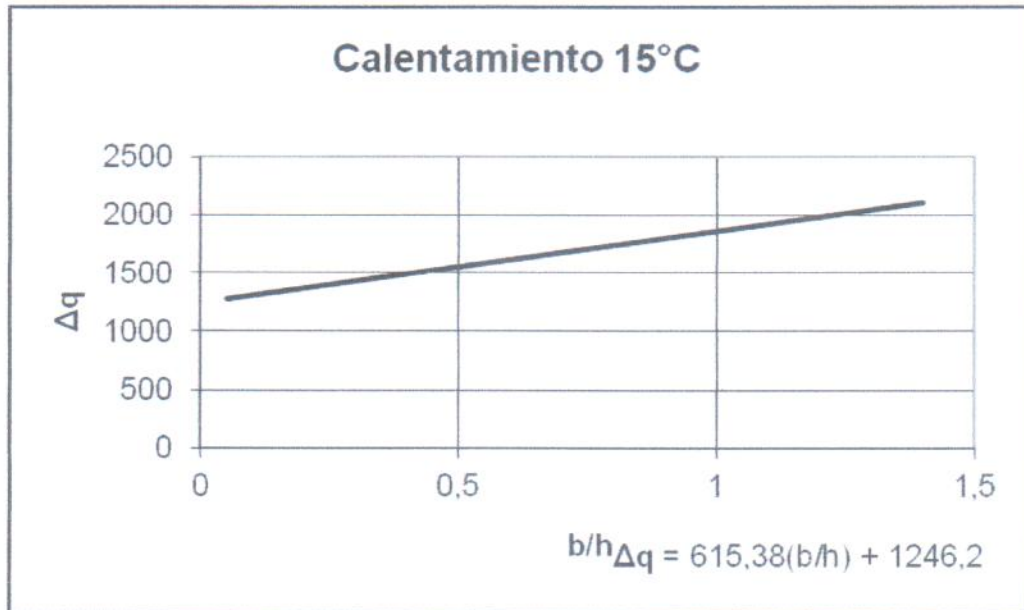


Figura 4.3.18– Sobrecalentamiento de los bobinados (15°).-

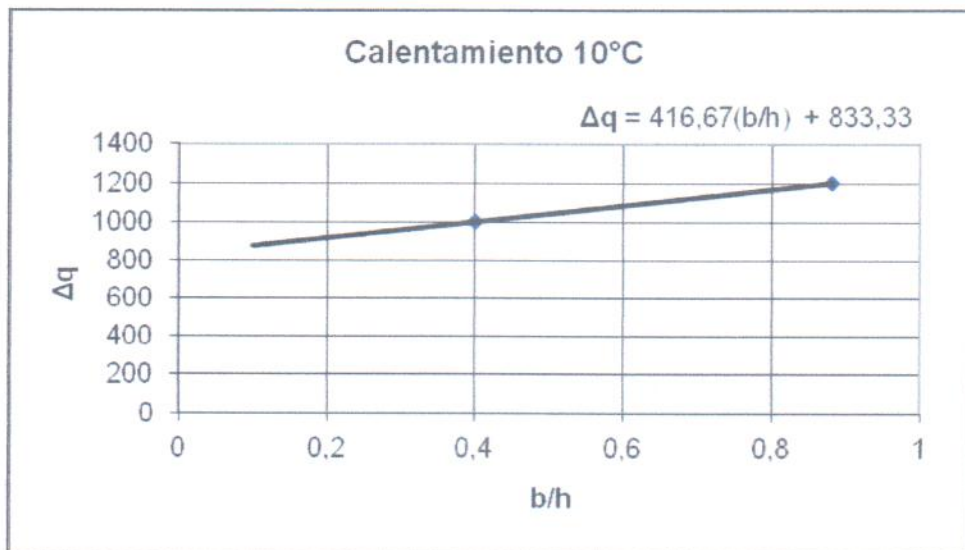


Figura 4.3.19– Sobrecalentamiento de los bobinados (10°).-

#### 4.3.7 DIMENSIONES DE LA CUBA.

Ahora es necesario dimensionar la cuba de manera que cumpla con las distancias eléctricas y sin que se pierda cierto criterio de proporcionalidad

## DIMENSIONES EXTERIORES DEL CONJUNTO ACTIVO

- Longitud de las culatas

$$2M + D \quad (4.3.22)$$

*Dónde:*

*D=Diámetro de núcleo*

*M=Distancia entre culatas*

- Altura del yugo escalonado

$$h_y = D \quad (4.3.23)$$

- Altura total del núcleo

$$H = L + 2h_y \quad (4.3.24)$$

- Diámetro exterior de las bobinas de A.T.

$$D_{ext} = D + \delta_1 + \delta_2 + C \quad (4.3.25)$$

- Longitud entre superficies exteriores extremas de las bobinas

$$2M + D_{ext} \quad (4.3.26)$$

## DIMENSIONES INTERIORES DE LA CUBA

- Anchura mínima interior de la caja

$$D_{ext} + 2n + 10^* \quad (4.3.27)$$

- Longitud mínima interior de la cuba

$$2M + D_{ext} + 2g \quad (4.3.28)$$

### 4.3.8 PÉRDIDAS TOTALES.

#### **Pérdidas combinadas en la chapa**

Generalmente, para el cálculo de máquinas eléctricas, no tiene especial interés el separar las pérdidas por histéresis de las pérdidas de Foucault y suelen computarse englobadas como pérdidas específicas en el hierro.

Tomando como referencia las propiedades típicas del hierro-silicio de grano orientado HI-B



Espesor [mm]	Grado	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Máximas pérdidas a 1,7T [W/kg]	
			50 [Hz]	60[Hz]
0,30	M-2H	7,65	1,17	1,54
0,30	M-3H	7,65	1,23	1,63
0,35	M-4H	7,65	1,37	1,79

En nuestro caso utilizamos laminación de 0,35 [mm].

- Cálculo del peso neto de Fe

Primero calculo el volumen de Fe

Volumen total:  $[m^3]$ ; Densidad:  $[\frac{kg}{m^3}]$ ; Masa total de Fe:  $[kg]$

Pérdidas en el cobre

Al cerrarse el secundario sobre un circuito exterior y establecerse la corriente de carga en ambos devanados, las pérdidas que se transforman en calor, por efecto Joule, en el cobre crecen como el cuadrado de las intensidades, las pérdidas adicionales en el cobre, por la acción del flujo disperso se hacen sensibles, y la variación del flujo común en el núcleo altera también las pérdidas en el hierro.

A esta potencia que no es posible aprovechar se las llama pérdidas eléctricas o también pérdidas en el cobre. En términos generales es posible expresarlas por medio de:

$$P_{cu} = \sum i^2 R \quad (4.3.29)$$

Dónde:

$P_{cu}$ : Pérdidas en el cobre.

$i$ : Corriente.

$R$ : Resistencia

Se toma la sumatoria, por tener las máquinas en general, más de un circuito eléctrico, y cada circuito ser recorrido por distintas corrientes por ser cada uno de distintas características óhmicas. En la fórmula anterior reemplazamos la resistencia por su equivalente en función a sus dimensiones, quedando:

$$P_{cu} = \sum i^2 \rho_{cu} \frac{l}{S} \quad (4.3.30)$$

Dónde:

$P_{cu}$ : Pérdidas en el cobre.

$\rho_{cu}$ : Resistividad del cobre.

$i$ : Corriente.  
 $S$ : Sección.  
 $l$ : Largo.

Como recordaremos  $P_{cu}$  es la resistividad del cobre,  $l$  es el largo del circuito y  $S$  es la sección recta del mismo. Recordando además que la densidad de corriente en un conductor es:

$$j = \frac{i}{S} \quad (4.3.31)$$

Dónde:

$i$ : Corriente.  
 $S$ : Sección.  
 $j$ : Densidad de corriente.

Podemos introducirla en la fórmula anterior, y conjuntamente reunir la sección y el largo en el volumen del cobre en cada circuito:

$$P_{cu} = \sum \rho_{cu} \cdot j^2 \cdot V \quad (4.3.32)$$

Dividiendo ahora por el peso específico, la expresión quedará en función del peso del material activo de los circuitos:

$$P_{cu} = \frac{\rho_{Cu}}{\gamma_{Cu}} \sum j^2 G_{Cu} \quad (4.3.33)$$

Tomando la resistividad del como  $\rho_{Cu} = 0,0215 \left[ \frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \right]$  a 75°C, por ser la temperatura a la que normalmente funcionan estos devanados, y

$\gamma_{Cu} = 8,9 \left[ \frac{kg}{dm^3} \right] \cdot \frac{1000 \left[ dm^3 \right]}{1 \left[ m^3 \right]} = 8900 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$  el peso específico, se llega a una

fórmula práctica, que para un circuito integrante de la máquina es:

$$P_{Cu} = 2,41 \cdot j^2 \cdot G_{Cu} \quad (4.3.34)$$

Dónde:

$P_{Cu}$ : Pérdidas en el cobre en [W]

$G_{Cu}$ : Peso del cobre del circuito considerado en [Kg.]

$j_{Cu}$ : Densidad de corriente, en [A/mm<sup>2</sup>]



Esta fórmula es válida para corriente continua. Tratándose de corriente alterna, interviene el efecto pelicular o "skin" en los conductores, que es tanto más pronunciado cuanto mayor es la sección de los mismos, debiéndose introducir en consecuencia un factor k en la siguiente forma:

$$p_{Cu} = 2,41 \cdot k \cdot j^2 \cdot G_{Cu} \quad (4.3.35)$$

Para frecuencias del orden de los 50 ciclos puede tomarse un valor de 1,1 y para máquinas comunes, pero si se trata de máquinas importantes realizadas con secciones de cobre considerables, es conveniente determinar este valor de k con fórmulas o ábacos.

- Longitudes de la espira media

$$\text{B.T. } L_{mB.T.} = \pi D_1 \quad (4.3.36)$$

$$\text{A.T. } L_{mA.T.} = \pi D_2$$

- Pesos del cobre

$$\text{B.T. } G_{CuB.T.} = 3 \cdot \gamma_{Cu} (N_2 \cdot L_{mB.T.}) \cdot \frac{S_{B.T.}}{1000} \quad (4.3.37)$$

$$\text{A.T. } G_{CuA.T.} = 3 \cdot \gamma_{Cu} (N_1 \cdot L_{mA.T.}) \cdot \frac{S_{A.T.}}{1000}$$

- Pérdidas por corriente continua en el cobre a 75°C

$$\text{B.T. } \rho_{CuB.T.} = 2,41 \cdot G_{CuB.T.} \cdot \Delta_{B.T.}^2 \quad (4.3.38)$$

$$\text{A.T. } \rho_{CuA.T.} = 2,41 \cdot G_{CuA.T.} \cdot \Delta_{A.T.}^2$$

#### Pérdidas totales por CC

- Pérdidas por corriente alterna en el cobre a 75°C  
Tomando un valor de k=1,1

Pérdidas en Cu = Pérdidas en CC x k

PÉRDIDAS TOTALES= PÉRDIDAS EN Fe + PERDIDAS EN Cu

#### 4.3.9 CALENTAMIENTO.

##### ELEVACIÓN DE TEMPERATURA

El calentamiento del transformador depende exclusivamente de la potencia de pérdidas en el hierro y en el cobre que debe disipar. La temperatura máxima del aceite  $\theta_{acm\acute{a}x}$  (en la parte superior de la cuba) no debe exceder del valor prescrito por las normas (60 C, sobre un ambiente de 40 C; VDE), o valor convenido con el cliente.

A este calentamiento máximo del aceite le corresponde una elevación media de temperatura, interior, que depende de la altura de la caja y de la situación más o menos elevada del núcleo y bobinado dentro de la misma, y por tanto de la disposición constructiva del transformador.

Tomo como seguridad un  $\theta_{ac} = 55 [^{\circ}C]$

### CUBA CON RADIADORES

- Determinación de la distancia desde el fondo de la cuba hasta el centro de los bobinados

Radiador tipo	Ancho "a" en m	Altura H en m	Sup. por elemento en m <sup>2</sup>	Coef. Ventilación $\theta_{ac}$ max en 55°C en W/m <sup>2</sup>	Aceite por elemento en litros
1	0,16	0,6	0,21	488	1,38
2	0,25	0,79	0,43	450	3,4
3	0,25	0,92	0,51	415	4
4	0,25	1,1	0,61	400	4,8
5	0,4	0,93	0,79	400	6,4
6	0,4	1,5	1,27	372	10,3
7	0,4	1,73	1,43	360	11,9
8	0,4	1,93	1,6	357	13,3
9	0,6	2,5	2,9	300	25,5
10	0,6	3	3,5	280	31

- Con la distancia de centro de bobinados y la distancia de centro de radiadores, se debe afectar el coeficiente de ventilación según la siguiente tabla:

Factor de corrección del coeficiente de ventilación según la distancia y										
y[mm]	0	100	200	300	400	500	600	700	800	1000
Factor de corrección	0,8	0,85	0,89	0,925	0,95	0,975	1	1,025	1,05	1,1

- Para obtener una armonía constructiva, se deben utilizar 2 laterales de la cuba
- En base a lo anterior se eligen los radiadores correspondientes.

Para la distancia entre ejes adoptada se tiene que afectar el coeficiente de disipación por un coeficiente según la siguiente tabla:



Factor de corrección para el coeficiente de ventilación según a distancia entre ejes de grupos radiadores a=anchura de un elemento						
Distancia entre ejes	1,25a	1,33a	1,45a	1,6a	1,75a	2a
Factor de corrección	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1

- Según la potencia a disipar se debe calcular la superficie necesaria para disipar esta potencia
- Si considero a la cuba como radiador, entonces calculando la superficie de la cuba  $sup_{cuba}$
- Restando  $sup_{disipadora} - sup_{cuba}$
- Con este valor se puede calcular la cantidad de radiadores según su superficie que se necesitan para disipar la potencia anteriormente calculada
- Aplicando el factor de corrección según el número de elementos por grupos

Factor de corrección a aplicar el coeficiente de ventilación según el número de elementos por grupos							
N° de elementos	3	4-5	6-9	9-12	13-14	15-17	19-21
Factor de corrección	1,1	1,06	1,02	1	0,99	0,98	0,97

$$A_c = \frac{P_t}{13,4 \cdot \theta_c} [m^2] \quad (4.3.39)$$

Dónde:

$A_c$ : La superficie lateral necesaria

$P_t$ : Las pérdidas totales en W

$\theta_c$ : El calentamiento medio admisible para la cuba.

Se verifica luego si la superficie adoptada es superada por la superficie de la cuba

4.3.10 CONEXIÓN DEL TRANSFORMADOR.

Según el desfase entre la tensión del bobinado primario y del secundario, se realizan las distintas conexiones de los bobinados como se muestra a continuación. Cada conexión tiene una utilización diferente y se debe considerar a la hora de diseñar la instalación.

GRUPOS DE CONEXIÓN DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS							
INDICE DE CONEXIÓN	GRUPO DE CONEXIÓN		DIAGRAMA VECTORIAL		ESQUEMA DE CONEXIONES		RELACION DE TRANSFORMACION $V_{uy}/V_{uv}$
	VDE	CEI	AT	BT	AT	BT	
0	A1	Dd0					$\frac{n_1}{n_2}$
	A2	Yy0					$\frac{n_1}{n_2}$
	A3	Dz0					$\frac{2}{3} \times \frac{n_1}{n_2}$
6	B1	Dd6					$\frac{n_1}{n_2}$
	B2	Yy6					$\frac{n_1}{n_2}$
	B3	Dz6					$\frac{2}{3} \times \frac{n_1}{n_2}$

Figura 4.3.20a- Conexionado de transformadores.-



GRUPOS DE CONEXIÓN DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS							
INDICE DE CONEXIÓN	GRUPO DE CONEXIÓN		DIAGRAMA VECTORIAL		ESQUEMA DE CONEXIONES		RELACION DE TRANSFORMACIÓN $V_{uy}/V_{uv}$
	VDE	CEI	AT	BT	AT	BT	
5	C1	Dy5					$\frac{1}{\sqrt{3}} \times \frac{n_1}{n_2}$
	C2	Yd5					$\sqrt{3} \times \frac{n_1}{n_2}$
	C3	Yz5					$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{n_1}{n_2}$
11	D1	Dy11					$\frac{1}{\sqrt{3}} \times \frac{n_1}{n_2}$
	D2	Yd11					$\sqrt{3} \times \frac{n_1}{n_2}$
	D3	Yz11					$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{n_1}{n_2}$

Figura 4.3.20b- Conexionado de transformadores.-

#### 4.3.11 RELÉ BUCHHOLZ.

En el campo de la distribución y transmisión de la energía eléctrica, el relé de Buchholz, también llamado relé a gas o relé de presión repentina, es un dispositivo de seguridad montado sobre algunos transformadores y reactores que tengan una refrigeración mediante aceite, equipado con una reserva superior llamada "conservador". El relé de Buchholz es usado como un dispositivo de protección sensible al efecto de fallas dieléctricas o térmicas dentro del equipo.



Figura 4.3.21- Imagen de relé Buchholz.-

El relé tiene dos formas de detección. En caso de una pequeña sobrecarga, el gas producido por la descomposición química del aceite se acumula en la parte de arriba del relé y fuerza al nivel de aceite a que baje. Un switch flotante en el relé es usado para disparar una señal de alarma. Este mismo switch también opera cuando el nivel de aceite es bajo, como en el caso de una pequeña fuga del refrigerante.

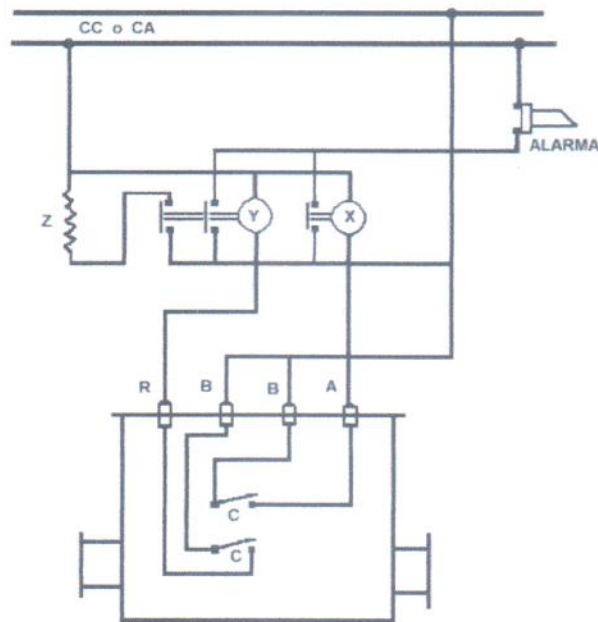


Figura 4.3.22– Esquema de conexiones del relé Buchholz.-

En caso de producirse un arco, la acumulación de gas es repentina, y el aceite fluye rápidamente hacia el conservador. Este flujo de aceite opera sobre el switch adjunto a una veleta ubicada en la trayectoria del aceite en movimiento. Este switch normalmente activa un circuito interruptor automático que aísla el aparato antes de que la falla cause un daño adicional.

El relé de Buchholz tiene una compuerta de pruebas, que permite que el gas acumulado sea retirado para realizar ensayos (habitualmente por cromatografía de gases). Las proporciones relativas de gases permiten diagnosticar el tipo de falla que produjo la descomposición del aceite. En caso de que se encuentre aire, significa que el nivel de aceite es bajo, o bien que existe una pequeña pérdida.

#### 4.4 UTILIZACIÓN DE ENTORNO GRAFICO EN MATLAB

##### 4.4.1 INTRODUCCIÓN.

GUIDE es un entorno de programación visual disponible en MATLAB para realizar y ejecutar programas que necesiten ingreso continuo de datos. Tiene las características básicas de todos los programas visuales como Visual Basic o C++



#### 4.4.2 Inicio

Para iniciar nuestro proyecto, lo podemos hacer de dos maneras:

- Ejecutando la siguiente instrucción en la ventana de comandos:

>> guide

- Haciendo un click en el ícono que muestra la figura:

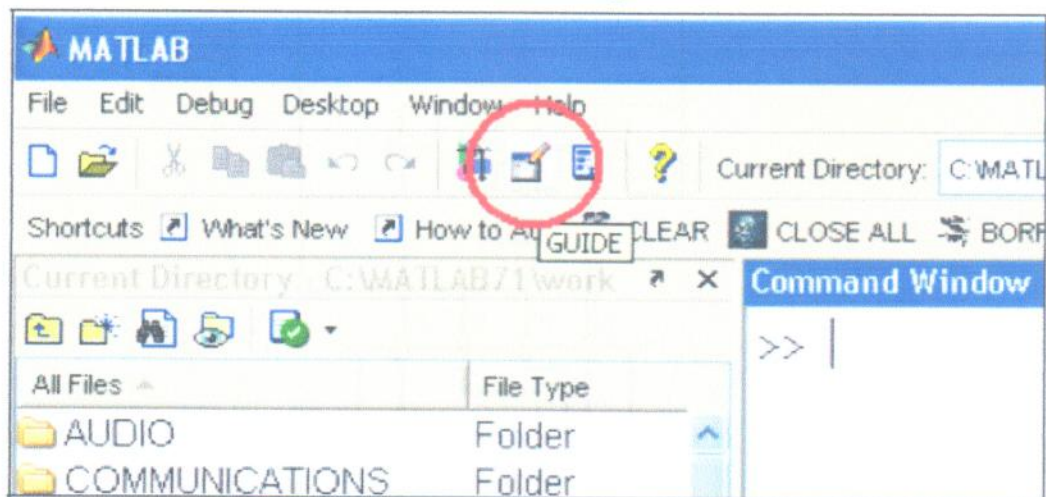


Figura 4.4.1– Icono GUIDE.-

Se presenta el siguiente cuadro de diálogo:

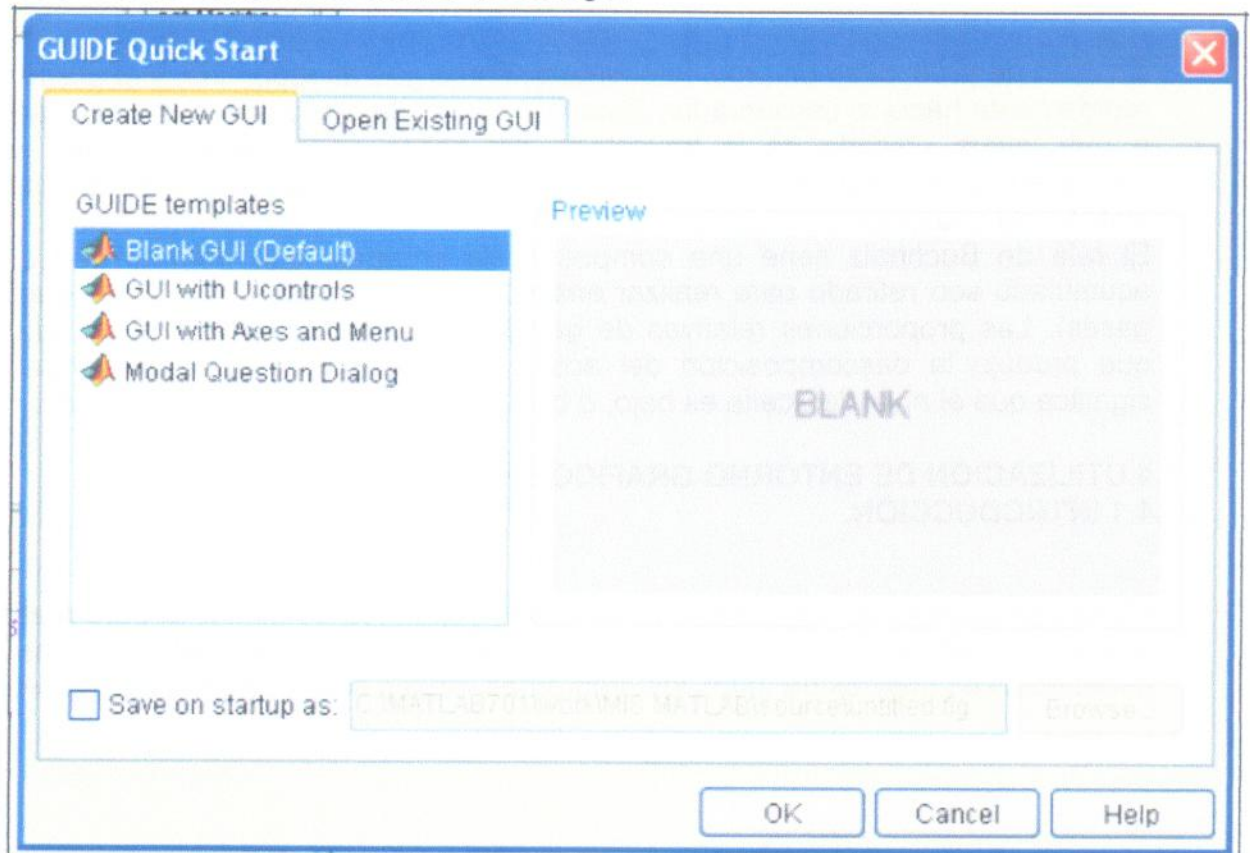


Figura 4.4.2– Ventana de inicio de GUI.-

Se presentan las siguientes opciones:

a) Blank GUI (Default)

La opción de interfaz gráfica de usuario en blanco (viene predeterminada), nos presenta un formulario nuevo, en el cual podemos diseñar nuestro programa.

b) GUI with Uicontrols

Esta opción presenta un ejemplo en el cual se calcula la masa, dada la densidad y el volumen, en alguno de los dos sistemas de unidades. Podemos ejecutar este ejemplo y obtener resultados.

c) GUI with Axes and Menú

Esta opción es otro ejemplo el cual contiene el menú File con las opciones Open, Print y Close. En el formulario tiene un *Popup menu*, un *push button* y un objeto *Axes*, podemos ejecutar el programa eligiendo alguna de las seis opciones que se encuentran en el menú despegable y haciendo click en el botón de comando.

d) Modal Question Dialog

Con esta opción se muestra en la pantalla un cuadro de diálogo común, el cual consta de una pequeña imagen, una etiqueta y dos botones *Yes* y *No*, dependiendo del botón que se presione, el GUI retorna el texto seleccionado (la cadena de caracteres 'Yes' o 'No').

Elegimos la primera opción, *Blank GUI*, y tenemos:

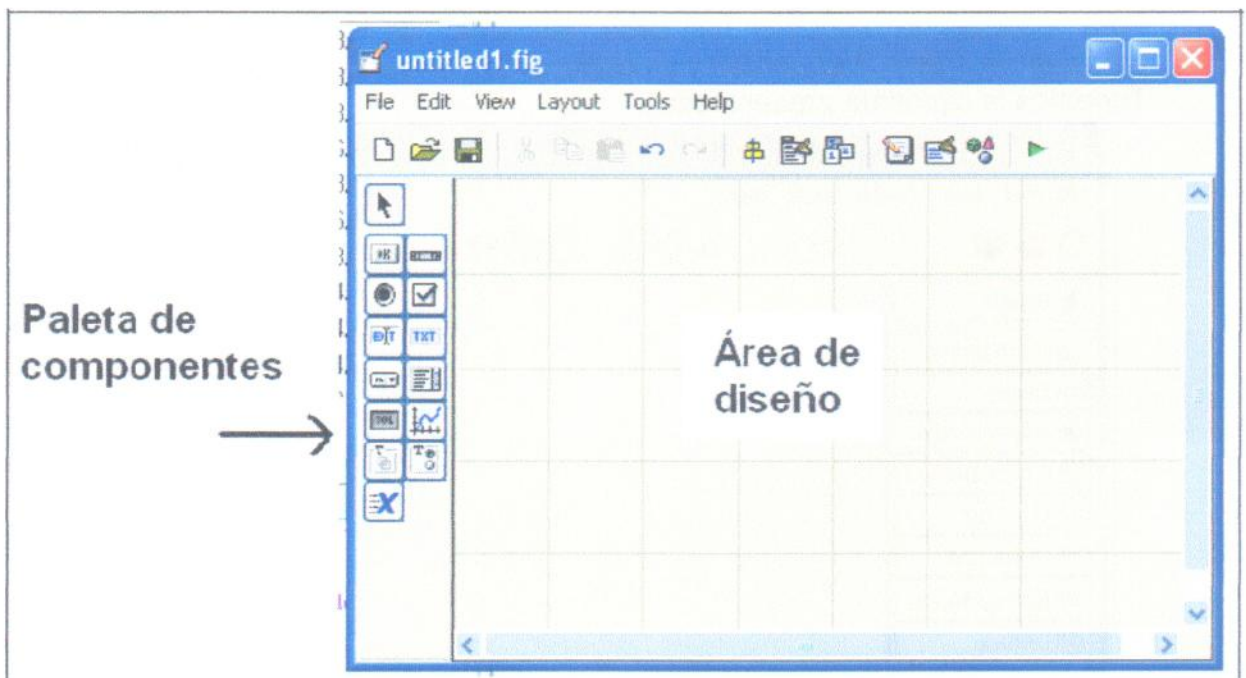


Figura 4.4.3– Entorno de diseño de GUI.-



La interfaz gráfica cuenta con las siguientes herramientas:








	Alinear objetos.
	Editor de menú.
	Editor de orden de etiqueta.
	Editor del M-file.
	Propiedades de objetos.
	Navegador de objetos.
	Grabar y ejecutar (ctrl. + T).

Figura 4.4.4– Herramientas entorno GUI.-

Para obtener la etiqueta de cada elemento de la paleta de componentes ejecutamos: *File>>Preferentes* y seleccionamos *Show names in component palette*. Tenemos la siguiente presentación:

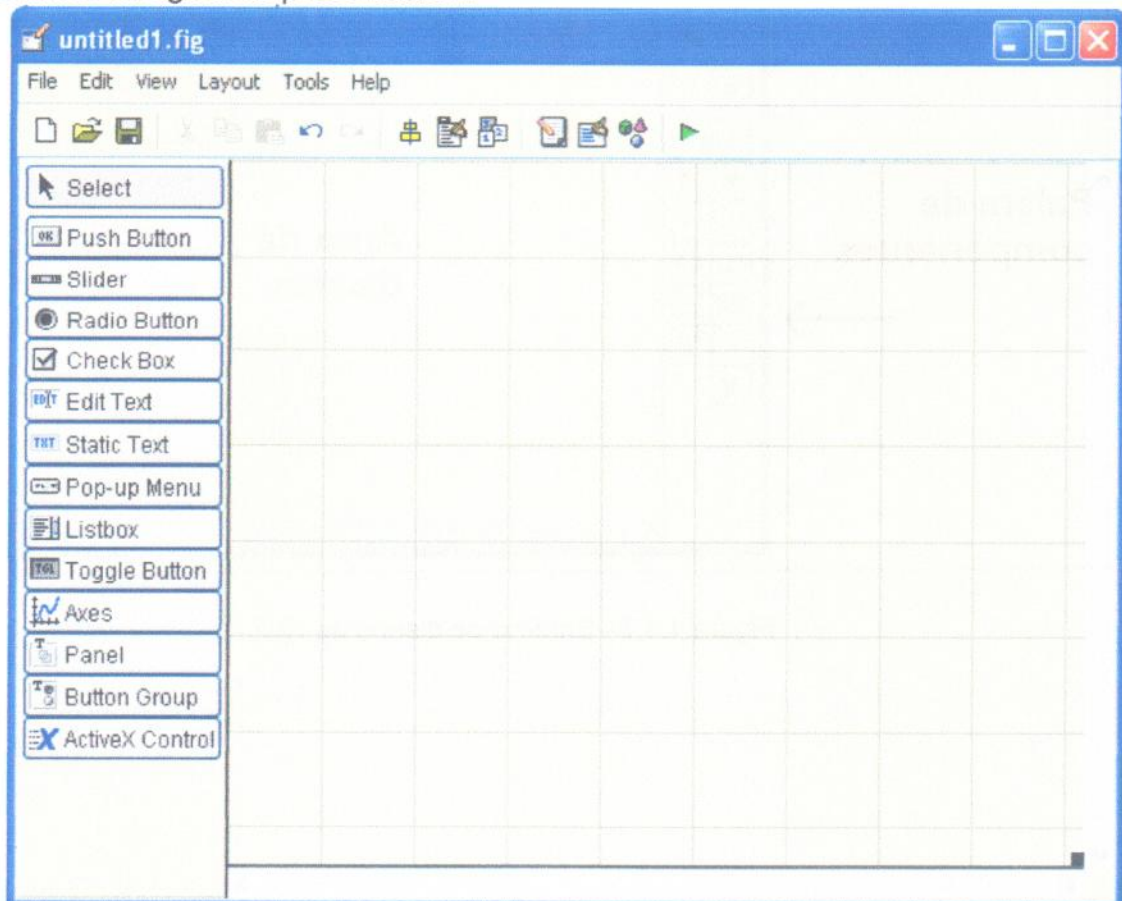


Figura 4.4.5– Entorno de diseño.-

La siguiente tabla muestra una descripción de los componentes de la Fig 4.4.5:

<i>Control</i>	<i>Valor de estilo</i>	<i>Descripción</i>
Check box	'checkbox'	Indica el estado de una opción o atributo
Editable Text	'edit'	Caja para editar texto
Pop-up menu	'popupmenu'	Provee una lista de opciones
List Box	'listbox'	Muestra una lista deslizable
Push Button	'pushbutton'	Invoca un evento inmediatamente
Radio Button	'radio'	Indica una opción que puede ser seleccionada
Toggle Button	'togglebutton'	Solo dos estados. "on" o "off"
Slider	'slider'	Usado para representar un rango de valores
Static Text	'text'	Muestra un string de texto en una caja
Panel button		Agrupar botones como un grupo
Button Group		Permite exclusividad de selección con los radio button

Figura 4.4.6– Descripción de los componentes.-

#### 4.4.3 Propiedades de los componentes

Cada uno de los elementos de GUI, tiene un conjunto de opciones que podemos acceder con click derecho.

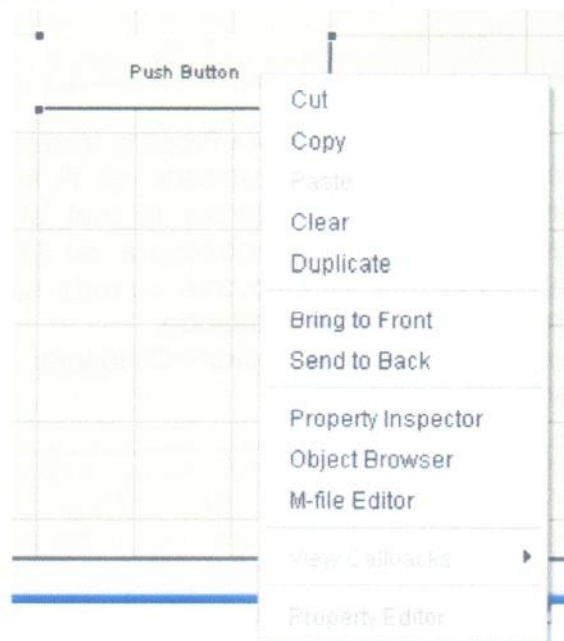


Figura 4.4.7– Opciones del componente.-

La opción *Property Inspector* nos permite personalizar cada elemento.



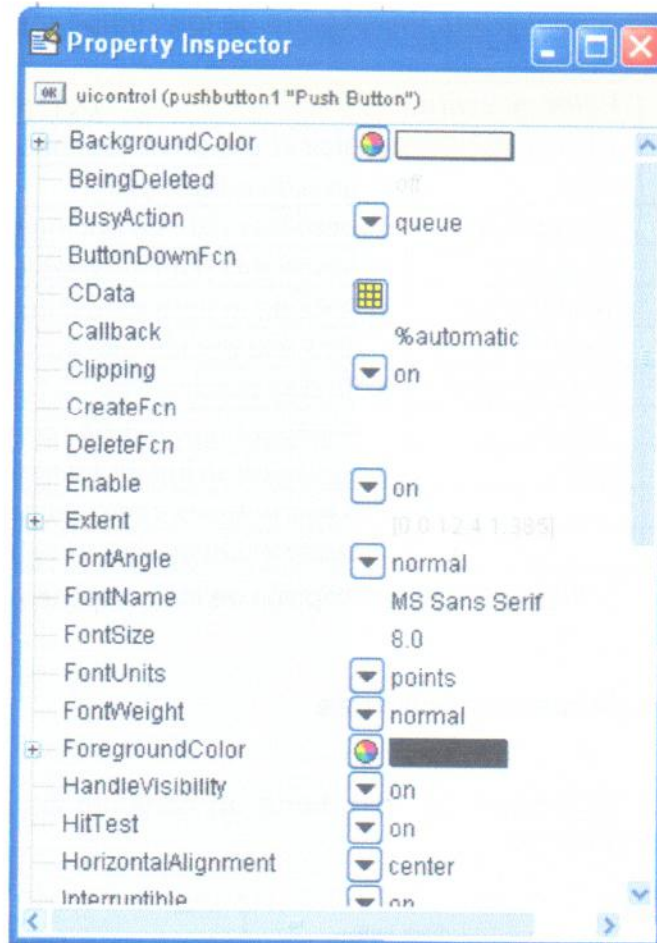


Figura 4.4.8– Entorno Property Inspector.-

Al hacer click derecho en el elemento ubicado en el área de diseño, una de las opciones más importantes es *View Callbacks*, la cual, al ejecutarla, abre el archivo *.m* asociado a nuestro diseño y nos posiciona en la parte del programa que corresponde a la subrutina que se ejecutará cuando se realice una determinada acción sobre el elemento que estamos editando.

Por ejemplo, al ejecutar *View Callbacks>>Callbacks* en el *Push Button*, nos ubicaremos en la parte del programa:

```
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata reserved-to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

A partir de esta línea se escriben las acciones posteriores de presionar el botón

#### 4.4.4 Funcionamiento de una aplicación GUI

Una aplicación GUIDE consta de dos archivos: *.m* y *.fig*. El archivo *.m* es el que contiene el código con las correspondencias de los botones de control de la interfaz y el archivo *.fig* contiene los elementos gráficos.

Cada vez que se adicione un nuevo elemento en la interfaz gráfica, se genera automáticamente un código en el archivo *.m*.

Para ejecutar una Interfaz Gráfica, si la hemos etiquetado con el nombre *curso.fig*, simplemente ejecutamos en la ventana de comandos `>> curso`. O haciendo click derecho en el m-file y seleccionando la opción *RUN*.

#### 4.4.5 Manejo de datos entre los elementos de la aplicación y el archivo *.m*

Todos los valores de las propiedades de los elementos (color, valor, posición, string...) y los valores de las variables transitorias del programa se almacenan en una estructura, los cuales son accedidos mediante un único y mismo *identificador* para todos éstos. Tomando el programa listado anteriormente, el identificador se asigna en:

```
handles.output = hObject;
```

*handles*, es nuestro identificador a los datos de la aplicación. Esta definición de identificador es salvada con la siguiente instrucción:

```
guidata(hObject, handles);
```

*guidata*, es la sentencia para salvar los datos de la aplicación.

**Aviso:** *guidata* es la función que guarda las variables y propiedades de los elementos en la estructura de datos de la aplicación, por lo tanto, como regla general, en cada subrutina se debe escribir en la última línea lo siguiente:

```
guidata(hObject,handles);
```

Esta sentencia nos garantiza que cualquier cambio o asignación de propiedades o variables quede almacenado.

Por ejemplo, si dentro de una subrutina una operación dio como resultado una variable *julio* para poder utilizarla desde el programa u otra subrutina debemos salvarla de la siguiente manera:

```
handles.julio=julio;
```

```
guidata(hObject,handles);
```

La primera línea crea la variable *julio* a la estructura de datos de la aplicación apuntada por *handles* y la segunda graba el valor.

#### 4.4.6 Sentencias GET y SET

La asignación u obtención de valores de los componentes se realiza mediante las sentencias *get* y *set*. Por ejemplo si queremos que la variable *utpl* tenga el valor del *Slider* escribimos:

```
utpl= get(handles.slider1,'Value');
```

Notar que siempre se obtienen los datos a través de los identificadores *handles*.

Para asignar el valor a la variable *utpl* al *statictext* etiquetada como *text1* escribimos:

```
set(handles.text1,'String',utpl);%Escribe el valor del Slider...  
%en static-text
```



#### 4.4.7 Manipulación de archivos

##### Guardar datos

- \_ Copiar (al portapapeles) desde la Ventana de Comandos de Matlab y pegar en un archivo de texto.
- \_ Guardar datos en un archivo binario o ASCII usando la función `save`.
- \_ Guardar planillas de cálculo, datos científicos, imágenes o audio con funciones que vienen con las herramientas de Matlab.
- \_ Guardar datos en un archivo utilizando las operaciones de Entrada/Salida que proporciona Matlab (`fwrite`, `fprintf`, etc.).

##### Recuperar datos

- \_ Ingresar (manualmente) o pegar datos en la Ventana de Comandos.
- \_ Crear un script para inicializar matrices u otras estructuras de datos.
- \_ Cargar archivos binarios o ASCII utilizando `load`.
- \_ Cargar planillas de cálculo, datos científicos, imágenes o audio con funciones que vienen con las herramientas de Matlab.
- \_ Cargar datos desde un archivo utilizando las operaciones de Entrada/Salida que proporciona Matlab (`fread`, `fscanf`, etc.).

##### Guardar datos usando `save`

\_ Permite guardar variables del espacio de trabajo en el disco.

\_ Sintaxis:

`save`

`save nombre_de_archivo`

`save nombre_de_archivo variables`

`save nombre_de_archivo opciones`

`save nombre_de_archivo variables opciones`

`save ('nombre_de_archivo', 'var1', 'var2', ...)`

\_ `save`

Guarda todas las variables en el archivo `matlab.mat`.

\_ `save nombre_de_archivo`

Guarda todas las variables en el archivo especificado.

\_ `save nombre_de_archivo variables`

Guarda solamente las variables especificadas (separadas por espacios) en el archivo especificado.

\_ `save nombre_de_archivo opciones`

Guarda todas las variables en el archivo especificado, utilizando alguna de las siguientes opciones:

<code>-append</code>	Agrega nuevas variables a un archivo preexistente.
<code>-ascii</code>	Guarda datos en formato ASCII con números de hasta 8 dígitos.
<code>-ascii -tabs</code>	Ídem anterior, pero las columnas se separan con tabuladores.
<code>-ascii -double</code>	Guarda datos en formato ASCII con números de hasta 16 dígitos.
<code>-ascii -double -tabs</code>	Ídem anterior, pero las columnas se separan con tabuladores.
<code>-mat</code>	Guarda datos en formato binario (el que viene por defecto)

Figura 4.4.9– Opciones de `save`.-

#### 4.4.8 Formatos de archivo

- \_ Binario
- \_ Los datos (numéricos o alfabéticos) se guardan en representación binaria.
- \_ Los datos numéricos se convierten a punto flotante de máxima precisión y se pasan a binario.
- \_ Puede guardarse y recuperarse más de una variable.
- \_ ASCII
- \_ Los datos (solo números) se guardan en representación ASCII.
- \_ Los números se guardan como texto. La precisión por defecto es simple, pero se pueden guardar números de doble precisión.
- \_ Por ejemplo, el número 27 se guarda como el texto "2.7000000e+001" (ocupa 14 bytes) en precisión simple y "2.7000000000000000e+001" (ocupa 23 bytes) en precisión doble.
- \_ Puede guardarse una única variable.
- \_ Las columnas se separan por espacios o tabuladores.

#### 4.4.9 Cargar datos usando load

- \_ Permite cargar variables desde el disco.
- \_ Sintaxis:  
load  
load nombre\_de\_archivo  
load nombre\_de\_archivo *variables*  
load -ascii nombre\_de\_archivo  
load -mat nombre\_de\_archivo  
load('arg1', 'arg2', 'arg3', ...)
- \_ load  
Carga las variables guardadas en el archivo matlab.mat.
- \_ load nombre\_de\_archivo  
Carga las variables desde el archivo especificado.
- \_ load nombre\_de\_archivo *variables*  
Carga solamente las variables especificadas (separadas por espacios) desde el archivo especificado.
- \_ load -ascii nombre\_de\_archivo  
Carga las variables desde el archivo especificado, tratándolo como si su contenido estuviera en ASCII.
- \_ load -mat nombre\_de\_archivo  
Carga las variables desde el archivo especificado, tratándolo como si su contenido estuviera en binario.



#### 4.4.10 Entrada y Salida de bajo nivel

\_ Receta para escribir un archivo:

- 1: Abro el archivo para escribirlo. (**'fopen'**)
- 2: Mientras haya datos para guardar,
  - 2.1: Guardo los datos. (**'fprintf'**)
- 3: Cierro el archivo. (**'fclose'**)

\_ Receta para leer un archivo:

- 1: Abro el archivo para leerlo. (**'fopen'**)
- 2: Mientras haya datos para leer. (**'feof'**)
  - 2.1: Leo los datos. (**'fscanf'**)
  - 2.2: Realizo operaciones con los datos.
- 3: Cierro el archivo. (**'fclose'**)

\_ Consideraciones:

\_ La operación **fopen** retorna un número (denominado *handler*) que representa al archivo abierto. Las demás operaciones utilizan ese *handler* para trabajar con el archivo.

\_ Una vez abierto el archivo, todas las operaciones **fprintf** agregan nuevos datos.

\_ Los archivos poseen un *puntero de lectura*. Cada vez que se invoca la operación **fscanf**, el puntero avanza tantos bytes como datos se hayan leído.

\_ Se puede consultar si el puntero llegó al final del archivo (*end of file*, o *eof*) utilizando la operación **feof**.

\_ Hay que recordar siempre cerrar los archivos con **fclose**.

\_ Sintaxis de **fopen**:

`handler = fopen(nombre_de_archivo)`

**handler = fopen**(nombre\_de\_archivo, permiso)

Abre el archivo para el tipo de acceso especificado. Los tipos de acceso son:

'r'	Abrir el archivo para leerlo.
'w'	Abrir el archivo, o crearlo, para escribirlo. Si existe contenido, descartarlo.
'a'	Abrir el archivo, o crearlo, para escribirlo. Agregar nuevo contenido al final del archivo.

Figura 4.4.10– Tipos de acceso al archivo.-

\_ Sintaxis de **fprintf**:

`count = fprintf(handler, formato, A, ...)`

\_ Descripción:

Da formato a los datos de la matriz A (y todas las que se especifiquen) y escribe en el archivo.

Retorna la cantidad de bytes que se escribieron.

#### 4.4.11 ¿Qué es el formato?

El formato es un texto (*string*) que contiene caracteres ordinarios y caracteres especiales, denominados *caracteres de conversión*.

También puede contener *caracteres de escape*.

\_ Caracteres de conversión

Se utilizan para controlar la notación, alineación, dígitos significativos, ancho del campo y otros aspectos de un valor escalar o una matriz.

Comienzan siempre con %.

\_ Caracteres de escape

Se utilizan para representar teclas de control del teclado.

Ejemplos de teclas de control: *enter*, *tab*, *esc*, etc.

Comienzan siempre con \.

\_ Algunos caracteres de conversión

Carácter de conversión	Descripción
%c	Carácter
%f	Notación de punto fijo
%e	Notación exponencial

Figura 4.4.11– Caracteres de conversión.-

\_ Algunos caracteres de escape

Carácter de escape	Descripción
\b	Retroceso (borrar)
\n	Nueva línea (enter)
\t	Tabulador horizontal (tab)
\\	Barra (\)
%%	Porcentaje (%)

Figura 4.4.12– Caracteres de escape.-

\_ Sintaxis de **fscanf**:

**A = fscanf**(handler, formato)

**A = fscanf**(handler, formato, cantidad)

\_ Descripción de **fscanf**

\_ **A = fscanf**(handler, formato)

Lee todos los datos (llega hasta el final) del archivo y, luego de convertirlos de acuerdo al formato especificado, los retorna en la matriz A.

\_ **A = fscanf**(handler, formato, cantidad)

Lee en A solamente la cantidad de datos especificados.

Las opciones válidas para la cantidad son:



n	Lee como máximo n números, caracteres o strings.
inf	Lee hasta el final del archivo.
[m, n]	Lee como máximo m*n números, caracteres o strings. Llena una matriz con m filas como máximo. El valor de n puede ser inf, pero no así el valor de m.

Figura 4.4.13– Cantidad de datos a leer.-

\_ Los caracteres de conversión válidos para `fscanf` son:

Carácter de conversión	Descripción
%c	Secuencia de caracteres. El número está especificado por el ancho del campo (ej.: '%10c' lee 10 caracteres)
%d	Enteros en base decimal
%f	Números de punto flotante
%s	Palabras (series de caracteres juntos hasta llegar al espacio en blanco)

Figura 4.4.14– Caracteres de conversión.-

\_ Sintaxis de `fclosef`:

estado = `fclosef`(handler)

\_ Descripción:

Cierra el archivo y retorna 0 si no han ocurrido errores y -1 en caso contrario.

## 5 METODOLOGÍA Y RESULTADOS

### 5.1 DIAGRAMA DE FLUJO

Teniendo en cuenta que el proceso de cálculo se hace en ciertos momentos un proceso iterativo, se pretende llevar este proceso en un diagrama de flujo para poder sistematizar el proceso y plasmarlo en un programa de computadora.

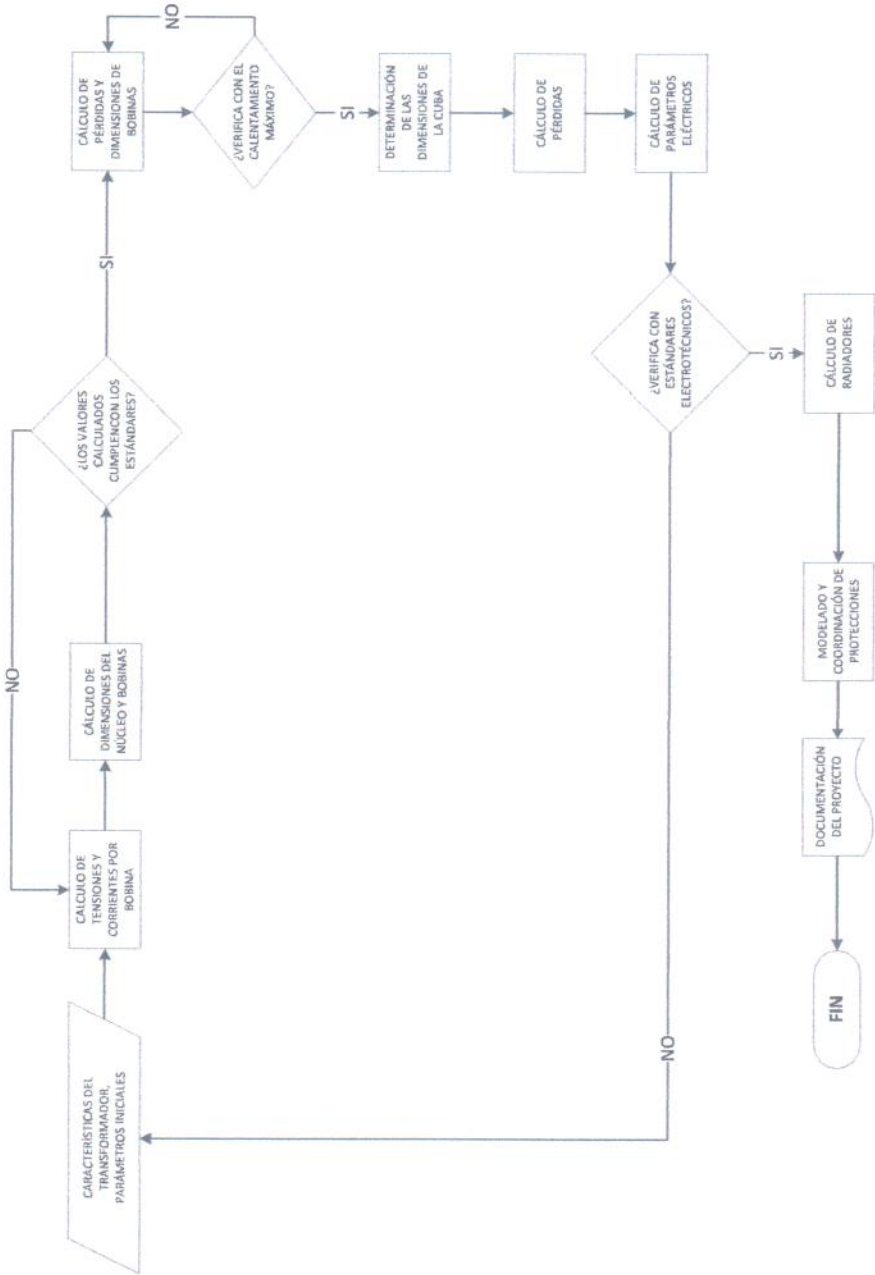


Figura 5.1.1– Diagrama de flujo.-



## 5.2 CREACIÓN DE INTERFAZ DE INGRESO DE PARÁMETROS DEL TRANSFORMADOR

Según el diagrama de flujo presentado se procede a diseñar un algoritmo de programación para llevar a cabo dicho proceso.

### 5.2.1 CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR, PARÁMETROS INICIALES.

Para ingresar las características principales del transformador se diseñó el siguiente entorno gráfico que permite el ingreso de los parámetros principales de la máquina. Se puede observar que en caso de querer estimar algún parámetro con la intención de ver las modificaciones que se pueden introducir variando los distintos parámetros, se pueden obtener valores estimados de las tablas que se obtienen a través de los gráficos complementarios.

Datos Principales	
Potencia Primaria Absorbida [kVA]	0
Tensión Primaria Compuesta [kV]	0
Tensión Secundaria Compuesta [kV]	0
Frecuencia [Hz]	50
Densidad de Flujo (Diseño) [Tesla]	0
Factor de utilización	0 <input type="button" value="Gráfico"/>
Espesor de la chapa de Fe-Si [mm]	0 <input type="button" value="Gráfico"/>
Pérdidas en el Fe [W/kg]	0

Regulación de tensión primaria	
Conexión del transformador	DYN
Puntos de regulación	Sin regulación

Resultados del Cálculo

<input type="button" value="Bobinados"/>	<input type="button" value="Dimensiones"/>	<input type="button" value="Modelado"/>
<input type="button" value="Aislaciones"/>	<input type="button" value="Pérdidas"/>	<input type="button" value="Parámetros"/>

Figura 5.2.1– Panel de valores de diseño.-

En este proceso se deben tener los parámetros iniciales de cálculo de la máquina a calcular:

- Transformador trifásico;  $m=3$ ;
- Potencia primaria absorbida [kVA]
- Tensión primaria, compuesta
- Tensión secundaria, compuesta en vacío
- Conexiones
- Frecuencia  $f=50$  o  $60$  [Hz] (en argentina es  $50$  [Hz])
- Tipo: en baño de aceite, refrigeración natural
- Servicio continuo
- Tensiones primarias por fase de cada una de las tomas

En el siguiente extracto del archivo m. se puede observar cómo se obtienen los distintos valores de diseño del transformador.

```
%potencia: potencia del transformador en[kVA]
potencia=str2num(get(handles.potencia,'string'));
%tp: tensión primaria del transformador en[kV]
tp=str2num(get(handles.tension1,'string'));
%ts: tensión secundaria del transformador en[kV]
ts=str2num(get(handles.tension2,'string'));
%f: frecuencia del transformador en[Hz]
f=(get(handles.frecuencia,'value'));
if f==1
    f=50;
else
    f=60;
end
%Densidad de flujo magnetico B[T]
b=str2num(get(handles.B,'string'));
%Factor de utilización del núcleo
ko=str2num(get(handles.cl,'string'))
%Espesor de la chapa de silicio
espesor=str2num(get(handles.esp,'string'));
%Pérdidas en el hierro por unidad de masa [W/kg]
perd=str2num(get(handles.perdida,'string'));
%Conexión del transformador
%Según la misma se calcula el factor de
%afectación de tensión en la bobina
conexion=get(handles.conexion,'value');
switch conexion
    case 1
        m1=1;
        m2=sqrt(3);
    case 2
        m1=1;
        m2=1;
    case 3
        m1=sqrt(3);
        m2=1;
    case 4
        m1=sqrt(3);
        m2=sqrt(3);
end
```

En las siguientes líneas se muestra el proceso para que el usuario no pueda continuar con el cálculo si es que no ingresa los parámetros de diseño necesarios para el cálculo. Evita errores de tipeo o de clickeo.

```
%-----HABILITAR O DESHABILITAR BOTON
%habilitar o deshabilitar el boton para no tener problemas de
calculo
volver=1;
if potencia==0
```



```
f = warndlg('Debe ingresar los parametros del
transformador', 'Advertencia');
end
if potencia~=0
    volver=0;
end
if tp==0
    if volver==0
        f = warndlg('Debe ingresar los parametros del
transformador', 'Advertencia');
        volver=1;
    end
end
if tp==0
    if volver==0
        f = warndlg('Debe ingresar los parametros del
transformador', 'Advertencia');
        volver=1;
    end
end
if ts==0
    if volver==0
        f = warndlg('Debe ingresar los parametros del
transformador', 'Advertencia');
        volver=1;
    end
end
if b==0
    if volver==0
        f = warndlg('Debe ingresar los parametros del
transformador', 'Advertencia');
        volver=1;
    end
end
if ko==0
    if volver==0
        f = warndlg('Debe ingresar los parametros del
transformador', 'Advertencia');
        volver=1;
    end
end
if espesor==0
    if volver==0
        f = warndlg('Debe ingresar los parametros del
transformador', 'Advertencia');
        volver=1;
    end
end
if perd==0
    if volver==0
        f = warndlg('Debe ingresar los parametros del
transformador', 'Advertencia');
        volver=1;
    end
end
```

```

end
end
if volver==0

```

Para calcular el diámetro, el largo de la columna y el ancho de la ventana se utiliza una función específica llamada como un subproceso dentro del cuerpo principal del programa.

```

function[C,D,L,a]=Iniciales(p,v,verif,A)
% Ahora obtenemos el coeficiente de utilización en función de
la potencia
%C[kVA/cm3]
S=log(p);
P=p;
if (v<=6)
    R=1;
    C=(2.213*S-2.810)/1000;
elseif (v<30)
    R=2;
    C=(2.04*S-3.9648)/1000;
elseif (v<=66)
    R=3;
    C=(1.8858*S-4.405)/1000;
else
    R=4;
    C=(1.964*S-7.5236)/1000;
end
vol=P/(3*C);
%Ahora obtenemos el diámetro en función de la potencia
%D[cm]
D=4.3586*S-5.6242;
%Como V=D*L despejo L en función de estos parámetros
%L[cm]
L=vol/(D^2);
%Por ultimo se establece el ancho de ventana
%a[cm]
T=L/D;
a=(0.33*T-0.1)*D;
if verif==1
    a=A+1
end
end

```

### 5.2.2 CÁLCULO DE TENSIONES Y CORRIENTES POR BOBINAS.

Siguiendo con la estructura del programa se calculan los parámetros del bobinado del transformador, cantidad de espiras, corriente, sección y distancias aislantes entre bobinados.



```

%-----CALCULO DE BOBINADOS-----
%-----SECUNDARIO-----
%Cantidad de espiras en secundario (BT)
NN2=(tsf)/(ko*(D/6.71)^2*b)
N2=redondear(NN2)
%tension por espiras del secundario (BT)
UN2=tsf/N2
%Corriente Bobinado Secundario (BT)
I2=(potencia*1000)/(3*tsf)
%Cálculo de Sección de Bobinado Secundario [mm²]
%Tomando como valor de densidad de corriente 3.5[A/mm]
%ya que se trata de un transformador en baño de aceite.
SS2=(I2/3.5)
S2=redondear(SS2)
%-----PRIMARIO-----
%Cantidad de espiras primario (AT) y sus tomas
NN1=NN2*(tpf/tsf)
%Calculamos los distintos puntos del transformador
r1=2.5;
r2=-2.5;
r3=5;
r4=-5;
r5=7.5;
r6=-7.5;
Nr1=((r1/100)*NN1)
Nr1=redondear(Nr1);
Nr2=((r2/100)*NN1)
Nr2=redondear(Nr2);
Nr3=((r3/100)*NN1)
Nr3=redondear(Nr3);
Nr4=((r4/100)*NN1)
Nr4=redondear(Nr4);
Nr5=((r5/100)*NN1)
Nr5=redondear(Nr5);
Nr6=((r6/100)*NN1)
Nr6=redondear(Nr6);
if Nr1>Nr2
    Nr=NN1+Nr1
else
    Nr=NN1+Nr2
end
if Nr3>Nr4
    Nrr=NN1+Nr3
else
    Nrr=NN1+Nr4
end
if Nr>Nrr
    Nrrr=Nr
else
    Nrrr=Nrr
end
if Nrrr>Nr5
    Nrt=Nrrr
    
```

```

else
    Nrt=NN1+Nr5
end
Nrt=redondear(Nrt)
N1=redondear(NN1)
I11=(potencia/300*r1)
I12=(potencia/300*r2)
I13=(potencia/300*r3)
I14=(potencia/300*r4)
I15=(potencia/300*r5)
I16=(potencia/300*r6)
%tension por espiras del primario (AT)
UN1=tpf/N1
%Corriente Bobinado Primario (AT)
I10=(potencia*1000)/(3*tpf)
%Cálculo de Sección de Bobinado Primario [mm²]
%Tomando como valor de densidad de corriente 3.5[A/mm]
%ya que se trata de un transformador en baño de aceite.
SS1=(I10/3.5)
S1=redondear(SS1)
%-----DIÁMETROS-----
%Calculo los respectivos diámetros y la cantidad de alambres en
paralelo
%D1: diámetro del bobinado primario (AT)
%D2: diámetro del bobinado secundario(BT)
D1=sqrt((4*SS1/(pi)))
Daux1=(D1/2);
n1=1;
n2=1;
if D1>10
    n1=2
    D12=sqrt((4*SS1/(n1*pi)))
    D1=D12
elseif Daux1>10
    n1=3
    D13=sqrt((4*SS1/(n1*pi)))
    D1=D13
end
D2=sqrt((4*SS2/(pi)))
Daux2=(D2/2);
if D2>10
    n2=2
    D22=sqrt((4*SS2/(n2*pi)))
    D2=D22
elseif Daux2>10
    n2=3
    D23=sqrt((4*SS2/(n2*pi)))
    D2=D23
end
[D1,D2,n1,n2]=diametro(SS1,SS2,D1,D2,n1,n2)
%-----CÁLCULO DE LAS DISTANCIAS AISLANTES CORRESPONDIENTES-----
[k,m,j,l,p,o,n,g] = aislantes( tp,ts )
%k: distancia entre bobinado de SECUNDARIO y columna [mm]
    
```



```

%j: distancia entre bobinas de SECUNDARIO y PRIMARIO [mm]
%m: grosor del tubo aislante entre SECUNDARIO y núcleo [mm]
%l: grosor de los tubos entre SECUNDARIO y PRIMARIO [mm]
%p: distancia entre bobinas de PRIMARIO y columna sucesiva [mm]
%o: distancia axial desde el final de SECUNDARIO al yugo [mm]
%n: distancia axial desde el final de PRIMARIO al yugo [mm]
%g: distancia entre bobina y dimcuba [mm]
%-----CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DE LOS BOBINADOS-----
[ V,C1,C2,R1,R2,R,B,B1,B2,aisl,bobi ] = dimensiones(
L,a,k,m,j,l,p,o,n,g,D1,D2,N2,Nrt,n2,n1)
%V:Verificación while
%C1:Capas bobinado primario(AT)
%C2:Capas bobinado secundario(BT)
%R1:Ancho bobina primario (AT) [mm]
%R2:Ancho bobina secundario (BT) [mm]
%R:Espacio radial ocupado [mm]
%B:Longitud axial bobinado [mm]
if V==0
break
end
end
end

```

Para calcular las distancias aislantes también se utiliza una función como un subproceso del programa.

```

%-----CÁLCULO DE LAS DISTANCIAS AISLANTES CORRESPONDIENTES-----
[k,m,j,l,p,o,n,g] = aislantes( tp,ts )
%k: distancia entre bobinado de SECUNDARIO y columna [mm]
%j: distancia entre bobinas de SECUNDARIO y PRIMARIO [mm]
%m: grosor del tubo aislante entre SECUNDARIO y núcleo [mm]
%l: grosor de los tubos entre SECUNDARIO y PRIMARIO [mm]
%p: distancia entre bobinas de PRIMARIO y columna sucesiva [mm]
%o: distancia axial desde el final de SECUNDARIO al yugo [mm]
%n: distancia axial desde el final de PRIMARIO al yugo [mm]
%g: distancia entre bobina y dimcuba [mm]

```

Función aislantes:

```

function [k,m,j,l,p,o,n,g] = aislantes( v1,v2 )
%se calcula con tensiones de línea
%v1 tensión de línea del primario
%v2 tensión de línea del secundario
%k distancia entre bobinado de BT y columna
k=(0.0019)*(v2^2)+(0.4782)*v2+0.9632
%j distancia entre bobinas de BT y AT
j=(0.0019)*(v1^2)+(0.4782)*v1+0.9632
%m grosor del tubo aislante entre BT y núcleo
m=(-0.0002)*(v2^2)+(0.1808)*v2-0.2141
%l grosor de los tubos entre BT y AT
l=(-0.0002)*(v1^2)+(0.1808)*v1-0.2141
%p distancia entre bobinas de AT y columna sucesiva
p=(0.8593*v1)+0.1083

```

```

%o distancia axial desde el final de BT al yugo
o=(0.0033)*(v2^2)+(1.331)*v2+2.8621
%n distancia axial desde el final de AT al yugo
n=(0.0033)*(v1^2)+(1.331)*v1+2.8621
%g distancia entre bobina y cuba
g=(20*v1/9)+(20/9)
if v1<10
    j=5
    l=2
    n=10
    p=10
end
if v2<10
    k=5
    m=2
    o=10
end
end

```

### 5.2.3 CÁLCULO DE DIMENSIONES DEL NÚCLEO.

Cuando hablamos de dimensiones del núcleo, hablamos de las dimensiones del núcleo y de los bobinados respetando las distancias aislantes correspondientes. Para ello también utilizamos una función como subprograma

```

[ V,C1,C2,R1,R2,R,B,B1,B2,aisl,bobi ] = dimensiones(
L,a,k,m,j,l,p,o,n,g,D1,D2,N2,Nrt,n2,n1)
%V:Verificación while
%C1:Capas bobinado primario(AT)
%C2:Capas bobinado secundario(BT)
%R1:Ancho bobina primario (AT) [mm]
%R2:Ancho bobina secundario (BT) [mm]
%R:Espacio radial ocupado [mm]
%B:Longitud axial bobinado [mm]
if V==0
break
end
end

```

Función dimensiones:

```

function [ V,C1,C2,R1,R2,R,B,B1,B2,aisl,bobi ] = dimensiones(
L,a,k,m,j,l,p,o,n,g,D1,D2,N2,N1,n2,n1)
%Con esta funcion se determinan las dimensiones de los
bobinados
%y se verifican los valores obtenidos.
%D: diametro del nucleo del transformador [cm]
%L: largo de la columna del transformador [cm]
%a: ancho de ventana del transformador [cm]
%k: distancia entre bobinado de BT y columna
%j: distancia entre bobinas de BT y AT
%m: grosor del tubo aislante entre BT y núcleo
%l: grosor de los tubos entre BT y AT

```



```

%p: distancia entre bobinas de AT y columna sucesiva
%o: distancia axial desde el final de BT al yugo
%n: distancia axial desde el final de AT al yugo
%g: distancia entre bobina y cuba
%D1: diámetro del bobinado primario (AT)
%D2: diámetro del bobinado secundario(BT)
%N2: Cantidad de espiras en secundario (BT)
%N1: Cantidad de espiras en primario (AT)
%n2: N° de alambres en paralelo en secundario (BT)
%n1: N° de alambres en paralelo en primario (AT)
%---Bobinado de BT---
%Axialmente
%Espacio ocupado por las bobinas aislantes[mm]
A2=2*o
%longitud disponible para el bobinado de BT[mm]
B2=(L*10)-A2
%cantidad de capas del bobinado de BT
CC2=(D2*N2*n2)/B2
if CC2<1
    CC2=1
end
%Radialmente
%grueso radial del bobinado de BT[mm]
%utilizando aislacion de papel de 0.25[mm] de espesor y
contemplando un
%alambre esmaltado con capa de aislación de 0.10 [mm] y tomando
0.10[mm]
%por cuestiones de diseño
R2=(D2+0.45)*CC2
C2=redondear(CC2);
%Espacio radial ocupado por las distancias aislantes total[mm]
aisl=k+j+(p/2)+m+j+2
%Espacio radial disponible para los bobinados
total=((a*10)/2)-aisl
%Espacio total disponible para el bobinado de AT
Disp=total-R2
%---Bobinado AT---
%Axialmente
%Espacio ocupado por las bobinas aislantes[mm]
A1=2*n
%longitud disponible para el bobinado de AT[mm]
B1=(L*10)-A1
%cantidad de capas del bobinado de AT
CC1=(D1*N1*n1)/B1
if CC1<1
    CC1=1
end
%Radialmente
%grueso radial del bobinado de AT[mm]
%utilizando aislacion de papel de 0.25[mm] de espesor y
contemplando un
%alambre esmaltado con capa de aislación de 0.10 [mm] y tomando
0.10[mm]
    
```

```

%por cuestiones de diseño
R1=(D1+0.45)*CC1
C1=redondear(CC1);
%Verificación del espacio
if R1>Disp
    V=1
end
if R1<Disp
    V=0
end
if B1<B2
    B=B2
    bobi=2;
else
    B=B1
    bobi=1;
end
R=R1+R2+total
end
    
```

#### 5.2.4 ESTANDARIZACIÓN DE VALORES CALCULADOS.

Para la estandarización de los valores se incluye en la estructura principal del programa una sentencia while (mientras) que nos introduce en un bucle repetitivo del cual se sale una vez que se cumple con las distancias correspondientes acorde a los parámetros eléctricos y mecánico especificados por las normas de diseño.

```

Línea 480- while 1
Línea 613- if V==0
Línea 614- break
    
```

#### 5.2.5 CÁLCULO DE PÉRDIDAS Y VERIFICACIÓN DEL CALENTAMIENTO MÁXIMO.

Para calcular las pérdidas de la máquina se utiliza una función dentro de la estructura principal del programa.

```

function [ cBT,cAT,bobinasBT,bobinasAT ] = calentamiento(
N1,N2,I1,I2,B,R1,R2 )
%CALENTAMIENTO DE LOS BOBINADOS
%Con esta función determino la cantidad de bobinas por bobinado
para
%tener un menor calentamiento
%-----BT-----
bobinasBT=1
%Carga lineal por bobina [Av/cm]
Qb2=(N2*I2)/(B/(10))
%Índice de calentamiento
    
```



```

Delta2=(Qb2*3);
while 1
%Relación rectangular de la bobina
rec2=(R2/(B/bobinasBT));
calentamiento10BT=(416.67*rec2)+833.33
calentamiento15BT=(615.38*rec2)+1246.2
if Delta2<calentamiento10BT
cBT=10
end
if Delta2>calentamiento10BT
if Delta2<calentamiento15BT
cBT=15
end
end
if Delta2>calentamiento15BT
cBT=20
end
if cBT>15
bobinasBT=bobinasBT+1
else
break
end
end
%-----AT-----
bobinasAT=1
%Carga lineal por bobina [Av/cm]
Qb1=(N1*I1)/(B/(10))
%Índice de calentamiento
Delta1=(Qb1*3);
while 1
%Relación rectangular de la bobina
rec1=R1/(B/bobinasAT)
calentamiento10AT=(416.67*rec1)+833.33
calentamiento15AT=(615.38*rec1)+1246.2
if Delta1<calentamiento10AT
cAT=10
end
if Delta1>calentamiento10AT
if Delta1<calentamiento15AT
cAT=15
end
end
if Delta1>calentamiento15AT
cAT=20
end
if cAT>15
call=1
bobinasAT=bobinasAT+1
else
call=0
break
end
end
    
```

### 5.2.6 DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LA CUBA.

Para calcular las dimensiones de la cuba también se utiliza una función dentro de la estructura principal del programa.

```
%-----CÁLCULO DE DIMENSIONES DE LA DIMCUBA-----
%altura: altura de la dimcuba en [cm]
%largo: largo de la dimcuba en [cm]
%ancho: ancho de la dimcuba en [cm]
%perimetro: perimetro de la dimcuba en [cm]
%g: distancia entre parte activa y dimcuba en [cm]
[ altura,largo,ancho,perimetro,g ] = cuba( tp,M,D,L,R1,R2,aisl
)
%volumen: volumen de la dimcuba en m³
volumen=(altura*largo*ancho)/1000000
```

```
function[altura,largo,ancho,perimetro,g ] = cuba(
tp,M,D,L,R1,R2,aisl )
%Esta funcion permite calcular las dimensiones de la cuba
%culatas: distancia ente culatas del núcleo [cm]
culatas=((2*M)+D)
%hyugo: altura del yugo [cm]
hyugo=D
%hnucleo: altura neta del núcleo [cm]
hnucleo=L+(2*hyugo)
%Dbobinas: ancho de bobinas [cm]
Dbobinas=(D)+((R1+R2+aisl)/10);
%longbobi: longitud total del conjunto activo
longbobi=(2*M)+(Dbobinas*10)
%zócalo de apoyo
z=5
%distancia entre partes activas
g=((2.2222*tp)+11.111)/10
if g<1
    g=3
end
ancho=Dbobinas+(2*g)+10;
ancho=redondear(ancho)
largo=(2*M)+Dbobinas+(2*g)+10;
largo=redondear(largo)
perimetro=2*(ancho+largo)
altura=hnucleo+z+(2*g)+10;
altura=redondear(altura)
end
```



### 5.2.7 CÁLCULO DE PÉRDIDAS.

```
%-----CÁLCULO DE PERDIDAS EN EL Fe Y EL Cu-----
%Fe: pérdidas en el hierro
%Cu: pérdidas en el cobre
[Fe,Cu ] = perdidas( perd,D,L,M,S1,S2,I10,I2,m,j,l,R2,R1,N2,Nrt
);
%Pérdidas totales
FeCu=Fe+Cu;
%q
q=(N1*I10)/L;
```

```
function [ Fe,Cu ] = perdidas(
perd,D,L,M,S1,S2,I10,I2,m,j,l,R2,R1,N2,N1 );
%Con esta función se calculan las pérdidas en el cobre y en el
hierro
%-----CÁLCULO DE PÉRDIDAS EN EL HIERRO-----
%perd: pérdidas por unidad de masa
%D: diametro de la columna en cm
%L: largo de columna en cm
%M: distancia entre ejes de columna en cm
%volumen columna
columna=(pi*D*L);
%volumen del yugo tomando como sección cuadrada de arista D
yugo=(M+D)*(D*D);
%volumen total en m³
volfe=((3*columna)+(2*yugo))/1000000;
%masa de hierro tomando como densidad=7650[kg/m³]
masafe=(7650*volfe);
%pérdidas en el hierro [W]
Fe=masafe*perd;
%-----CÁLCULO DE PÉRDIDAS EN EL COBRE-----
%datos importantes
%resistividad del cobre 0.0215[?mm²/m] a 75°C
%peso específico del cobre 8900[kg/m³]
%espira media BT en [mm]
EMBT=(( (D/10)+m)+((D/10)+m+R2))/2;
%longitud espira media BT en [m]
LEMBT=(pi*EMBT)/1000;
%espira media AT en [mm]
EMAT=(( (D/10)+m+R2+j+l)+((D/10)+m+R2+j+l+R1))/2;
%longitud espira media AT en [m]
LEMAT=(pi*EMAT)/1000;
%Peso del bobinado de cobre de BT en [kg]
Gbt=(3*8900*N2*LEMBT*S2)/1000000;
%Peso del bobinado de cobre de AT en [kg]
Gat=(3*8900*N1*LEMAT*S1)/1000000;
%Perdidas en corriente continua en el cobre a 75°C
%Utilizando como fórmula
%Pcu=2,41*(I/S)^2*G
%BT
Pcubt=(2.41*Gbt*(12.5));
%AT
```

```
Pcuat=(2.41*Gat*((12.5)));
%Pérdidas totales en corriente continua
Pcutotales=Pcubt+Pcuat;
%En corriente alterna existe el efecto skin en los conductores
que es tanto
%más pronunciado cuanto mayor es la sección de los mismos,
debiéndose
%introducir un factor k, que contemple este efecto.
%para este tipo de transformadores en frecuencias de 50 a 60
ciclos se
%puede utilizar el valor de k=1,1
%Pérdidas en el cobre
Cu=1.1*Pcutotales;
end
```

### 5.2.8 CÁLCULO DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS.

```
%Permeancia Especifica
[ lambda ] = permeancia( D,L,R1,R2,R,B1,B2,k );
%Calculo de la caida de reactancia em los bobinados
[ e ] = caida( ko,D,L,q,tesla,lambda,n,o );
%Perdidas y caidas ohmicas relativas
[ Ur ] = (Cu /(potencia*10));
%Tensión de corto circuito
[Ucc] = ucc (e,Ur);

function [ lambda ] = permeancia( D,L,R1,R2,R,B1,B2,k )
%D: Diametro del nucleo en [cm]
%L: Largo del nucleo en [cm]
%R1: ancho del bobinado primario en [mm]
%R2: ancho del bobinado secundario en [mm]
%R: ancho total de los bobinados en [mm]
%B1: largo del bobinado de AT [mm]
%B2: largo del bobinado de BT [mm]
%k: distancia entre bobinado de SECUNDARIO y columna [mm]
l0=R/20;
medio=((k+R1)/10+((k+R2)/10)/2;
D0=D+medio;
D1=D+(k/10)+(R1/20);
D2=D+((k+R1)/10)+(R2/20);
Leq=((B1+B2)/20)+((R1+R2)/10);
Dm=((D1*(R1/10))+(D2*(R2/10)))/((R1+R2)/10);
uno=(l0*(D0/D));
dos=(R1+R2)/30;
tres=(Dm/D);
lambda=(uno+(dos*tres))/Leq;
end

function [ e ] = caida( ko,D,L,q,B,lambda,n,o )
%e es la caída de reactancia en los bobinados
%ko factor de espacio del núcleo
```



```
%D diámetro circunscripto a la sección de una columna en [cm]
%L altura de la ventana en [cm]
%q carga lineal media por columna en [Av/cm]
%B inducción máxima en [T]
L1=L-(2*(n/10));
L2=L-(2*(o/10));
if L1<L2
    e=(5.58/ko)*(L2/D)*(q/1000)*(lambda/B);
elseif L1>=L2
    e=(5.58/ko)*(L1/D)*(q/1000)*(lambda/B);
end

function [ Ucc ] = ucc( e,Ur )
%UNTITLED Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
Ucc=sqrt((e^2)+(Ur^2));
end
```

### 5.2.9 CÁLCULO DE REFRIGERACIÓN.

```
function ventilacion_Callback(hObject, eventdata, handles)
global vent FeCu altura largo ancho D B1
vent=get(handles.ventilacion,'value');
switch vent
    case 1
        %Cuba ondulada
        set(handles.ndt,'visible','off');
        set(handles.nd,'visible','off');
        set(handles.nct,'visible','off');
        set(handles.nc,'visible','off');
        set(handles.rct,'visible','off');
        set(handles.dct,'visible','off');
        set(handles.rc,'visible','off');
        set(handles.dc,'visible','off');
        %Las ondulaciones van en las paredes frontales del
transformador
        %por lo tanto en los laterales la cuba es lisa
        %Calculo de la disipacion en los laterales
        %?:coeficiente de transmision termica de 40[W/Cm²]
        dl=((ancho/100)*(altura/100)*1072);
        disipar=FeCu-dl;
        %Cantidad de aletas
        aletas=2*((largo/3.5);
        aletas=redondear(aletas);
        %Altura de comienzo de aletas=comienzo de bobinado
        h=(altura/100)-(D/100)-(0.05);
        %Calculamos la superficie de aletas
        sup=(0.234*h*aletas);
        %Pérdidas por unidad de superficie
        f=(disipar/sup);
        %Coeficiente de disipacion
```

```

fo=(f/320);
if fo>1
    set(handles.elevacion,'visible','on');
    set(handles.elevacion,'string','Sobrepasa la
sobreelevación máxima de 55°C')
elseif fo<=1
    sobre=int2str((20*fo)+20);
    set(handles.elevacion,'visible','on');
sobretemperatura=strcat(('Sobreelevación de temperatura máxima
de'),sobre,(' °C'));
    set(handles.elevacion,'string',sobretemperatura)
end
case 2
%Superficie lateral de la cuba

sup=(2*(altura/10)*(ancho/100))+(2*(altura/100)*(largo/100))
dl=(sup*35*13.4)
disipar=FeCu-dl
%Altura de comienzo de radiadores=comienzo de bobinado
h=(D/100)+(0.05);
%Altura de los radiadores dejando 40[cm] de distancia entre
tapa y radiador
hrad=((altura/100)-h-0.4);
%Redondear altura de los radiadores
if 0<hrad<=0.5
    hrad=0.5;
end
if 0.5<hrad<=1
    hrad=1;
end
if 1<hrad<=1.5
    hrad=1.5;
end
if 1.5<hrad<=2
    hrad=2;
end
if 2<hrad<=2.5
    hrad=2.5;
end
if 2.5<hrad<=3
    hrad=3;
end
if 3<hrad
    hrad=3;
end
%Distancia entre radiadores: se obtiene dividiendo el largo
de la cuba
%dejando una distancia de inicio de 20[mm] y usando
radiadores de
%225[mm] de ancho de radiadores;
%ncol=número de columnas
ncol=2*((largo*10)-40)/(225));
ncol=redondear(ncol);
    
```



```

%radcol=radiadores por columna inicialmente
radcol=1;
dg=((largo*100)-40)/ncol;
da=225;
nrad=ncol*radcol;
%Centro de radiadores
crad=(hrad/2)+h;
%Diferencia entre centros de bobinado y centro de
radiadores
y=crad-(hrad+(B1/2));
%Factor de corrección segun la distancia y
[fy]=factor(y);
%Factor de corrección segun el número de radiadores
[ fv ] = factorv( nrad );
%Factor de corrección segun la distancia entre ejes de
grupos
[ fg ] = factorg( dg,da );
%Determinación del coeficiente de ventilación
if hrad==0.5
    cv=488;
    sup=0.25;
end
if hrad==1
    cv=415;
    sup=0.5;
end
if hrad==1.5
    cv=372;
    sup=0.76;
end
if hrad==2
    cv=357;
    sup=1.04;
end
if hrad==2.5
    cv=336;
    sup=1.3;
end
if hrad==3
    cv=323;
    sup=1.55;
end
cv=cv*fy*fv*fg;
supnec=disipar/cv;
nrad=supnec/sup;
if nrad>nrad
    nrad=redondear(nrad);
else
    nrad=redondear(nnrad);
end;
radcol=nrad/ncol;
radcol=redondear(radcol);
set(handles.elevacion,'visible','off');
    
```

```
set(handles.ndt,'visible','on');  
set(handles.nd,'visible','on');  
set(handles.nct,'visible','on');  
set(handles.nc,'visible','on');  
set(handles.rct,'visible','on');  
set(handles.dct,'visible','on');  
set(handles.rc,'visible','on');  
set(handles.dc,'visible','on');  
set(handles.nd,'string',nrad);  
set(handles.nc,'string',ncol);  
set(handles.dc,'string',da);  
set(handles.rc,'string',radcol);  
end
```

#### 5.2.10 MODELADO Y COORDINACIÓN DE PROTECCIONES.

El modelado se realizó mediante la creación de un archivo .txt creado mediante la interfaz de Matlab y creando un archivo que al ser cargado en Rhino ejecute las sentencias de dibujo requeridas para crear a escala el transformador.

Para el caso de las protecciones se fueron cargando las distintas curvas de fusibles y que las mismas sean citadas por la interfaz gráfica para compararlas en un gráfico con los parámetros eléctricos calculados de la máquina en diseño.

Para profundizar en el cálculo utilizado para este tema se pueden observar los archivos de programación en el anexo al final del documento.



### 5.3 INTERFAZ DE OBTENCIÓN DE DATOS

#### 5.3.1 INICIO DEL PROGRAMA.

Al iniciar el programa aparece la siguiente pantalla:



Figura 5.3.1– Pantalla inicial del programa.-

En esta pantalla se inicia el programa y es dónde se puede cargar un proyecto antiguo o crear un nuevo proyecto, para ello se debe elegir entre una de las dos opciones. Si se opta por un nuevo proyecto aparecerá el siguiente cuadro de diálogo:

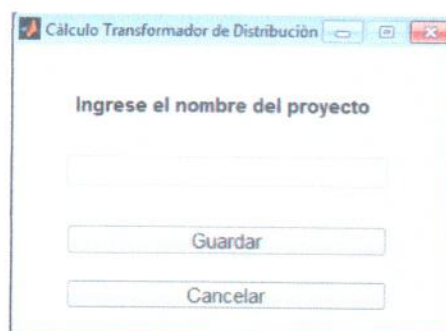


Figura 5.3.2– Cuadro de diálogo proyecto nuevo.-

Ingresando el nombre del proyecto, se crea un nuevo proyecto en la carpeta \Proyectos creada en el directorio dónde se instaló el programa.  
Si se ingresa como nombre del proyecto uno ya creado con anterioridad nos mostrará una advertencia realizará la consulta de sobrescribir o no los datos.

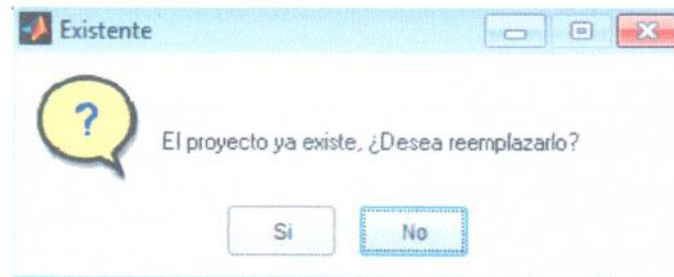


Figura 5.3.3– Cuadro de diálogo sobrescribir proyecto.-

Si en vez de elegir la opción proyecto nuevo se elige la opción cargar proyecto, aparecerá la siguiente pantalla:

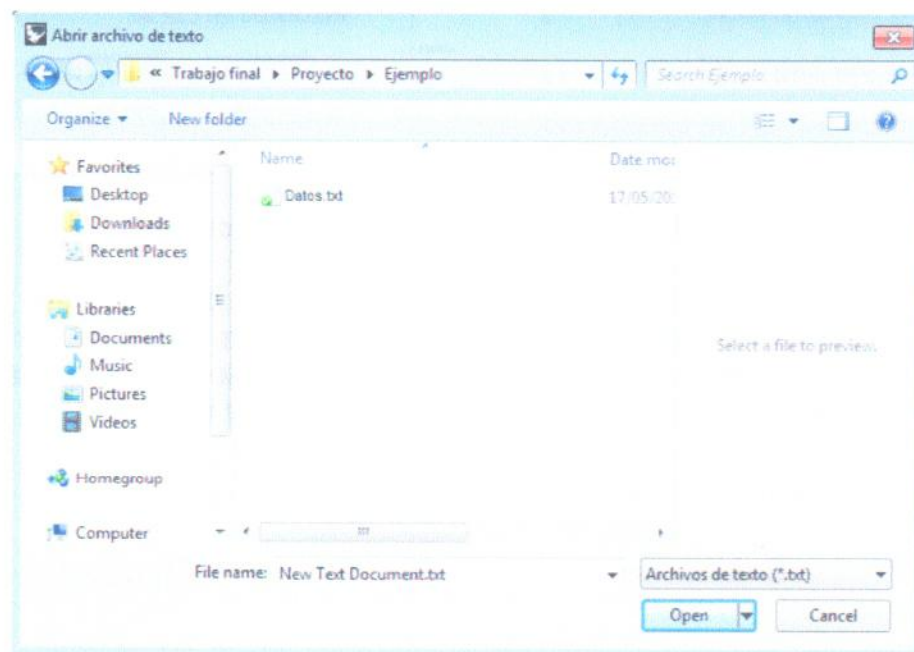


Figura 5.3.4– Cuadro de diálogo cargar proyecto.-

Se debe cargar el archivo de texto (Datos.txt) que tiene como final "-Proyecto.txt" el cual contiene las variables cargadas del proyecto creado anteriormente.



### 5.3.2 VALORES DE DISEÑO.

Tanto si se carga o se crea un proyecto nuevo a continuación aparecerá una pantalla dónde se pueden cargar o modificar los parámetros de diseño de la máquina (necesarios para calcular cada uno de los parámetros constructivos).

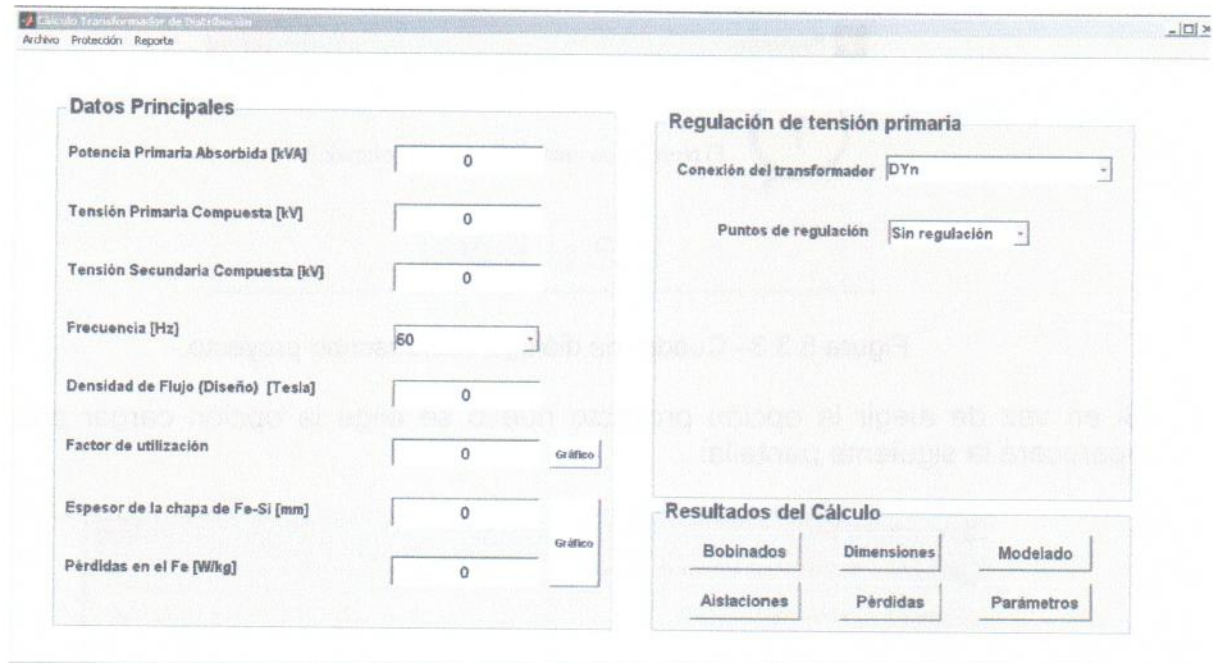


Figura 5.3.5– Panel de valores de diseño.-

Una vez que se ingresaron los distintos parámetros de diseño de la máquina es necesario llamar a a los distintos subprocesos anteriormente mencionados de forma tal de obtener los valores técnicos de la máquina que se quiere calcular. Para ello tenemos el siguiente panel en la parte inferior de la pantalla:



Figura 5.3.1– Panel de Resultados del Cálculo.-

Haciendo click en cada uno de los botones que se puede ingresar a los distintos valores calculados por el programa, los cuales conforman un diseño completo del transformador.

### 5.3.3 PANEL BOBINADOS.

Haciendo click en el botón de Bobinados se accede al siguiente panel:

BOBINADO SECUNDARIO		BOBINADO PRIMARIO	
Cantidad de espiras	28	Cantidad de espiras	541
Corriente nominal [A]	833.333	Corriente nominal [A]	43.7387
Sección conductor [mm <sup>2</sup> ]	238	Sección conductor [mm <sup>2</sup> ]	12
Diámetro alambre de cobre [mm]	9	Diámetro alambre de cobre [mm]	4
N° de alambres en paralelo	4	N° de alambres en paralelo	1
Cantidad de bobinas	4	Cantidad de bobinas	8
Espiras por bobina	7	Espiras por bobina	67.625

Regulación Primario		Corriente nominal [A]		N° de espiras	
Punto de regulación		(+)	(-)	(+)	(-)
+/-2,5%		52.072	35.4053	555	527

VOLVER

Figura 5.3.2– Panel de Bobinados.-

Se puede observar en el mismo que se obtienen los parámetros de cada uno de los bobinados (n° de espiras, corriente, sección, diámetro, n° de alambres en paralelo, cantidad de bobinas y espiras por bobina). También se puede observar que si se solicitó en las especificaciones de diseño se pueden observar la cantidad de espiras y la corriente en los distintos puntos de regulación, navegando por el menú desplegable, eligiendo el punto de regulación. Se puede volver a la pantalla principal de ingreso de datos haciendo click en el botón volver.



5.3.4 PANEL DIMENSIONES.

Haciendo click en el botón de Dimensiones se accede al siguiente panel:

The screenshot shows a software window titled "Cálculo - Dimensiones" with three columns of data:

Dimensiones Cuba		Dimensiones Nucleo		Dimensiones Bobinados	
Altura de cuba [cm]	66	'L' - Altura de nucleo	22	Alto bobinado primario fcm	18
Largo de cuba [cm]	82	'D' - Diámetro del	11	Alto bobinado secundario fcm	20
Ancho de cuba [cm]	34	'a' - Ancho de ventana	13	Alto de cada bobina de primario [cm]	18
Distancia entre parte activa y cuba [cm]	3	'M' - Distancia entre centros de columnas [cm]	24	Alto de cada bobina secundario fcm	20
Diámetro del conducto del rele BUCHHOLZ [pulgadas]	2.5	Largo del yugo [cm]	35	Espesor de bobinado primario fcm	2.1
Volumen de la cuba (sin nucleo) [litros]	147	Alto del yugo [cm]	11	Espesor de bobinado secundario fcm	1

At the bottom center of the panel is a button labeled "VOLVER".

Figura 5.3.3– Panel de Dimensiones.-

Cuando accedemos a este panel observamos los parámetros calculados para la cuba, el núcleo y los bobinados.

### 5.3.5 PANEL AISLACIONES.

Haciendo click en el botón de Aislaciones se accede al siguiente panel:

DISTANCIAS AISLANTES		
'k' - Distancia entre bobinado secundario y columna [mm]		5
'j' - Distancia entre bobinas de secundario y primario [mm]		6
'm' - Grosor del tubo aislante entre secundario y núcleo		2
'l' - Grosor del tubo entre secundario y primario [mm]		2
'p' - Distancia entre bobinas del primario y columna [mm]		9
'o' - Distancia axial entre el final del secundario al yugo [mm]		10
'n' - Distancia axial desde el final del primario al yugo [mm]		17
'g' - Distancia entre bobina y cuba [mm]		3

VOLVER

Figura 5.3.4— Panel de Aislaciones.-

Cuando se accede a este panel se obtienen las diferentes distancias aislantes calculadas las cuales cumplen con las especificaciones electrotécnicas de diseño. Si se hace click en cada una de las flechas que se muestra a continuación de cada especificación se puede acceder al gráfico donde se muestra la proyección de cada parámetro.



### 5.3.6 PANEL PÉRDIDAS

Haciendo click en el botón de Pérdidas se accede al siguiente panel, en el cual se informan las pérdidas en el hierro de la máquina, en el cobre y totales calculados.

Variable	Valor
Tipo de Refrigeración	Cuba Ondulada
Pérdidas en el Hierro [W]	595.352
Pérdidas en el Cobre [W]	6512.2
Pérdidas Totales [W]	7107.56

Figura 5.3.5– Panel de Pérdidas (cuba ondulada).-

Cuando se da acceso a este panel según se elija el tipo de refrigeración se realiza la verificación de sobrecalentamiento informándolo mediante un cuadro de texto. El cual advierte el sobrepaso de la temperatura máxima o en caso de verificar la temperatura de trabajo nominal calculado (sólo para la opción de cuba ondulada, de elegirse refrigeración por radiadores, se calcula la configuración que siempre verifica el sobrecalentamiento. Se puede elegir entre dos opciones, cuba ondulada (pequeños transformadores) y cuba con radiadores, para transformadores de potencias considerables.

Sobrepasa la sobreelevación máxima de 55°C

Figura 5.3.6– Cuadro de texto indicador de sobreelevación de temperatura.-

Parámetro	Valor
Tipo de Refrigeración	Cuba lisa con Radiadores
Pérdidas en el Hierro [W]	595 352
Pérdidas en el Cobre [W]	6512.2
Pérdidas Totales [W]	7107 56
Número de radiadores	10
Número de columnas	10
Distancia entre columnas	225
Radiadores por columna	1

VOLVER

Figura 5.3.7– Panel de Pérdidas (Radiadores).-

Cuando se elije la opción de enfriamiento por radiadores, se visualizan dentro del panel nuevos cuadros de texto que indican la cantidad de radiadores, la cantidad de columnas y la distancia entre columnas calculados para disipar la potencia de pérdidas.

### 5.3.7 PANEL PARÁMETROS

Haciendo click en el botón de Parámetros se accede al siguiente panel, en el cual se informan la permeancia específica, la caída de reactancia en los bobinados, las pérdidas y caídas óhmicas relativas y la tensión de cortocircuito.



Parámetro	Valor
Permeancia Especifica	0.938382
Caída de reactancia en los bobinados	3.48789
Pérdidas relativas	1.30244
Densidad de Flujo Calculado [Tesla]	1.51959
Tensión de cortocircuito [Ucc%]	3.72314

Verifica según los estándares de normalizados de Ucc

VOLVER

Figura 5.3.8– Panel de Parámetros

Se puede observar que dentro del panel se encuentra un cuadro de texto variable que indica si la tensión de cortocircuito verifica o no según los estándares de diseño de este tipo de máquinas. Si no se verifica la tensión de cortocircuito se debe volver a la pantalla de ingreso de datos de diseño y modificar los valores de  $k_0$  y de  $B$  hasta obtener valores que se ajusten a los estándares de tensión de cortocircuito.

### 5.3.8 PANEL MODELADO

Para obtener el modelado del transformador calculado basta solo con presionar el botón Modelado ubicado en el panel Valores Obtenidos, como se muestra a continuación

**Resultados del Cálculo**

Bobinados	Dimensiones	<b>Modelado</b>
Aislaciones	Pérdidas	Parámetros

Figura 5.3.9– Botón para modelado del transformador

Una vez presionado el botón aparecerá un cuadro de diálogo solicitando guardar el proyecto para que el modelado coincida con los datos del mismo y de aceptar aparecerá otro cuadro de diálogo diciendo que se ha creado el archivo con los datos

para el modelado del transformador. Antes de ejecutar el modelado se debe solicitar guardar el proyecto para que los datos del modelado coincidan con los datos guardados del proyecto.

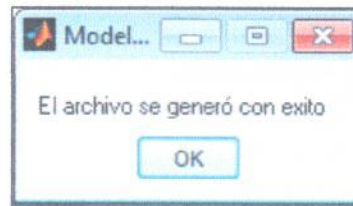


Figura 5.3.10– Botón de confirmación de modelado.-

Una vez hecho esto solamente es necesario ingresar al programa Rhinoceros de dibujo asistido por computadora, para ingresar el archivo **Diseño.txt** creado en la carpeta del diseño de la máquina (la que previamente se crea al instante de iniciar el trabajo) con las correspondientes instrucciones para que dibuje la máquina, como se muestra a continuación:

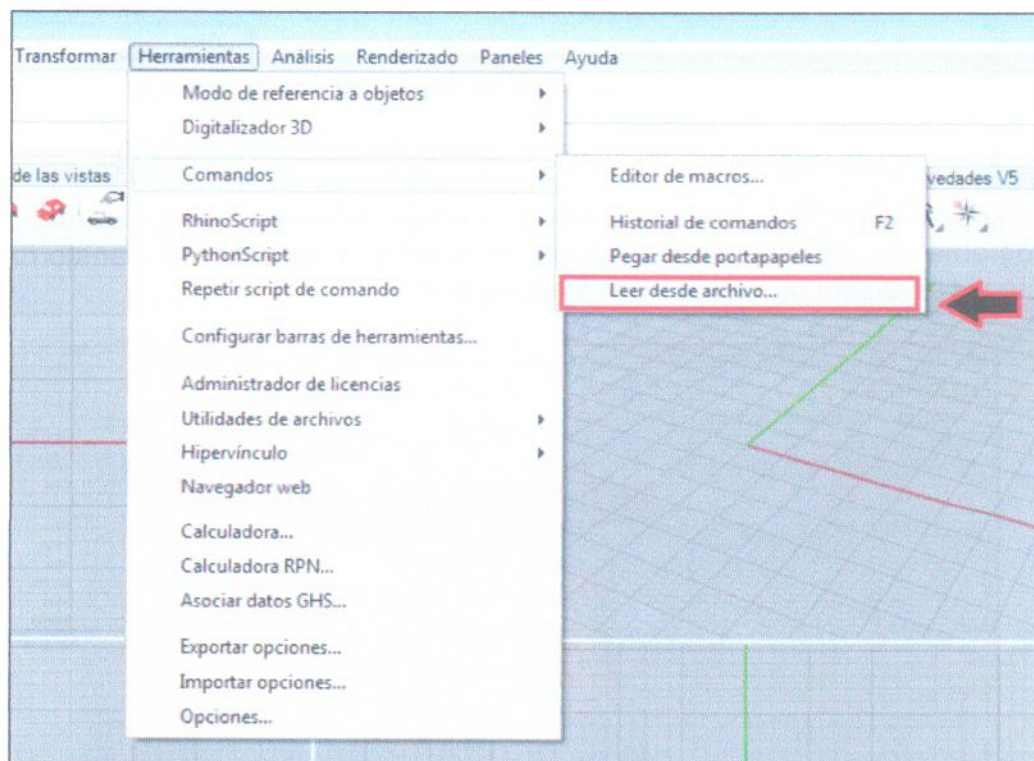


Figura 5.3.11– Ingresar archivo de modelado (paso 1).-

Una vez que se ingresa en esta opción aparecerá un cuadro de diálogo que nos solicitará un archivo con extensión .txt, se debe ir a la carpeta donde está el proyecto y seleccionar el archivo que tiene el nombre del proyecto como se puede ver en el siguiente ejemplo:



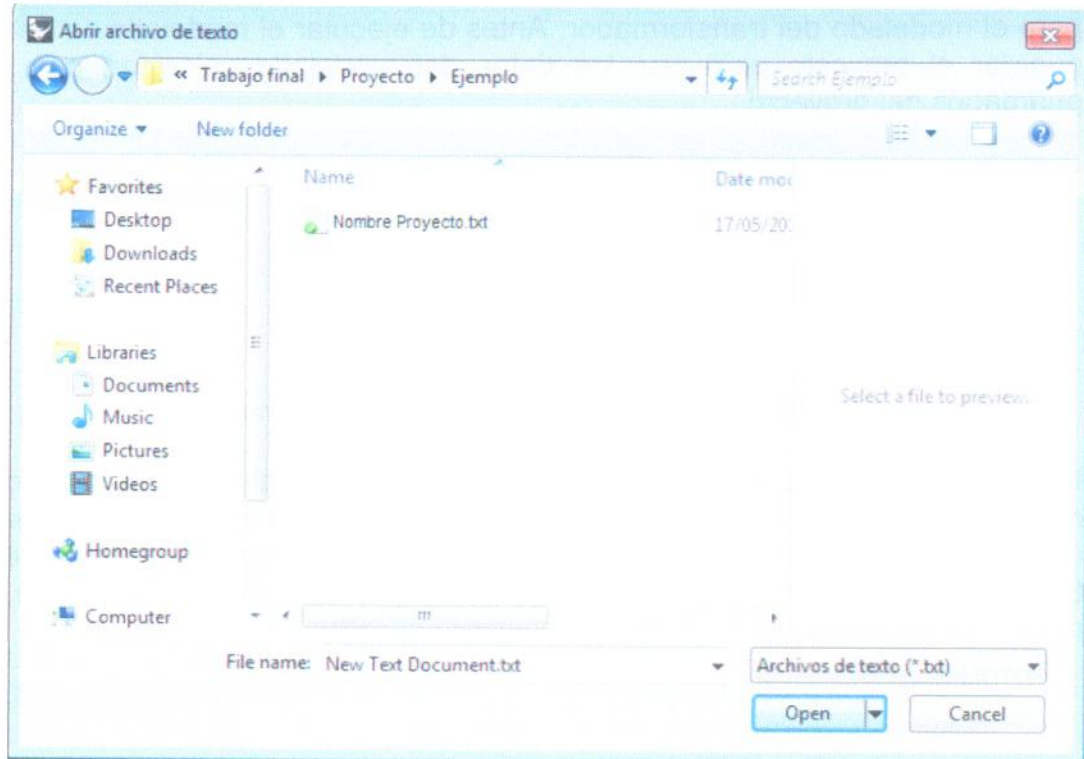


Figura 5.3.12– Ingresar archivo de modelado (paso 2).-

Al ingresar el archivo con instrucciones se debe aguardar unos instantes para que el programa de diseño pueda recrear el diseño a escala del transformador, para obtener un diseño como se ve a continuación:

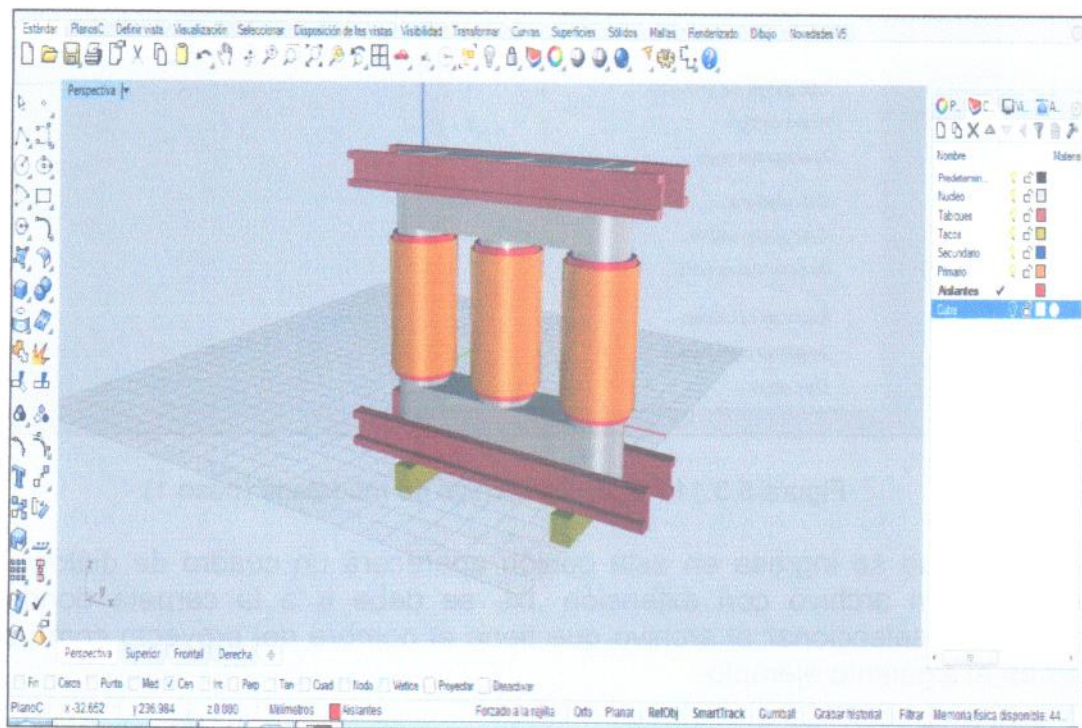


Figura 5.3.13– Ejemplo de modelado a escala de transformador.-

### 5.3.9 MENÚ DE REPORTES.

Mediante este menú se puede acceder a realizar un reporte en formato .txt que se denominará con el nombre del proyecto seguido de un guión medio y la palabra reporte (p.e. ejemplo-reporte.txt) en el cual se verá reflejado el total de los valores calculados para el diseño de la máquina.

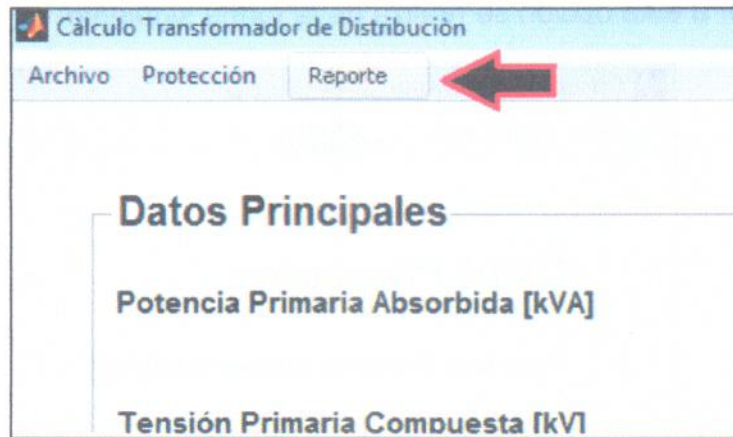


Figura 5.3.14– Menú Reporte.-

El reporte sería como el siguiente:

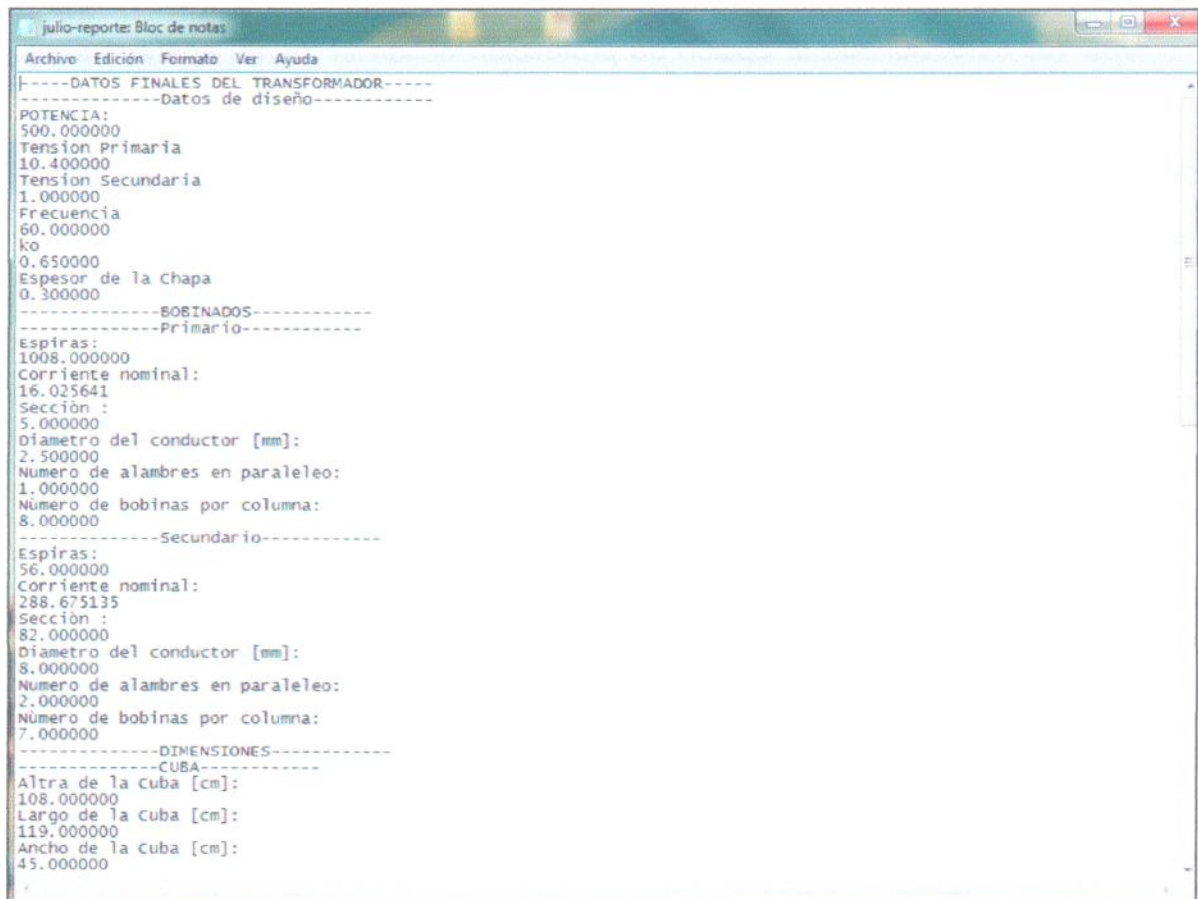


Figura 5.3.15– Reporte.-



### 5.3.10 MENÚ DE PROTECCIONES.

Como un agregado para que se pueda tener en cuenta a la hora de proteger la máquina se prevee la coordinación de un elemento fusible con los distintos puntos de operación del transformador.

Para ingresar a esta opción se realiza de la forma siguiente:

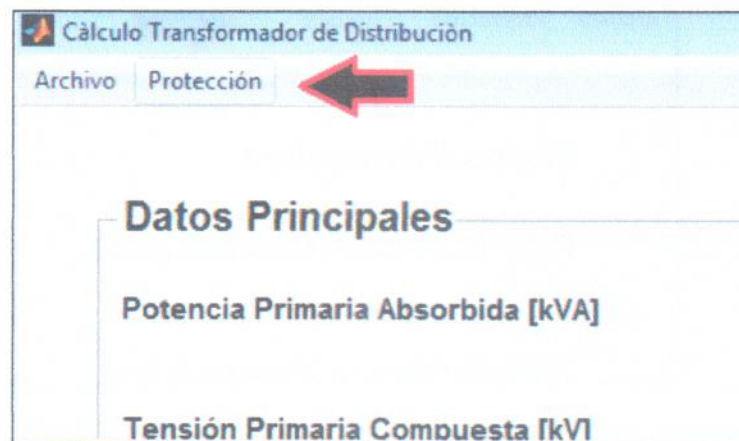


Figura 5.3.16– Menú protección del transformador.-

Una vez seleccionada la opción de protección desde el menú, aparecerá un panel como el siguiente:

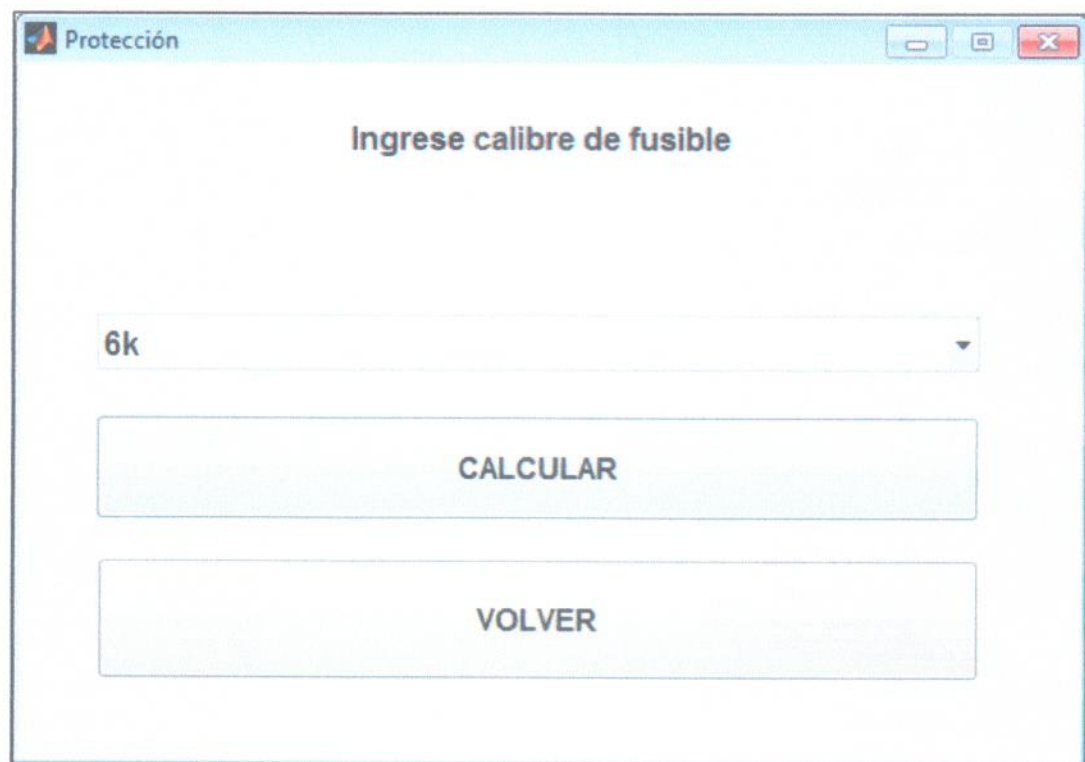


Figura 5.3.17– Panel de selección fusible de protección.-

Cuando ingresamos en el panel de protecciones, se debe seleccionar un fusible para proteger el transformador (se debe tener en cuenta de que se piensa colocar el fusible del lado de alta tensión en nuestro caso el primario del transformador – caso contrario se debe invertir el orden cuando se ingresan los valores de diseño).  
Seleccionado el fusible y clickeando en el botón CALCULAR se obtiene en un gráfico doble logarítmico la curva de actuación del fusible y los puntos de operación del transformador, como se puede observar en el siguiente ejemplo:

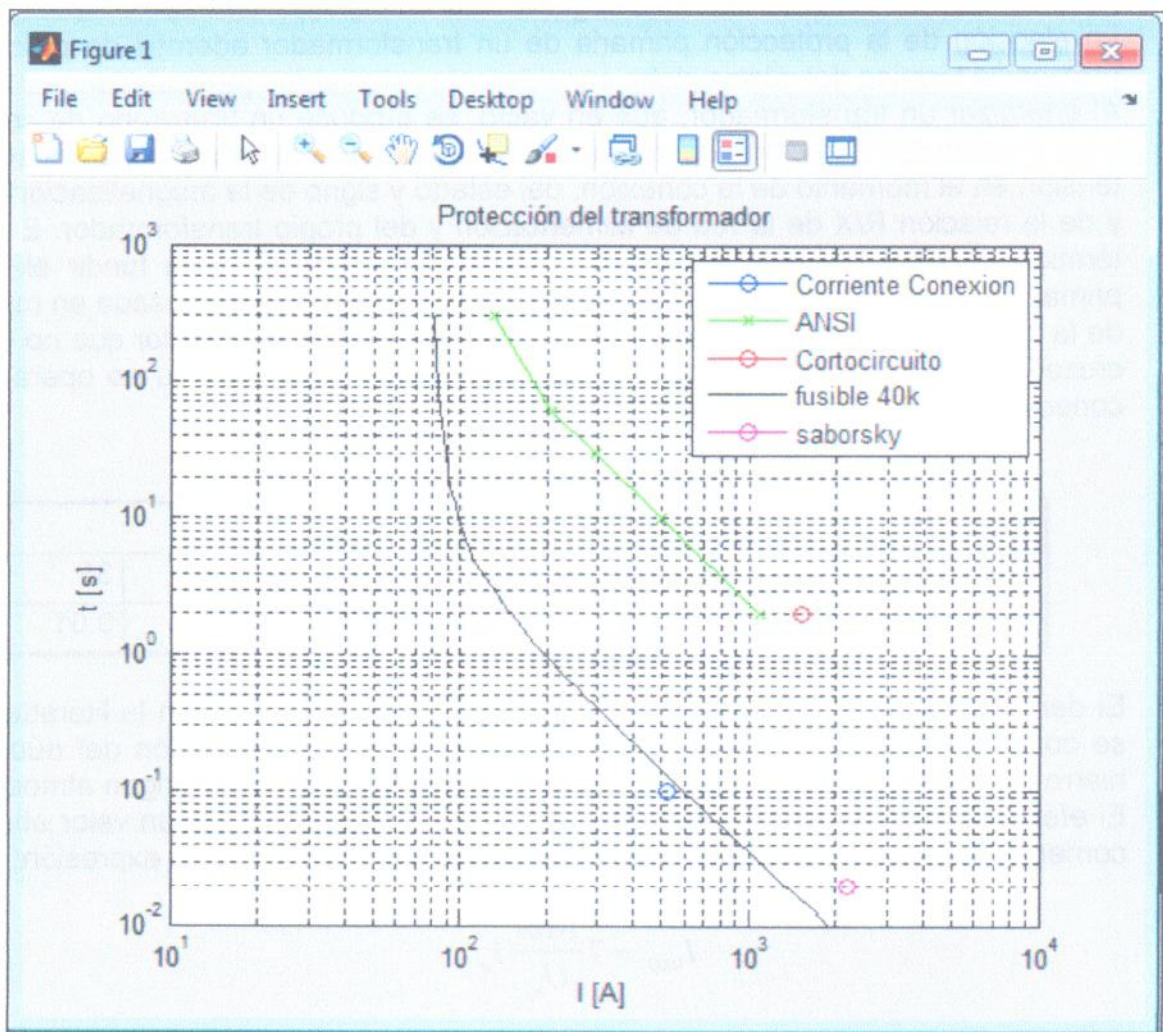


Figura 5.3.18– Ejemplo de grafico de curva de fusible y puntos de operación.-

### Interpretación Del Gráfico

Las normas ANSI en se ocupan de la capacidad de la máquina para soportar corrientes desde tres veces la nominal hasta un cortocircuito en bornes, como se refleja en la tabla siguiente

Tabla 5.3.1 - Normas ANSI

Corriente (I/In)	3	4.75	6.70	11.30	25
Tiempo (seg)	300	60	30	10	2



La norma IRAM ofrece la siguiente expresión para determinar el tiempo admisible en cortocircuito para un transformador

$$t(\text{seg}) = \frac{1000}{\left(\frac{Ik}{In}\right)^2} \quad (5.3.1)$$

Para tiempos de falla menores a 5 seg.

La elección de la protección primaria de un transformador además de procurar la protección térmica del mismo debe considerar las siguientes particularidades:

Al energizar un transformador, aun en vacío, se produce un transitorio de corriente cuya magnitud y duración dependen fundamentalmente del valor instantáneo de la tensión en el momento de la conexión, del estado y signo de la magnetización previa y de la relación R/X de la red de alimentación y del propio transformador. El efecto térmico de esta corriente transitoria puede ser suficiente para fundir el fusible primario si su calibre es demasiado chico. La siguiente curva expresada en múltiplos de la corriente nominal del transformador representa el límite inferior que no deberá cruzar la característica de actuación del fusible para garantizar su no operación al conectar (corriente de inrush o de conexión).

Tabla 5.3.1 – Corriente de Inrush o de conexión

Corriente transitoria de conexión				
Corriente térmicamente. equiv ( $I/In$ )	3	6	12	35
Tiempo (seg)	10	1	0.1	0.01

El denominado punto de Saborsky o "lightning surge limits", según la literatura que se consulte, expresa el fenómeno de sobrecorriente por saturación del núcleo de hierro al verse sometido el transformador a una sobretensión de origen atmosférico. El efecto térmico de esta sobrecorriente puede representarse por un valor eficaz de corriente circulando durante 0.02 seg. Calculada según la siguiente expresión:

$$I_{0.02} = 7 \frac{NBA}{U_n} I_n \quad (5.3.2)$$

El Nivel Básico de Aislación (NBA) de transformadores de construcción normal de Tensión nominal 13,2 Kv es de 95 Kv, dando como resultado una  $I_{0.02} = 50 I_n$ . Las normas Americanas fijan este punto para sistemas de 15 Kv en aproximadamente  $80 I_n$ .

La ubicación del fusible aguas arriba del descargador de sobretensión agrega una energía adicional a la representada por el punto de Saborsky de escasa significación para calibres de fusibles medianos y grandes, pero que pueden provocar la fusión de calibres chicos cuando las descargas son muy severas. A modo de ejemplo podemos decir que la probabilidad de que un fusible de 15 Amp velocidad Standard se quemé por una descarga impulsiva es menor al 1%.



## 6 CONCLUSIONES Y PROPUESTAS.

### 6.1 RESULTADOS

Como conclusion general en el presente Trabajo Final se ha desarrollado en el entorno MATLAB el cálculo completo de un transformador de distribución, el cual puede contemplar casos especiales que no siempre se pueden obtener en la industria estandarizada de los fabricantes de transformadores de distribución. Por ejemplo en lugares donde las tensiones de distribución de la energía eléctrica no se realiza con tensiones normalizadas de media y baja tension (13,2 [kV] / 0,4 [kV]). Por otro lado se cumple con un objetivo personal de poder incluir en el tranajo final una gran cantidad de conocimiento adquirido durante la Carrera (Electrotecnia, análisis computacional, dibujo asistido por computadora, diseño e implementación de proyectos, etc.).

Con la implementación de este programa se puede calcular un transformador de distribución del tipo intemperie de manera rápida y eficaz obteniendo valores reales contrastados con transformadores reales utilizados actualmente en la industria de la distribución eléctrica, permitiendo a su vez la modelización.

Como propuesta queda el código abierto del programa para que si es de interés se pueda implementar el diseño de otro tipo de transformador u otro tipo de máquina que se utilice en el común de la industria y poder darle un valor agregado a lo realizado en este proyecto.

### 6.2 IMPACTO AMBIENTAL

El ambiente es un conjunto de factores físico-naturales, estéticos, culturales, sociales y económicos que interaccionan entre sí, con el individuo y con la comunidad, determinando su forma, carácter y comportamiento. El ambiente comprende, entre otros aspectos, los individuos y su interrelación. Las personas se desempeñan en el marco de una organización, por lo tanto, las características de la organización ejercen cierta influencia sobre las personas, así como las organizaciones son a su vez susceptibles de ser afectadas las acciones de las personas.

En este contexto, un producto de software, definido por un conjunto de programas de software y de dispositivos físicos, procedimientos, datos y posible documentación asociada, es utilizado por usuarios en una organización, por lo que forma parte de ésta y debe satisfacer ciertos requerimientos que la misma establece. Para una empresa desarrolladora, un producto es obtenido mediante un proceso. Así, proceso y producto deben cubrir las ambiciones y expectativas de los clientes y/o usuarios, y son tanto realizados como operados por seres humanos, en un ambiente determinado el cual puede verse afectado y/o impactado por su uso u operación.

Mediante el software se optimizan los procesos iterativos de cálculo con la consecuente reducción de horas hombre e insumos que indirectamente afectan a la calidad de vida y al ambiente. Por ello se considera que el impacto ambiental producido por la utilización de programas computacionales es positivo, siendo de muy difícil cuantificación.



### 6.3 ANÁLISIS ECONÓMICO

Los costos de producción o costos de operación son los gastos involucrados en mantener un proyecto, operación o una pieza de un equipo en producción.

Los costos de producción pueden dividirse en dos grandes categorías:

**COSTOS VARIABLES**, que son proporcionales a la producción como materia prima, y los **COSTOS FIJOS** que son independientes de la producción, como los impuestos que paga el edificio. Algunos costos no son ni fijos ni directamente proporcionales a la producción y se conocen a veces como **SEMIVARIABLES**, como mantenimiento.

Clasificación de los costos de producción

**COSTOS VARIABLES:**

- Costo de materia prima
- Costo de empaque
- Costo de mano de obra
- Costo de supervisión
- Costo de servicios
- Costo de mantenimiento
- Costo de suministros
- Costo de laboratorio
- Costo de regalías y patentes

**COSTOS FIJOS**

- Costos de inversión:

Depreciación

Impuestos

Seguros

Financiación

- Costo de Ventas y Distribución
- Costo de Dirección y Administración
- Costo de Investigación y Desarrollo

En este análisis vamos a hacer incapié en el este último punto de los costos fijos, los costos de investigación y desarrollo:

Los gastos de Investigación y Desarrollo (I y D) incluyen salarios y jornales de todo el personal directamente relacionado con este tipo de tarea, los gastos fijos y de operación de toda la maquinaria y equipos utilizados, el costo de materiales y suministros, gastos generales directos y costos varios. En el caso de este trabajo se puede deducir rápidamente que es una herramienta que acelera los tiempos de investigación en un 80% ya que no se necesita de un análisis previo ni de la recolección de gran cantidad de datos técnicos en cuanto a materiales y/o parámetros electrotécnicos, inclusive se puede realizar una estimación muy aproximada si se requiere tener una respuesta rápida acerca del diseño y parámetros de la máquina.

La implementación de este software da una reducción en los costos de investigación y desarrollo entre un cincuenta y un ochenta por ciento comparado con la forma de cálculo por medio de recolección de datos y la realización de cálculos mediante planillas de cálculo.

## 7 RESUMEN

El trabajo realizado en este proyecto pretende desarrollar un software que sirva como soporte, para dar una alternativa rápida y gráfica al método de cálculo actual de un transformador de distribución, el cual está determinado por diferentes parámetros eléctricos y mecánicos.

Para el diseño de este software se obtuvieron variables de cálculo en función de valores teóricos bibliográficos contrastados con valores reales de catálogo.

El resultado busca seleccionar el transformador que menos pérdidas técnicas proporcione al sistema y así mismo optimice su cargabilidad, es decir, que ofrezca los mejores resultados desde el punto de vista técnico y económico.

A la vez se busca hacer una herramienta potente y ágil en cuanto a optimización de cálculo y dinámica en cuanto a visualización de resultados mediante el entorno gráfico y los dibujos asistidos por computadora.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Corrales Martín Juan. CÁLCULO INDUSTRIAL DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS TOMO I Y II.
- [2] M.P. KOSTENKO, L.M. PIOTROVSKI. MÁQUINAS ELÉCTRICAS II.
- [3] Diego Orlando Barragán Guerrero. MANUAL DE INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO EN MATLAB PARTE I Y PARTE II.
- [4] Facultad de Ingeniería. Manipulación de archivos año 2008.
- [5] Dimenna, Claudio-Stecca, Juan. APUNTES DE CÁTEDRA "Transformadores su cálculo y construcción"



## 9 ANEXO

En el siguiente anexo se detallan los archivos .m de matlab diseñados con el fin de generar el modelo 3D de la máquina y generar un gráfico que permita coordinar un posible protección del transformador teniendo en cuenta los puntos críticos durante su operación.

### A.1 Programación del modelado

```
%-----Creación de modelo 3D-----
nd=strcat(directorio, '\Proyecto\', nombre, '\', nombre, '.txt');
fid=fopen(nd, 'w');
fprintf(fid, '_SelAll\r\n');
fprintf(fid, '_Delete\r\n');
%-----Núcleo-----
%Crear capa
fprintf(fid, '_Layer\r\n');
fprintf(fid, '_New\r\n');
fprintf(fid, 'Nucleo\r\n');
%Establecer como capa actual
fprintf(fid, '_Current\r\n');
fprintf(fid, 'Nucleo\r\n');
%Cambiar el color de la capa
fprintf(fid, '_Color\r\n');
fprintf(fid, 'Nucleo\r\n');
fprintf(fid, '190,190,190\r\n');
fprintf(fid, '_Enter\r\n');
%rad: radio del núcleo
rad=D/2;
%lyugo: largo total columna mas yugo
lyugo=L+(2*D)
%---Primer columna---
fprintf(fid, '_Cylinder\r\n');
fprintf(fid, '0,0,-');
fprintf(fid, '%f\r\n', D);
fprintf(fid, '_Radius\r\n');
fprintf(fid, '%f\r\n', rad);
fprintf(fid, '%f\r\n', lyugo);
%---Segunda columna---
fprintf(fid, '_Cylinder\r\n');
fprintf(fid, '%f', M);
fprintf(fid, ',0,-');
fprintf(fid, '%f\r\n', D);
fprintf(fid, '_Radius\r\n');
fprintf(fid, '%f\r\n', rad);
fprintf(fid, '%f\r\n', lyugo);
%---Tercer columna---
fprintf(fid, '_Cylinder\r\n');
m2=2*M;
fprintf(fid, '%f', m2);
fprintf(fid, ',0,-');
fprintf(fid, '%f\r\n', D);
fprintf(fid, '_Radius\r\n');
```

```

    fprintf(fid, '%f\r\n', rad);
    fprintf(fid, '%f\r\n', lyugo);
%---Yugo---
%primer columna
    fprintf(fid, '_Box\r\n');
    %punto uno
    fprintf(fid, '0,');
    fprintf(fid, '%f', rad);
    fprintf(fid, ',0\r\n');
    %punto dos
    fprintf(fid, '%f', m2);
    fprintf(fid, ',-');
    fprintf(fid, '%f', rad);
    fprintf(fid, ',0\r\n');
    %altura
    fprintf(fid, '-');
    fprintf(fid, '%f\r\n', D);
%segunda columna
    fprintf(fid, '_Box\r\n');
    %punto uno
    fprintf(fid, '0,');
    fprintf(fid, '%f', rad);
    fprintf(fid, ',');
    fprintf(fid, '%f\r\n', L);
    %punto dos
    fprintf(fid, '%f', m2);
    fprintf(fid, ',-');
    fprintf(fid, '%f', rad);
    fprintf(fid, ',');
    fprintf(fid, '%f\r\n', L);
    %altura
    fprintf(fid, '%i\r\n', D);
%---Tabiques---
    %Crear capa
    fprintf(fid, '-_Layer\r\n');
    fprintf(fid, '_New\r\n');
    fprintf(fid, 'Tabiques\r\n');
    %Establecer como capa actual
    fprintf(fid, '_Current\r\n');
    fprintf(fid, 'Tabiques\r\n');
    %Cambiar el color de la capa
    fprintf(fid, '_Color\r\n');
    fprintf(fid, 'Tabiques\r\n');
    fprintf(fid, '191,63,63\r\n');
    fprintf(fid, '_Enter\r\n');
    %Primer Tabique
        %tabique: alto del tabique [cm]
        tabique=(rad+1.25);
        tabique2=(tabique+2.5);
        %sobrante: saliente del núcleo [cm]
        sobrante=10+rad;
        sobrante2=m2+rad+10;
        %htabique: inicio tabiques superiores

```



```

htabique=lyugo-D;
fprintf(fid, '_Box\r\n');
%punto uno
fprintf(fid, '-');
fprintf(fid, '%f', sobrante);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f', rad);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f\r\n', D);
%punto dos
fprintf(fid, '%f', sobrante2);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f', tabique);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f\r\n', D);
%altura
fprintf(fid, '%i\r\n', rad);
%1 pestaña del tabique
fprintf(fid, '_Box\r\n');
%punto uno
fprintf(fid, '-');
fprintf(fid, '%f', sobrante);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f', rad);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f\r\n', D);
%punto dos
fprintf(fid, '%f', sobrante2);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f', tabique2);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f\r\n', D);
%altura
fprintf(fid, '1.5\r\n');
%2 pestaña del tabique
fprintf(fid, '_Box\r\n');
%punto uno
fprintf(fid, '-');
fprintf(fid, '%f', sobrante);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f', rad);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f\r\n', rad);
%punto dos
fprintf(fid, '%f', sobrante2);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f', tabique2);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f\r\n', rad);
%altura
fprintf(fid, '-1.5\r\n');

```

%Segundo Tabique

```

fprintf(fid, '_Box\r\n');
%punto uno
fprintf(fid, '-');
fprintf(fid, '%f', sobrante);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f', rad);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f\r\n', D);
%punto dos
fprintf(fid, '%f', sobrante2);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f', tabique);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f\r\n', D);
%altura
fprintf(fid, '%i\r\n', rad);
%1 pestaña del tabique
fprintf(fid, '_Box\r\n');
%punto uno
fprintf(fid, '-');
fprintf(fid, '%f', sobrante);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f', rad);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f\r\n', D);
%punto dos
fprintf(fid, '%f', sobrante2);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f', tabique2);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f\r\n', D);
%altura
fprintf(fid, '1.5\r\n');
%2 pestaña del tabique
fprintf(fid, '_Box\r\n');
%punto uno
fprintf(fid, '-');
fprintf(fid, '%f', sobrante);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f', rad);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f\r\n', rad);
%punto dos
fprintf(fid, '%f', sobrante2);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f', tabique2);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f\r\n', rad);
%altura
fprintf(fid, '-1.5\r\n');

%Tercer Tabique
fprintf(fid, '_Box\r\n');

```



```

%punto uno
fprintf(fid, '-');
fprintf(fid, '%f', sobrante);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f', rad);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f\r\n', htabique);
%punto dos
fprintf(fid, '%f', sobrante2);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f', tabique);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f\r\n', htabique);
%altura
fprintf(fid, '-');
fprintf(fid, '%i\r\n', rad);
%1 pestaña del tabique
fprintf(fid, '_Box\r\n');
%punto uno
fprintf(fid, '-');
fprintf(fid, '%f', sobrante);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f', rad);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f\r\n', htabique);
%punto dos
fprintf(fid, '%f', sobrante2);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f', tabique2);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f\r\n', htabique);
%altura
fprintf(fid, '-1.5\r\n');
%2 pestaña del tabique
fprintf(fid, '_Box\r\n');
%punto uno
fprintf(fid, '-');
fprintf(fid, '%f', sobrante);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f', rad);
fprintf(fid, ', ');
htabique2=htabique-rad;
fprintf(fid, '%f\r\n', htabique2);
%punto dos
fprintf(fid, '%f', sobrante2);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f', tabique2);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f\r\n', htabique2);
%altura
fprintf(fid, '1.5\r\n');

```

%Cuarto Tabique

```

fprintf(fid, '_Box\r\n');
%punto uno
fprintf(fid, '-');
fprintf(fid, '%f', sobrante);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f', rad);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f\r\n', htabique);
%punto dos
fprintf(fid, '%f', sobrante2);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f', tabique);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f\r\n', htabique);
%altura
fprintf(fid, '-');
fprintf(fid, '%i\r\n', rad);
%1 pestaña del tabique
fprintf(fid, '_Box\r\n');
%punto uno
fprintf(fid, '-');
fprintf(fid, '%f', sobrante);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f', rad);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f\r\n', htabique);
%punto dos
fprintf(fid, '%f', sobrante2);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f', tabique2);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f\r\n', htabique);
%altura
fprintf(fid, '-1.5\r\n');
%2 pestaña del tabique
fprintf(fid, '_Box\r\n');
%punto uno
fprintf(fid, '-');
fprintf(fid, '%f', sobrante);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f', rad);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f\r\n', htabique2);
%punto dos
fprintf(fid, '%f', sobrante2);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f', tabique2);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f\r\n', htabique2);
%altura
fprintf(fid, '1.5\r\n');
%---Tacos de apoyo
%Crear capa
    
```



```

fprintf(fid, '_Box\r\n');
%punto uno
fprintf(fid, '-');
fprintf(fid, '%f', sobrante);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f', rad);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f\r\n', htabique);
%punto dos
fprintf(fid, '%f', sobrante2);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f', tabique);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f\r\n', htabique);
%altura
fprintf(fid, '-');
fprintf(fid, '%i\r\n', rad);
%1 pestaña del tabique
fprintf(fid, '_Box\r\n');
%punto uno
fprintf(fid, '-');
fprintf(fid, '%f', sobrante);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f', rad);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f\r\n', htabique);
%punto dos
fprintf(fid, '%f', sobrante2);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f', tabique2);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f\r\n', htabique);
%altura
fprintf(fid, '-1.5\r\n');
%2 pestaña del tabique
fprintf(fid, '_Box\r\n');
%punto uno
fprintf(fid, '-');
fprintf(fid, '%f', sobrante);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f', rad);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f\r\n', htabique2);
%punto dos
fprintf(fid, '%f', sobrante2);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f', tabique2);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f\r\n', htabique2);
%altura
fprintf(fid, '1.5\r\n');
%---Tacos de apoyo
%Crear capa
    
```

```

fprintf(fid, 'Secundario\r\n');
fprintf(fid, '0,0,255\r\n');
fprintf(fid, '_Enter\r\n');
%altoBT: alto de cada bobina
%inicio: donde comienza el bobinado de BT
inicio=(L-B2)/2;
%diam2: diam es el diametro del bobinado secundario
diam2=(D+((m+k)/10));
RR2=diam2+(R2/10);
%Primer bobina secundario
for h=1:1:(bobinasBT)
    fprintf(fid, ' Tube\r\n');
    fprintf(fid, '0,0,');
    punto=inicio+(h*altoBT)+((h-1)*1.5);
    fprintf(fid, '%f\r\n', punto);
    fprintf(fid, ' Diameter\r\n');
    fprintf(fid, '%f\r\n', diam2);
    fprintf(fid, ' Diameter\r\n');
    fprintf(fid, '%f\r\n', RR2);
    fprintf(fid, '-');
    fprintf(fid, '%f\r\n', altoBT);
end
%Segunda bobina secundario
for h=1:1:(bobinasBT)
    fprintf(fid, ' Tube\r\n');
    fprintf(fid, '%f', M);
    fprintf(fid, ',0,');
    punto=inicio+(h*altoBT)+((h-1)*1.5);
    fprintf(fid, '%f\r\n', punto);
    fprintf(fid, ' Diameter\r\n');
    fprintf(fid, '%f\r\n', diam2);
    fprintf(fid, ' Diameter\r\n');
    fprintf(fid, '%f\r\n', RR2);
    fprintf(fid, '-');
    fprintf(fid, '%f\r\n', altoBT);
end
%Tercera bobina secundario
for h=1:1:(bobinasBT)
    fprintf(fid, ' Tube\r\n');
    fprintf(fid, '%f', m2);
    fprintf(fid, ',0,');
    punto=inicio+(h*altoBT)+((h-1)*1.5);
    fprintf(fid, '%f\r\n', punto);
    fprintf(fid, ' Diameter\r\n');
    fprintf(fid, '%f\r\n', diam2);
    fprintf(fid, ' Diameter\r\n');
    fprintf(fid, '%f\r\n', RR2);
    fprintf(fid, '-');
    fprintf(fid, '%f\r\n', altoBT);
end
%Creación del bobinado primario
%Crear capa
fprintf(fid, '-_Layer\r\n');
    
```



```

fprintf(fid, '-_Layer\r\n');
fprintf(fid, '_New\r\n');
fprintf(fid, '_Tacos\r\n');
%Establecer como capa actual
fprintf(fid, '_Current\r\n');
fprintf(fid, '_Tacos\r\n');
%Cambiar el color de la capa
fprintf(fid, '_Color\r\n');
fprintf(fid, '_Tacos\r\n');
fprintf(fid, '170,160,20\r\n');
fprintf(fid, '_Enter\r\n');
anchotaco=m2-5;
%1 taco
    fprintf(fid, '_Box\r\n');
    %punto uno
    fprintf(fid, '0,-');
    fprintf(fid, '%f',D);
    fprintf(fid, ',-');
    fprintf(fid, '%f\r\n',D);
    %punto dos
    fprintf(fid, '5,');
    fprintf(fid, '%f',D);
    fprintf(fid, ',-');
    fprintf(fid, '%f\r\n',D);
    %altura
    fprintf(fid, '-5\r\n');
%2 taco
    fprintf(fid, '_Box\r\n');
    %punto uno
    fprintf(fid, '%f',m2);
    fprintf(fid, ',-');
    fprintf(fid, '%f',D);
    fprintf(fid, ',-');
    fprintf(fid, '%f\r\n',D);
    %punto dos
    fprintf(fid, '%f',anchotaco);
    fprintf(fid, ',');
    fprintf(fid, '%f',D);
    fprintf(fid, ',-');
    fprintf(fid, '%f\r\n',D);
    %altura
    fprintf(fid, '-5\r\n');
%---Bobinados---
%Creación del bobinado secundario
%Crear capa
fprintf(fid, '-_Layer\r\n');
fprintf(fid, '_New\r\n');
fprintf(fid, '_Secundario\r\n');
%Establecer como capa actual
fprintf(fid, '_Current\r\n');
fprintf(fid, '_Secundario\r\n');
%Cambiar el color de la capa
fprintf(fid, '_Color\r\n');

```

```

fprintf(fid, ' _New\r\n');
fprintf(fid, ' _Primario\r\n');
%Establecer como capa actual
fprintf(fid, ' _Current\r\n');
fprintf(fid, ' _Primario\r\n');
%Cambiar el color de la capa
fprintf(fid, ' _Color\r\n');
fprintf(fid, ' _Primario\r\n');
fprintf(fid, '255,127,0\r\n');
fprintf(fid, ' _Enter\r\n');
%inicio: donde comienza el bobinado de AT
iniciol=(L-B1)/2
%diam1: diam es el diametro del bobinado primario
diam1=(RR2+((j+1)/10))
RR1=diam1+(R1/10);
%Primer bobina primario
for h=1:1:(bobinasAT)
    fprintf(fid, ' _Tube\r\n');
    fprintf(fid, '0,0,');
    punto=iniciol+(h*altoAT)+((h-1)*1.5);
    fprintf(fid, '%f\r\n', punto);
    fprintf(fid, ' _Diameter\r\n');
    fprintf(fid, '%f\r\n', diam1);
    fprintf(fid, ' _Diameter\r\n');
    fprintf(fid, '%f\r\n', RR1);
    fprintf(fid, '-');
    fprintf(fid, '%f\r\n', altoAT);
end
%Segunda bobina primario
for h=1:1:(bobinasAT)
    fprintf(fid, ' _Tube\r\n');
    fprintf(fid, '%f', M);
    fprintf(fid, ',0,');
    punto=iniciol+(h*altoAT)+((h-1)*1.5);
    fprintf(fid, '%f\r\n', punto);
    fprintf(fid, ' _Diameter\r\n');
    fprintf(fid, '%f\r\n', diam1);
    fprintf(fid, ' _Diameter\r\n');
    fprintf(fid, '%f\r\n', RR1);
    fprintf(fid, '-');
    fprintf(fid, '%f\r\n', altoAT);
end
%Tercera bobina primario
for h=1:1:(bobinasAT)
    fprintf(fid, ' _Tube\r\n');
    fprintf(fid, '%f', m2);
    fprintf(fid, ',0,');
    punto=iniciol+(h*altoAT)+((h-1)*1.5);
    fprintf(fid, '%f\r\n', punto);
    fprintf(fid, ' _Diameter\r\n');
    fprintf(fid, '%f\r\n', diam1);
    fprintf(fid, ' _Diameter\r\n');
    fprintf(fid, '%f\r\n', RR1);

```



```

        fprintf(fid, '-');
        fprintf(fid, '%f\r\n', altoAT);
    end
%Creación de los tabiques aislantes
%Crear capa
fprintf(fid, '-_Layer\r\n');
fprintf(fid, '_New\r\n');
fprintf(fid, 'Aislantes\r\n');
%Establecer como capa actual
fprintf(fid, 'Current\r\n');
fprintf(fid, 'Aislantes\r\n');
%Cambiar el color de la capa
fprintf(fid, 'Color\r\n');
fprintf(fid, 'Aislantes\r\n');
fprintf(fid, '255,0,0\r\n');
fprintf(fid, 'Enter\r\n');
dtubo2=RR2+(j/10);
%Tabique entre BT y AT
%Primer columna
fprintf(fid, 'Tube\r\n');
fprintf(fid, '0,0,');
fprintf(fid, '%f\r\n', inicio);
fprintf(fid, 'Diameter\r\n');
fprintf(fid, '%f\r\n', RR2);
fprintf(fid, 'Diameter\r\n');
fprintf(fid, '%f\r\n', dtubo2);
fprintf(fid, '%f\r\n', B2);
%Segunda columna
fprintf(fid, 'Tube\r\n');
fprintf(fid, '%f', M);
fprintf(fid, ',0,');
fprintf(fid, '%f\r\n', inicio);
fprintf(fid, 'Diameter\r\n');
fprintf(fid, '%f\r\n', RR2);
fprintf(fid, 'Diameter\r\n');
fprintf(fid, '%f\r\n', dtubo2);
fprintf(fid, '%f\r\n', B2);
%Tercer columna
fprintf(fid, 'Tube\r\n');
fprintf(fid, '%f', m2);
fprintf(fid, ',0,');
fprintf(fid, '%f\r\n', inicio);
fprintf(fid, 'Diameter\r\n');
fprintf(fid, '%f\r\n', RR2);
fprintf(fid, 'Diameter\r\n');
fprintf(fid, '%f\r\n', dtubo2);
fprintf(fid, '%f\r\n', B2);
%Tabique entre nucleo y BT
dtubo1=D+(k/10);
%Primer columna
fprintf(fid, 'Tube\r\n');
fprintf(fid, '0,0,');
fprintf(fid, '%f\r\n', inicio);

```

```

fprintf(fid, '_Diameter\r\n');
fprintf(fid, '%f\r\n', D);
fprintf(fid, '_Diameter\r\n');
fprintf(fid, '%f\r\n', dtubol);
fprintf(fid, '%f\r\n', B2);
%Segunda columna
fprintf(fid, '_Tube\r\n');
fprintf(fid, '%f', M);
fprintf(fid, ', 0, ');
fprintf(fid, '%f\r\n', inicio);
fprintf(fid, '_Diameter\r\n');
fprintf(fid, '%f\r\n', D);
fprintf(fid, '_Diameter\r\n');
fprintf(fid, '%f\r\n', dtubol);
fprintf(fid, '%f\r\n', B2);
%Tercer columna
fprintf(fid, '_Tube\r\n');
fprintf(fid, '%f', m2);
fprintf(fid, ', 0, ');
fprintf(fid, '%f\r\n', inicio);
fprintf(fid, '_Diameter\r\n');
fprintf(fid, '%f\r\n', D);
fprintf(fid, '_Diameter\r\n');
fprintf(fid, '%f\r\n', dtubol);
fprintf(fid, '%f\r\n', B2);
%Creación de la cuba
%Crear capa
fprintf(fid, '-_Layer\r\n');
fprintf(fid, '_New\r\n');
fprintf(fid, '_Cuba\r\n');
%Establecer como capa actual
fprintf(fid, '_Current\r\n');
fprintf(fid, '_Cuba\r\n');
%Cambiar el color de la capa
fprintf(fid, '_Color\r\n');
fprintf(fid, '_Cuba\r\n');
fprintf(fid, '230,230,230\r\n');
fprintf(fid, '_Enter\r\n');
lcuba1=(M-(largo/2));
lcuba2=(M+(largo/2));
ancho2=(ancho/2);
incuba=D+6.25;
fincuba=(altura-(D+6.25));
%Base
    fprintf(fid, '_Box\r\n');
    %punto uno
    fprintf(fid, '%f', lcuba1);
    fprintf(fid, ', -');
    fprintf(fid, '%f', ancho2);
    fprintf(fid, ', -');
    fprintf(fid, '%f\r\n', incuba);
    %punto dos
    fprintf(fid, '%f', lcuba2);

```



```

fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f', ancho2);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f\r\n', incuba);
%altura
fprintf(fid, '1.25\r\n');
%Tapa
fprintf(fid, '_Box\r\n');
%punto uno
fprintf(fid, '%f', (lcuba1-5));
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f', (ancho2+5));
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f\r\n', fincuba);
%punto dos
fprintf(fid, '%f', (lcuba2+5));
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f', (ancho2+5));
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f\r\n', fincuba);
%altura
fprintf(fid, '1.25\r\n');
%frente
fprintf(fid, '_Box\r\n');
%punto uno
fprintf(fid, '%f', (lcuba1-1.25));
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f', ancho2);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f\r\n', incuba);
%punto dos
fprintf(fid, '%f', (lcuba2+1.25));
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f', (ancho2+1.25));
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f\r\n', incuba);
%altura
fprintf(fid, '%f\r\n', altura);
%fondo
fprintf(fid, '_Box\r\n');
%punto uno
fprintf(fid, '%f', (lcuba1-1.25));
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f', ancho2);
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f\r\n', incuba);
%punto dos
fprintf(fid, '%f', (lcuba2+1.25));
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f', (ancho2+1.25));
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f\r\n', incuba);
%altura

```

```

        fprintf(fid, '%f\r\n', altura);

    %Lateral Izquierdo
    fprintf(fid, '_Box\r\n');
    %punto uno
    fprintf(fid, '%f', lcuba1);
    fprintf(fid, ', -');
    fprintf(fid, '%f', ancho2);
    fprintf(fid, ', -');
    fprintf(fid, '%f\r\n', incuba);
    %punto dos
    fprintf(fid, '%f', (lcuba1-1.25));
    fprintf(fid, ', ');
    fprintf(fid, '%f', ancho2);
    fprintf(fid, ', -');
    fprintf(fid, '%f\r\n', incuba);
    %altura
    fprintf(fid, '%f\r\n', altura);

    %Lateral Derecho
    fprintf(fid, '_Box\r\n');
    %punto uno
    fprintf(fid, '%f', lcuba2);
    fprintf(fid, ', -');
    fprintf(fid, '%f', ancho2);
    fprintf(fid, ', -');
    fprintf(fid, '%f\r\n', incuba);
    %punto dos
    fprintf(fid, '%f', (lcuba2+1.25));
    fprintf(fid, ', ');
    fprintf(fid, '%f', ancho2);
    fprintf(fid, ', -');
    fprintf(fid, '%f\r\n', incuba);
    %altura
    fprintf(fid, '%f\r\n', altura);

    %Tanque de expansión
    %Crear capa
    fprintf(fid, '- Layer\r\n');
    fprintf(fid, '_New\r\n');
    fprintf(fid, 'Tanque\r\n');
    %Establecer como capa actual
    fprintf(fid, '_Current\r\n');
    fprintf(fid, 'Tanque\r\n');
    %Cambiar el color de la capa
    fprintf(fid, '_Color\r\n');
    fprintf(fid, 'Tanque\r\n');
    fprintf(fid, '230,230,230\r\n');
    fprintf(fid, '_Enter\r\n');
    %Tanque
    ltanque=((ancho*altura*largo)/(4800))/2;
    fprintf(fid, '_Box\r\n');
    %punto uno
    fprintf(fid, '%f', (lcuba1-1.25));
    fprintf(fid, ', -');

```



```

fprintf(fid, '%f', ltanque);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f\r\n', (altura-incuba+30));
%punto dos
fprintf(fid, '%f', (lcubal-40));
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f', (ltanque));
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f\r\n', (altura-incuba+30));
%altura
fprintf(fid, '40\r\n');
%soportes
%frente
fprintf(fid, '_Box\r\n');
%punto uno
fprintf(fid, '%f', (lcubal-1.25));
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f', ancho2);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f\r\n', (altura-incuba));
%punto dos
fprintf(fid, '%f', (lcubal-20));
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f', (ancho2+1.25));
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f\r\n', (altura-incuba));
%altura
fprintf(fid, '1.25\r\n');
%fondo
fprintf(fid, '_Box\r\n');
%punto uno
fprintf(fid, '%f', (lcubal-1.25));
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f', ancho2);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f\r\n', (altura-incuba));
%punto dos
fprintf(fid, '%f', (lcubal-20));
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f', (ancho2+1.25));
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f\r\n', (altura-incuba));
%altura
fprintf(fid, '1.25\r\n');
%vertical frente
fprintf(fid, '_Box\r\n');
%punto uno
fprintf(fid, '%f', (lcubal-20));
fprintf(fid, ', -');
fprintf(fid, '%f', ancho2);
fprintf(fid, ', ');
fprintf(fid, '%f\r\n', (altura-incuba));
%punto dos

```

```

        fprintf(fid, '%f', (lcuba1-21.25));
        fprintf(fid, ', -');
        fprintf(fid, '%f', (ancho2+1.25));
        fprintf(fid, ', ');
        fprintf(fid, '%f\r\n', (altura-incuba));
        %altura
        fprintf(fid, '30\r\n');
    %vertical fondo
        fprintf(fid, '_Box\r\n');
        %punto uno
        fprintf(fid, '%f', (lcuba1-20));
        fprintf(fid, ', ');
        fprintf(fid, '%f', ancho2);
        fprintf(fid, ', ');
        fprintf(fid, '%f\r\n', (altura-incuba));
        %punto dos
        fprintf(fid, '%f', (lcuba1-21.25));
        fprintf(fid, ', ');
        fprintf(fid, '%f', (ancho2+1.25));
        fprintf(fid, ', ');
        fprintf(fid, '%f\r\n', (altura-incuba));
        %altura
        fprintf(fid, '30\r\n');
    %Buccholzz
    %ducto horizontal
        fprintf(fid, '_Box\r\n');
        %punto uno
        fprintf(fid, '%f', (lcuba1+21.25));
        fprintf(fid, ', -1.25, ');
        fprintf(fid, '%f\r\n', (altura-incuba+15));
        %punto dos
        fprintf(fid, '%f', (lcuba1-20));
        fprintf(fid, ', 1.25, ');
        fprintf(fid, '%f\r\n', (altura-incuba+15));
        %altura
        fprintf(fid, '1.25\r\n');
    %ducto vertical tanque
        fprintf(fid, '_Cylinder\r\n');
        %punto uno
        fprintf(fid, '%f', (lcuba1-20));
        fprintf(fid, ', 0, ');
        fprintf(fid, '%f\r\n', (altura-incuba+15));
        fprintf(fid, '_Radius\r\n');
        fprintf(fid, '%f\r\n', (1.25));
        fprintf(fid, '%f\r\n', (15));
    %ducto vertical cuba
        fprintf(fid, '_Cylinder\r\n');
        %punto uno
        fprintf(fid, '%f', (lcuba1+20.625));
        fprintf(fid, ', 0, ');
        fprintf(fid, '%f\r\n', (altura-incuba));
        fprintf(fid, '_Radius\r\n');
        fprintf(fid, '%f\r\n', (1.25));
    
```



```

        fprintf(fid, '%f\r\n', (5));
%---Recipiente---
        fprintf(fid, '_Cylinder\r\n');
        %punto uno
        fprintf(fid, '%f', (lcubal+20.625));
        fprintf(fid, ', 0, ');
        fprintf(fid, '%f\r\n', (altura-incuba+5));
        fprintf(fid, '_Radius\r\n');
        fprintf(fid, '%f\r\n', (5));
        fprintf(fid, '%f\r\n', (15));
%Salvar el proyecto
        fprintf(fid, '-_saveAs\r\n');
        if abrir ==0
            guardar=strcat(' ', directorio, '\Proyecto\ ', nombre, '\ ', nombre, '.
            3dm');
        elseif abrir==1
            guardar=strcat(' ', directorio, nombre, ' ');
        end
        fprintf(fid, '%s\r\n', guardar);
        fprintf(fid, '_Enter\r\n');
        fclose (fid);
        msgbox('El archivo se generó con éxito', 'Modelado', 'Ok')
    end

```

## A.2 Programación de protecciones

Para realizar una simulación de coordinación de protecciones se cargaron varias curvas de fusibles estándares y tomando en cuenta parámetros ya calculados con anterioridad se puede visualizar una coordinación con la protección aguas arriba del transformador.

```

function boton_Callback(hObject, eventdata, handles)
global potencia tp Ucc
i=(potencia/(sqrt(3)*tp))
zt=((Ucc*0.01)*tp^2)/potencia
icc=(1.1*tp)/(sqrt(3)*zt)
iconx=12*i
isab=(7*95*i)/tp
ansi=i*[3 4.75 6.7 11.3 25]
t=[300 60 30 10 2]
k=get(handles.menu, 'value')
if k == 1
    fuseseis
    corr=k(:,1);
    ti=k(:,2);
    loglog(iconx, 0.1, 'bo-');grid;hold;
    loglog(ansi, t, 'gx-');
    loglog(icc, 2, 'ro-');
    loglog(corr, ti, 'k');
    loglog(isab, 0.02, 'mo-');title('Protección del
transformador');xlabel('I [A]);ylabel('t [s]');

```

```

        legend('Corriente Conexion','ANSI','Cortocircuito','fusible
6k','saborsky');
        pause;
    end
    if k == 2
        fuseocho
        corr=k(:,1);
        ti=k(:,2);
        loglog(iconx,0.1,'bo-');grid;hold;
        loglog(ansi,t,'gx-');
        loglog(icc,2,'ro-');
        loglog(corr,ti,'k');
        loglog(isab,0.02,'mo-');title('Protección del
transformador');xlabel('I [A]');ylabel('t [s]');
        legend('Corriente Conexion','ANSI','Cortocircuito','fusible
8k','saborsky');
        pause;
    end
    if k==3
        fusediez
        corr=k(:,1);
        ti=k(:,2);
        loglog(iconx,0.1,'bo-');grid;hold;
        loglog(ansi,t,'gx-');
        loglog(icc,2,'ro-');
        loglog(corr,ti,'k');
        loglog(isab,0.02,'mo-');title('Protección del
transformador');xlabel('I [A]');ylabel('t [s]');
        legend('Corriente Conexion','ANSI','Cortocircuito','fusible
10k','saborsky');
        pause;
    end
    if k==4
        fusedoce
        corr=k(:,1);
        ti=k(:,2);
        loglog(iconx,0.1,'bo-');grid;hold;
        loglog(ansi,t,'gx-');
        loglog(icc,2,'ro-');
        loglog(corr,ti,'k');
        loglog(isab,0.02,'mo-');title('Protección del
transformador');xlabel('I [A]');ylabel('t [s]');
        legend('Corriente Conexion','ANSI','Cortocircuito','fusible
12k','saborsky');
        pause;
    end
    if k==5
        fusequince
        corr=k(:,1);
        ti=k(:,2);
        loglog(iconx,0.1,'bo-');grid;hold;
        loglog(ansi,t,'gx-');
        loglog(icc,2,'ro-');
    
```



```

        loglog(corr,ti,'k');
        loglog(isab,0.02,'mo-');title('Protección del
transformador');xlabel('I [A]');ylabel('t [s]');
        legend('Corriente Conexion','ANSI','Cortocircuito','fusible
15k','saborsky');
        pause;
    end
    if k==6
        fuseveinte
        corr=k(:,1);
        ti=k(:,2);
        loglog(iconx,0.1,'bo-');grid;hold;
        loglog(ansi,t,'gx-');
        loglog(icc,2,'ro-');
        loglog(corr,ti,'k');
        loglog(isab,0.02,'mo-');title('Protección del
transformador');xlabel('I [A]');ylabel('t [s]');
        legend('Corriente Conexion','ANSI','Cortocircuito','fusible
20k','saborsky');
        pause;
    end
    if k==7
        fuseveinticinco
        corr=k(:,1);
        ti=k(:,2);
        loglog(iconx,0.1,'bo-');grid;hold;
        loglog(ansi,t,'gx-');
        loglog(icc,2,'ro-');
        loglog(corr,ti,'k');
        loglog(isab,0.02,'mo-');title('Protección del
transformador');xlabel('I [A]');ylabel('t [s]');
        legend('Corriente Conexion','ANSI','Cortocircuito','fusible
25k','saborsky');
        pause;
    end
    if k==8
        fusetreinta
        corr=k(:,1);
        ti=k(:,2);
        loglog(iconx,0.1,'bo-');grid;hold;
        loglog(ansi,t,'gx-');
        loglog(icc,2,'ro-');
        loglog(corr,ti,'k');
        loglog(isab,0.02,'mo-');title('Protección del
transformador');xlabel('I [A]');ylabel('t [s]');
        legend('Corriente Conexion','ANSI','Cortocircuito','fusible
30k','saborsky');
        pause;
    end
    if k==9
        fusecuarenta
        corr=k(:,1);
        ti=k(:,2);
    
```

```

loglog(iconx,0.1,'bo-');grid;hold;
loglog(ansi,t,'gx-');
loglog(icc,2,'ro-');
loglog(corr,ti,'k');
loglog(isab,0.02,'mo-');title('Protección del
transformador');xlabel('I [A]');ylabel('t [s]');
legend('Corriente Conexion','ANSI','Cortocircuito','fusible
40k','savorsky');
pause;
end
if k==10
fusecincuenta
corr=k(:,1);
ti=k(:,2);
loglog(iconx,0.1,'bo-');grid;hold;
loglog(ansi,t,'gx-');
loglog(icc,2,'ro-');
loglog(corr,ti,'k');
loglog(isab,0.02,'mo-');title('Protección del
transformador');xlabel('I [A]');ylabel('t [s]');
legend('Corriente Conexion','ANSI','Cortocircuito','fusible
50k','savorsky');
pause;
end
if k==11
fusesesentaycinco
corr=k(:,1);
ti=k(:,2);
loglog(iconx,0.1,'bo-');grid;hold;
loglog(ansi,t,'gx-');
loglog(icc,2,'ro-');
loglog(corr,ti,'k');
loglog(isab,0.02,'mo-');title('Protección del
transformador');xlabel('I [A]');ylabel('t [s]');
legend('Corriente Conexion','ANSI','Cortocircuito','fusible
65k','savorsky');
pause;
end
if k==12
fuseochenta
corr=k(:,1);
ti=k(:,2);
loglog(iconx,0.1,'bo-');grid;hold;
loglog(ansi,t,'gx-');
loglog(icc,2,'ro-');
loglog(corr,ti,'k');
loglog(isab,0.02,'mo-');title('Protección del
transformador');xlabel('I [A]');ylabel('t [s]');
legend('Corriente Conexion','ANSI','Cortocircuito','fusible
80k','savorsky');
pause;
end
if k==13

```



```

fusecien
    corr=k(:,1);
    ti=k(:,2);
    loglog(iconx,0.1,'bo-');grid;hold;
    loglog(ansi,t,'gx-');
    loglog(icc,2,'ro-');
    loglog(corr,ti,'k');
    loglog(isab,0.02,'mo-');title('Protección del
transformador');xlabel('I [A]');ylabel('t [s]');
    legend('Corriente Conexion','ANSI','Cortocircuito','fusible
100k','saborsky');
    pause;
end
if k==14
    fuseciento
    corr=k(:,1);
    ti=k(:,2);
    loglog(iconx,0.1,'bo-');grid;hold;
    loglog(ansi,t,'gx-');
    loglog(icc,2,'ro-');
    loglog(corr,ti,'k');
    loglog(isab,0.02,'mo-');title('Protección del
transformador');xlabel('I [A]');ylabel('t [s]');
    legend('Corriente Conexion','ANSI','Cortocircuito','fusible
140k','saborsky');
    pause;
end
if k==15
    fusedosciento
    corr=k(:,1);
    ti=k(:,2);
    loglog(iconx,0.1,'bo-');grid;hold;
    loglog(ansi,t,'gx-');
    loglog(icc,2,'ro-');
    loglog(corr,ti,'k');
    loglog(isab,0.02,'mo-');title('Protección del
transformador');xlabel('I [A]');ylabel('t [s]');
    legend('Corriente Conexion','ANSI','Cortocircuito','fusible
200k','saborsky');
    pause;
end

```