



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN

**CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE INDUCCIÓN DE UNA OLLA EN FUNCIÓN
DEL DIÁMETRO DE DOS BOBINAS PLANAS DE CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Electrónica

AUTORAS: AGUEDA FERNANDA RAMÍREZ CASTRO
STEFANI MICHELLE RAMOS MILLER

TUTOR: ING. VÍCTOR DAVID LARCO TORRES, MGTR.

Guayaquil – Ecuador

2023

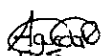
**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

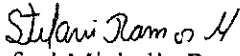
Nosotras, Agueda Fernanda Ramírez Castro con documento de identificación N° 0503985848 y Stefani Michelle Ramos Miller con documento de identificación N° 0954292694, manifestamos que:

Somos las autoras y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación

Guayaquil, 25 de septiembre del año 2023.

Atentamente,


Agueda Fernanda Ramírez Castro
050398584-8


Stefani Michelle Ramos Miller
095429269-4


**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**


Nosotras, Agueda Fernanda Ramírez Castro con documento de identificación N° 0503985848 y Stefani Michelle Ramos Miller con documento de identificación N° 0954292694, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autoras del Proyecto Técnico: “Cálculo de la resistencia de inducción de una olla en función del diámetro de dos bobinas planas de calentamiento por inducción”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Electrónica, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 25 de septiembre del año 2023.

Atentamente,


Agueda Fernanda Ramírez Castro
050398584-8


Stefani Michelle Ramos Miller
095429269-4

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Víctor David Larco Torres con documento de identificación N° 0923270136, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE INDUCCIÓN DE UNA OLLA EN FUNCIÓN DEL DIÁMETRO DE DOS BOBINAS PLANAS DE CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN, realizado por Ramírez Castro Agueda Fernanda con documento de identificación N° 0503985848 y Ramos Miller Stefani Michelle con documento de identificación N° 0954292694, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 25 de septiembre del año 2023.

Atentamente,



Ing. Víctor David Larco Torres, Mgtr.

0923270136

DEDICATORIA

A mis padres, mis dos grandes amores, Agueda y Teodoro, quienes le dan luz a mi vida con su amor infinito y su apoyo incondicional, con su fortaleza me han enseñado a no rendirme ante los tropiezos de la vida. Todo lo que soy es por ustedes y para ustedes. ¡Con cariño!

Agueda Ramírez C.

A mis amados padres, por apoyarme y alentarme en mis proyectos, por darme todo e impulsarme a soñar en grande para seguir mis metas hasta alcanzarlas, enseñándome que "Sin sacrificio, no hay gloria". Sin todo el amor y la fortaleza que me han dado no hubiera podido seguir adelante. Los amo infinitamente, Nelson y Sandra.

Stefani Ramos M.

AGRADECIMIENTO

A Dios por brindarme el privilegio de una familia maravillosa.

A mis padres, por su entrega y constancia en el arduo trabajo de formarnos ¡Las seis flores de su jardín, no seríamos sin ustedes! A mis hermanas por siempre estar presentes con cariño y paciencia por su preocupación por mis sueños, por ser mi fuerza en los momentos débiles, sin todos ustedes no habría alcanzado esta meta.

A mis amigos por las horas de estudio y compañerismo compartidas; a mis maestros por su perseverancia por educar, por las lecciones aprendidas, no solo académicas, sino, también de vida, y de forma especial a mi tutor de tesis por su valiosa guía, paciencia y dedicación para culminar este trabajo,

Agueda Ramírez C.

A Dios y a mi querido San José de Cupertino que ha intercedido por mi incansablemente durante mis estudios. A mi padrino, que ha sido una pieza fundamental en mi carrera universitaria, por ser incondicional al acompañarme y apoyarme durante estos 4 años. A mi Marinita, que con todo el amor del mundo ha estado esperando celebrar este momento y por siempre recibirme con los brazos abiertos. A mi hermana por transmitirme su fe en Dios.

A mi amiga y compañera de tesis, por su cariño, apoyo y comprensión durante este proceso. A mi tutor de tesis, por su paciencia, dedicación y consejos, sin su acompañamiento no lo habiéramos logrado. A mis amigos por brindarme valiosos momentos que llevaré en mi corazón. A HW. por animarme y motivarme a soñar cada día más alto.

Stefani Ramos M.

Resumen

Este documento pretende analizar la resistencia de inducción que se genera en las capas del fondo magnético de una olla que se coloca sobre dos bobinas de calentamiento por inducción de diferentes medidas y la influencia de esta sobre su eficiencia eléctrica, en base a las resistencias eléctricas presentes en un sistema de cocción por inducción. La resistencia de inducción en una olla está determinada por la interacción entre el campo electromagnético generado por la bobina de inducción y las propiedades magnéticas del material de la base de la olla. En síntesis, una cocina de inducción utiliza campos electromagnéticos para generar calor directamente en la base de la olla lo que permite calentar los alimentos más rápido que en una cocina eléctrica o a gas, alcanzando así una mejor eficiencia. En Ecuador se quiso promover el uso de esta tecnología revolucionaria en búsqueda de la eficiencia energética, pero no tuvo mayor alcance y la aceptación fue baja. Sin embargo, en países europeos la cocina de inducción es muy apreciada contribuyendo al fortalecimiento de su matriz energética, debido a que el costo del gas licuado de petróleo (GLP) es más elevado que en Latinoamérica.

Palabras Clave: Resistencia de inducción, fondo magnético de olla, bobina de calentamiento por inducción, eficiencia eléctrica, campo electromagnético, cocina de inducción.

Abstract

This work aims to analyze the induction resistance generated in the magnetic layers of the bottom of a pot placed on two induction heating coils of different sizes and the influence of this on its electrical efficiency, based on the electrical resistances present in an induction cooking system. The induction resistance in a pot is determined by the interaction between the electromagnetic field generated by the induction coil and the magnetic properties of the pot bottom material. In short, an induction stove uses electromagnetic fields to generate heat directly at the bottom of the pot, which allows food to be heated more quickly than on an electric or gas stove, thus achieving greater efficiency. In Ecuador, there were intents to promote the use of this revolutionary technology in the search for energy efficiency, but its use was not widespread, and acceptance was low. However, in European countries the induction stove is highly appreciated, contributing to strengthening their energy matrix, because the cost of liquefied petroleum gas (GLP) is higher than in Latin America.

Keywords: Induction resistor, magnetic bottom of a pot, induction heating coil, electrical efficiency, magnetic pot bottom, electromagnetic field, induction stove.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I	INTRODUCCIÓN.....	1
II	PROBLEMA.....	2
III	OBJETIVOS	3
	3.1 Objetivo general	3
	3.2 Objetivos específicos.....	3
IV	FUNDAMENTO TEÓRICO	4
	4.1 Inducción electromagnética.....	4
	4.2 Principio de la bobina de inducción	5
	4.3 Campo magnético en la bobina de inducción.....	6
	4.4 Efecto piel	7
	4.5 Principio de la Cocina de Inducción	8
	4.6 Características de las ollas de inducción.....	9
V	MARCO METODOLÓGICO.....	11
	5.1 Diseño geométrico del problema para la bobina plana de calentamiento por inducción de 140 mm de diámetro externo	12
	5.1.1 Diseño de la geometría de la bobina plana de calentamiento por inducción de 140 mm de diámetro externo sin carga.....	12
	5.1.2 Diseño de la geometría de la bobina plana de calentamiento por inducción de 140 mm de diámetro externo con carga.....	26

5.2	Diseño geométrico del problema para la bobina plana de calentamiento por inducción de 208 mm de diámetro externo	32
5.2.1	Diseño de la geometría de la bobina plana de calentamiento por inducción de 208 mm de diámetro externo sin carga.....	32
5.2.2	Diseño de la geometría de la bobina plana de calentamiento por inducción de 208 mm con carga.....	37
5.2.3	Ejecución de la solución del problema	39
5.3	Código de Matlab para calcular la resistencia de inducción	42
5.3.1	Programa principal de Matlab.....	42
5.3.2	Código de la función haciafemm208.m	46
5.3.3	Código de la función promedioH208.m.....	46
5.3.4	Código de la función resistencia208.m.....	46
VI	RESULTADOS.....	47
6.1	Bobina de calentamiento por inducción de 140 mm de diámetro externo	47
6.2	Bobina de calentamiento por inducción de 208 mm de diámetro externo	51
6.3	Análisis comparativo.....	54
VII	CRONOGRAMA.....	55
VIII	PRESUPUESTO	56
IX	CONCLUSIONES	57
X	RECOMENDACIONES.....	58

XI REFERENCIAS..... 59

XII ANEXO..... 61

Índice de Figuras

Figura 1	4
Figura 2	5
Figura 3	6
Figura 4	8
Figura 5	8
Figura 6	10
Figura 7	12
Figura 8	13
Figura 9	14
Figura 10	15
Figura 11	15
Figura 12	16
Figura 13	17
Figura 14	18
Figura 15	19
Figura 16	19
Figura 17	20
Figura 18	21
Figura 19	21
Figura 20	22
Figura 21	23
Figura 22	23
Figura 23	24

Figura 24	25
Figura 25	25
Figura 26	26
Figura 27	27
Figura 28	28
Figura 29	28
Figura 30	29
Figura 31	29
Figura 32	30
Figura 33	30
Figura 34	31
Figura 35	31
Figura 36	32
Figura 37	33
Figura 38	34
Figura 39	34
Figura 40	35
Figura 41	36
Figura 42	36
Figura 43	37
Figura 44	38
Figura 45	38
Figura 46	39

Figura 47	39
Figura 48	40
Figura 49	40
Figura 50	41
Figura 51	48
Figura 52	49
Figura 53	50
Figura 54	51
Figura 55	52
Figura 56	53

Índice de Tablas

Tabla 1	50
Tabla 2	53
Tabla 3	54
Tabla 4	55
Tabla 5	56

I INTRODUCCIÓN

El presente Trabajo de Titulación busca calcular la resistencia eléctrica que se presenta en la base de una olla que cumple con las características para ser utilizada en una cocina que usa la tecnología de inducción electromagnética para generar calor en la capa exterior de la olla mencionada.

En este proyecto se analiza si la resistencia eléctrica de la olla está asociada con la eficiencia que presenta la cocina de inducción, por lo que es preciso establecer cómo se relaciona el tamaño de la olla con el tamaño de la bobina interna de la cocina de inducción.

Este trabajo se desarrolla considerando la geometría de dos bobinas, similares en su forma y constitución, pero de diferentes tamaños. Se hace uso de un software de Elementos Finitos especialmente diseñado para el análisis de problemas electromagnéticos. Este software libre se llama FEMM y en este trabajo se lo utiliza para graficar la geometría física de las bobinas y establecer los valores de las variables físicas, eléctricas y magnéticas que caracterizan a cada bobina, a la vez que permite obtener datos precisos sobre la resistencia presentes en el fenómeno de inducción magnética con y sin un recipiente de cocción.

A su vez, se utiliza una plataforma de programación y cálculo numérico que permite entre otras funciones la comunicación entre softwares compatibles a él. Este software propietario es MATLAB, el cual en este estudio permite la adquisición de datos desde FEMM, estos datos son utilizados para calcular la resistencia de inducción de la olla.

II PROBLEMA

La resistencia de inducción es la resistencia generada en un conductor cuando se lo coloca dentro de un campo magnético dinámico sin tocar el inductor.

En las Consideraciones del Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 101, Art. 1, inciso 7.4.1, literal. c, se encuentra establecido que “la olla normalizada debe ser seleccionada según el diámetro externo de la bobina.” (RTE INEN 101, 2017)

Para bobinas de 140 mm y 208 mm corresponden ollas de 140 ± 10 mm y 210 ± 10 mm, respectivamente. Este criterio se recoge de lo establecido en la norma antes mencionada, sin embargo, este reglamento no especifica la razón por la cual la dimensión de la olla debe estar dentro de estos valores, lo que deriva en el desconocimiento del efecto que tiene cambiar a una olla diferente a la establecida en el reglamento sobre la resistencia de inducción.

Por esta razón se considera necesario estudiar los efectos de la resistencia de inducción presentes en el fondo magnético de una olla de 180 mm de diámetro, respecto a las bobinas planas de calentamiento de 140 mm y 208 mm de diámetro, considerando que según la norma los diámetros de estas bobinas y la olla no se corresponden entre sí.

III OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Calcular la resistencia de inducción de una olla en función del diámetro de dos bobinas planas de calentamiento por inducción.

3.2 Objetivos específicos

- Realizar la geometría del problema magnético en FEMM.
- Realizar un script en MATLAB para calcular la resistencia de inducción a partir de los datos obtenidos en FEMM.
- Calcular la resistencia de inducción de la olla en MATLAB.
- Calcular la eficiencia de las dos bobinas en MATLAB.

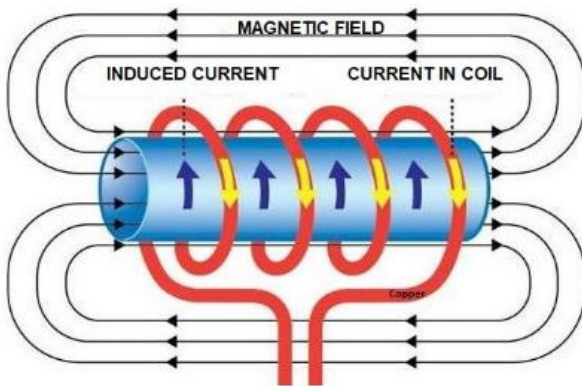
IV FUNDAMENTO TEÓRICO

4.1 Inducción electromagnética

La inducción se origina cuando un campo electromagnético transfiere su energía a un cuerpo expuesto dentro de su radio. De acuerdo con Faraday (1831), "un cambio en el flujo magnético que atraviesa una bobina induce una corriente eléctrica en dicha bobina. La corriente inducida crea un campo magnético que se opone al cambio en el flujo magnético original". Las líneas de dicho campo permiten el flujo de los electrones en el cable de la bobina, la Figura 1 indica el flujo de las líneas electromagnéticas de este fenómeno.

Figura 1

Inducción Electromagnética



Nota: El gráfico representa la transferencia de energía mediante un campo electromagnético a un cuerpo expuesto en su radio. Reproducido de *¿Qué es el Calentamiento por Inducción y cómo funcionan?*, por HVH Industrial Solutions, 2019 (<https://hvhindustrial.com/es/blog/principios-de-calentamiento-por-inducci%C3%B3n>)

La ley de Lenz, enunciada por Lenz (1834), establece que "la corriente inducida en una bobina cerrada es siempre de tal dirección que se opone al cambio del campo magnético que la

produce". (p. 608-612) La bobina de inducción tiene diversas aplicaciones prácticas, como generadores eléctricos, transformadores y motores eléctricos, debido a su capacidad para convertir energía mecánica en energía eléctrica y viceversa (Alexander & Sadiku, 2006).

4.2 Principio de la bobina de inducción

El principio de la bobina de inducción es un fenómeno electromagnético fundamental en el cual se produce una corriente eléctrica en una bobina cuando un campo magnético variable la atraviesa. Este principio se basa en las leyes de Faraday y Lenz, que describen cómo la variación del flujo magnético induce una corriente eléctrica en el circuito.

En la Figura 2, se muestra un ejemplo de una bobina plana de inducción comercial. Esta bobina está diseñada para producir un campo magnético intenso y uniforme en su superficie, lo que permite calentar de manera uniforme y controlada el material colocado sobre ella.

Figura 2

Bobina Plana de Inducción



Nota: Ejemplo de una bobina plana de inducción convencional. Reproducido de *Fundamentos e implementación del calentamiento por inducción electromagnética aplicado en cocinas residenciales*. (p.26), por M. J. GIL, 2014, Universidad Católica de Cuenca.

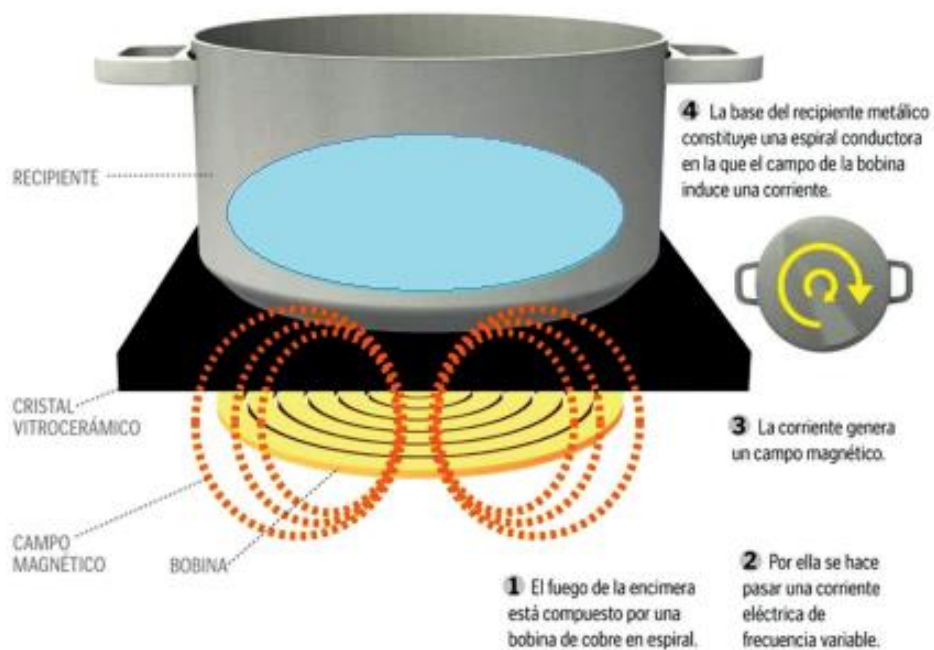
4.3 Campo magnético en la bobina de inducción.

Para comprender como actúa el campo magnético sobre las bobinas planas de inducción es necesario entender cómo funcionan las cocinas de inducción, Tama (2009) indica que:

En esencia la cocina de inducción es un tipo de cocina vitro cerámica, cuyo elemento principal ubicado debajo de la zona de cocción, es una bobina plana de cobre y con forma de espiral. Debido a que el recipiente se asienta en la zona de cocción las corrientes inducidas y el calor generado por el campo magnético producido será el mismo en toda la región y solo se disipa en la base del recipiente, debido a que los campos magnéticos no actúan sobre los materiales vitro cerámicos. (p. 9) Esto se puede observar en la Figura 3.

Figura 3

Distribución del campo magnético.



Nota: La imagen describe a detalle los elementos que intervienen en el campo magnético presente en un sistema de inducción. *Adaptada de Cocina de Inducción Versus Cocina a Gas (GLP).* (p.10), por A. Tama, 2009, Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo.

Para que el campo magnético actúe requiere de la presencia de un conductor eléctrico, por lo tanto, los recipientes utilizados durante el proceso de calentamiento por inducción deben estar constituidos por materiales metálicos que cumplan con las propiedades adecuadas de conductividad eléctrica. Esto permitirá que circulen las corrientes inducidas debido a que la resistencia eléctrica será menor.

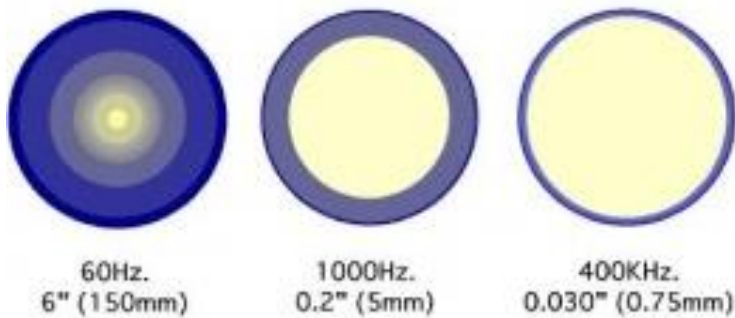
Por la presencia de estas corrientes inducidas; y debido a la frecuencia que se está utilizando, se disipa energía en forma de calor por el efecto Joule, de manera elevada y rápida. Este principio detallado anteriormente se llama inducción magnética. (Tama, 2009, p.10)

4.4 Efecto piel

La corriente alterna al fluir a través de un material eléctricamente conductor presenta la peculiaridad de que a mayor densidad se concentra o tiene una mayor intensidad en la superficie de un material, siendo esta concentración más intensa a medida que aumenta la frecuencia de esa corriente, este fenómeno es conocido como efecto piel. (Martínez Ledesma, 2013, p. 12) La Figura 4 muestra visualmente este comportamiento, esto indica que el efecto piel se produce cuando el campo electromagnético induce una corriente sobre la carga, siendo la concentración de corriente directamente proporcional a su frecuencia.

Figura 4

Concentración de las corrientes parasitas



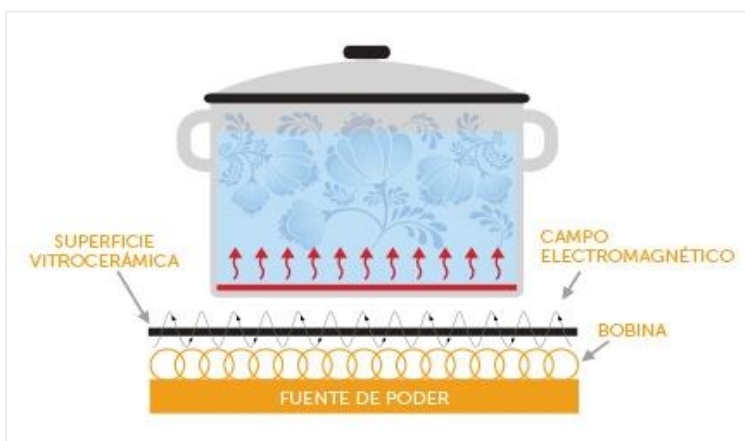
Nota: Representación del efecto piel en altas y bajas frecuencias. Reproducido de *Desarrollo de un inversor resonante para calentamiento por Inducción electromagnética*. (p. 12), por J. Martínez Ledesma, 2013, Instituto Politécnico Nacional.

4.5 Principio de la Cocina de Inducción

El principio de la cocina de inducción está basado en el calentamiento por inducción, el cual consiste en generar un campo magnético mediante la corriente que pasa por la bobina interna de cobre de la cocina (Furlan García, 2017) esto se puede observar en la Figura 5.

Figura 5

Funcionamiento de la Cocina de Inducción



Nota: Se observa una olla expuesta a una placa de inducción, la corriente corre a través de las bobinas generando un campo magnético que atraviesa la superficie vitrocerámica de la hornilla y se concentra directamente en el interior de la olla. Reproducido de *Cómo funcionan las cocinas de inducción*, por Click Seguridad, 2022 (<https://clickseguridad.es/como-funcionan-las-cocinas-de-induccion/>)

La intensidad del calor en una olla de inducción dependerá significativamente de la resistencia térmica del material del que está fabricada, HVH Industrial Solutions (1994) sugiere que “para desarrollar el calor, la resistencia del material debe ser baja y la tensión debe ser alta, es así como, los metales de alta resistencia, como el hierro, se calentarán mucho más rápido que los de baja resistencia.”

4.6 Características de las ollas de inducción

Según Furlan García (2017) las cocinas de inducción solo funcionan con aleaciones de hierro o el acero inoxidable, por lo tanto, las ollas deben tener una base de material magnético de estos dos tipos.

Permitiendo así concentrar las líneas de campo magnético con facilidad, y acumularlo como densidad de flujo magnético, el mismo que al circular por la base de olla produce una variación en la temperatura originando calor. (p. 16), esto se puede observar en la Figura 6.

Figura 6

Representación de la olla de inducción con cocina de inducción.



Nota: Densidad de flujo magnético en la base de la olla adecuada para el calentamiento por inducción magnética. Reproducido de *Metodología de Medición de la Eficiencia Energética en Cocinas de Inducción para el Ecuador*. (p.17), por L. A. FURLAN, 2017, Escuela Politécnica Nacional.

V MARCO METODOLÓGICO

Este estudio se desarrollará mediante en una metodología experimental y computacional, utilizando las herramientas de simulación y programación que proporcionan FEMM y MATLAB.

El diseño geométrico de las dos bobinas planas de calentamiento por inducción dispone de dos escenarios para cada una; el primero contiene la bobina plana de calentamiento sola, mientras que en el segundo escenario se dispone de la bobina con la olla, es decir, de la bobina con carga, en ambos escenarios FEMM entregará una resistencia de aproximación, la cual será exportada por Matlab para realizar la diferencia entre ambos resultados obtenidos, este resultado equivale a la resistencia que recae sobre la olla o resistencia de inducción.

Para graficar la geometría de las bobinas planas de calentamiento de 140 mm, y 208 mm de diámetro; se ha considerado hacer un corte transversal en el diámetro de la bobina y de esta vista se ha dibujado únicamente el radio de la bobina.

Las propiedades de diseño se han establecido conforme algunos parámetros físicos, eléctricos y magnéticos y los materiales de los que las componen, así también se simuló mediante un conjunto de curvas el boundary o condiciones de frontera que delimitará el campo magnético.

El Manual de usuario del software Meeker (2015) indica que: “para usar el preprocesador este debe estar en cualquiera de sus cinco modos de trabajo que son: nodo o punto, segmento de línea, segmento de arco, etiqueta de bloque y grupo” (p.16) Estos íconos se encuentran en la barra de herramientas de la ventana principal de trabajo del FEMM, tal como se muestran en la Figura 7.

Figura 7

Botones del modo de trabajo de la barra de herramientas



Nota: De izquierda a derecha se encuentran los botones corresponden a las herramientas punto, línea, arco, bloque y grupo.

De la misma forma el manual indica las herramientas que se deben usar para la construcción de las figuras y el entorno de trabajo de los problemas.

Primero establecer los puntos en donde se ubicarán las esquinas usando la herramienta nodos, para establecer los límites de la interfaz se seleccionarán los segmentos o segmentos de arco, adicional se debe definir las condiciones de contorno o boundary para los bordes exteriores de la geometría y finalmente las etiquetas de bloque denotan qué propiedades de material y tamaño de malla están asociadas a cada región de solución.(Meeker, 2015, p.16)

5.1 Diseño geométrico del problema para la bobina plana de calentamiento por inducción de 140 mm de diámetro externo

Como se indicó anteriormente para el análisis de cada bobina será necesario diseñar la bobina sin carga y con carga, el procedimiento se describe a continuación:

5.1.1 Diseño de la geometría de la bobina plana de calentamiento por inducción de 140 mm de diámetro externo sin carga.

Esta se divide en dos secciones, construcción del bloque bobina y construcción del boundary o contorno.

5.1.1.1 Construcción y parametrización del bloque bobina

Para empezar, se grafica un bloque que simulará la bobina de radio interno 22 mm y 104 mm de radio externo, el centro de la bobina estará en el eje (0,0), desde este punto hacia la derecha se ubicarán cuatro puntos diferentes en (22,0); (22,2); (70,0) y (70,2), para posteriormente unirlos con la herramienta segmento de línea, como se indica en la Figura 8.

Figura 8

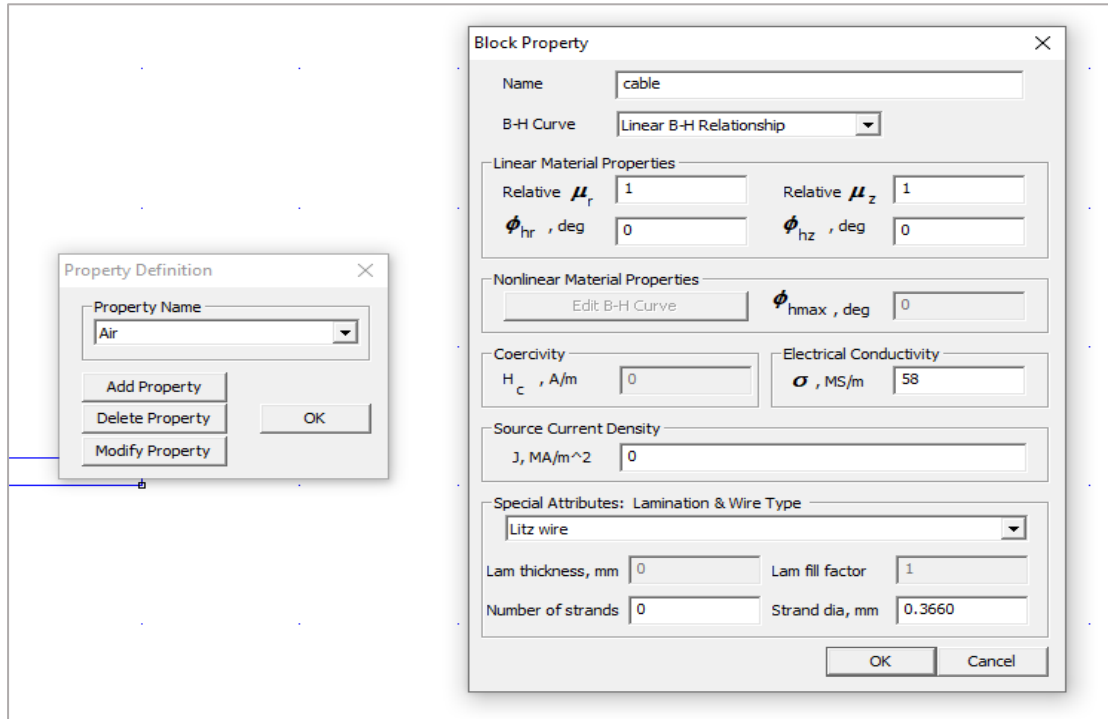
Gráfica del bloque bobina de 140 mm de radio externo



En la Figura 9 se crea el cable y se parametrizan las propiedades este material del cual está construido el bloque bobina, mediante las siguientes instrucciones: *Properties/ Materials/ Property/ Add Property/*, se despliega el cuadro de diálogo denominado “*Block Property*”, aquí se definen parámetros como la conductividad del cable la cual será de 58 MS/m, la densidad de carga que para este caso es nula, el tipo de cable el cual para este caso es multihilo trenzado y el diámetro inicial que corresponde a 0.1 mm en un hilo, el radio de cada hilo que es de 0.3606 y el número de hilos del conductor siendo para esta bobina 22 hilos.

Figura 9

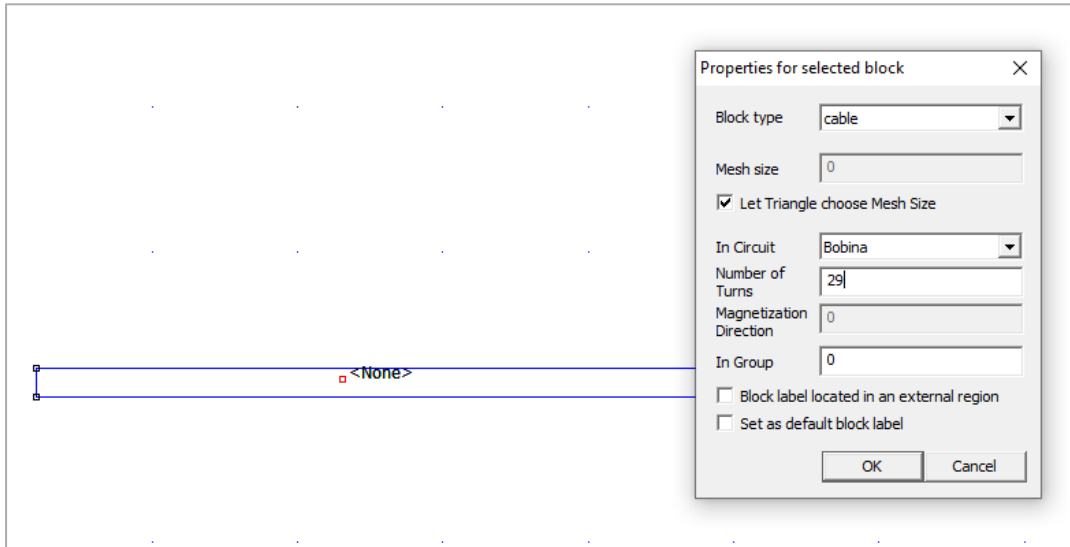
Creación y configuración del material denominado cable.



Seleccionar con el mouse el ícono verde en la barra de herramientas, la herramienta *etiqueta de bloque*, dar clic derecho dentro del bloque dibujado para agregar la etiqueta y luego clic izquierdo para seleccionar el punto, seguido presionar la barra espaciadora para establecer ciertos parámetros en la ventana *Properties for selected block*, en tipo de bloque seleccionar cable, en circuito seleccionar bobina y en número de vueltas colocar 29, presionar OK para guardar los cambios, como se indica en la Figura 10, repetir lo mismo para agregar la etiqueta aire al exterior del bloque bobina.

Figura 10

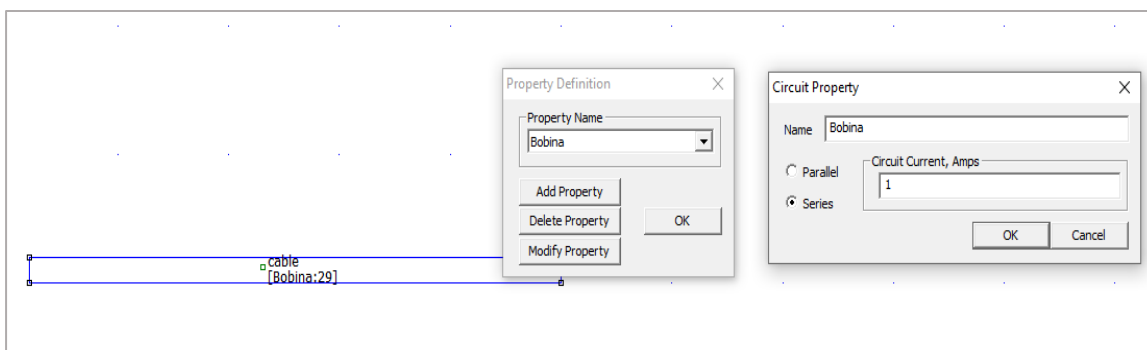
Asignación de la etiqueta cable y parametrización de propiedades del bloque bobina.



En la Figura 11 se indica el tipo de circuito y la corriente del bloque bobina, *Property/Circuito/Bobina/Modify Property/*, seleccionar la opción Circuito en serie y establecer una corriente de 1 A.

Figura 11

Propiedades del circuito de la bobina.

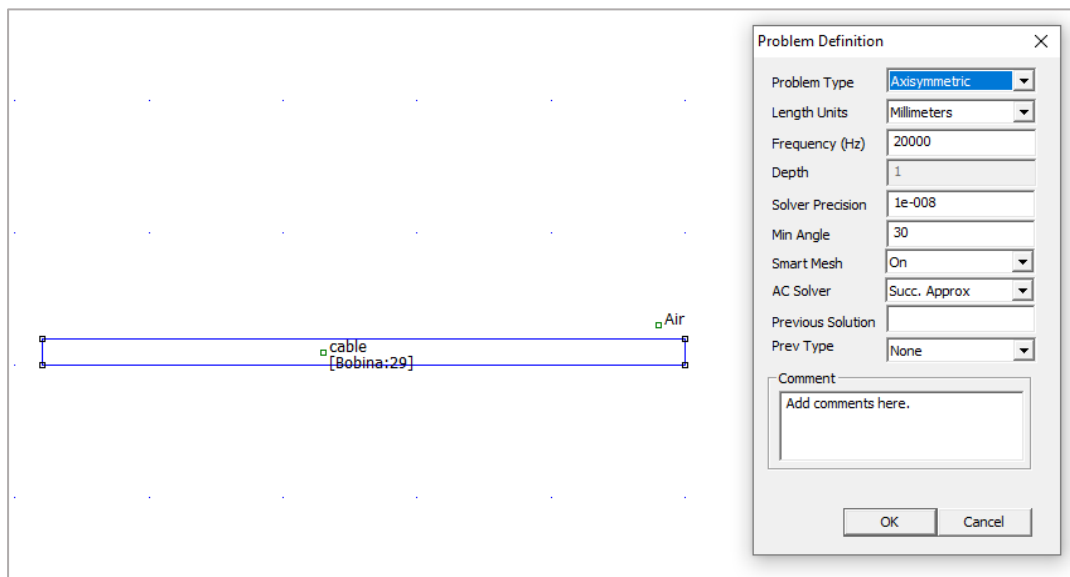


Al hacer clic en la opción *Problem* se despliega un cuadro de diálogo llamado *Problem Definition*, el cual contiene la definición del problema, aquí se indicará al programa el tipo de problema, las unidades de longitud y la frecuencia del problema a resolver.

Para este caso en específico se define un tipo de problema axisimétrico, unidades de longitud en milímetros y una frecuencia de 20000Hz como se indica en la Figura 12.

Figura 12

Descripción del problema de la bobina plana sin carga



Al definir que nuestro problema es de tipo axisimétrico, no se requiere especificar la profundidad, si el problema hubiera sido del tipo planar esta opción se habría habilitado.

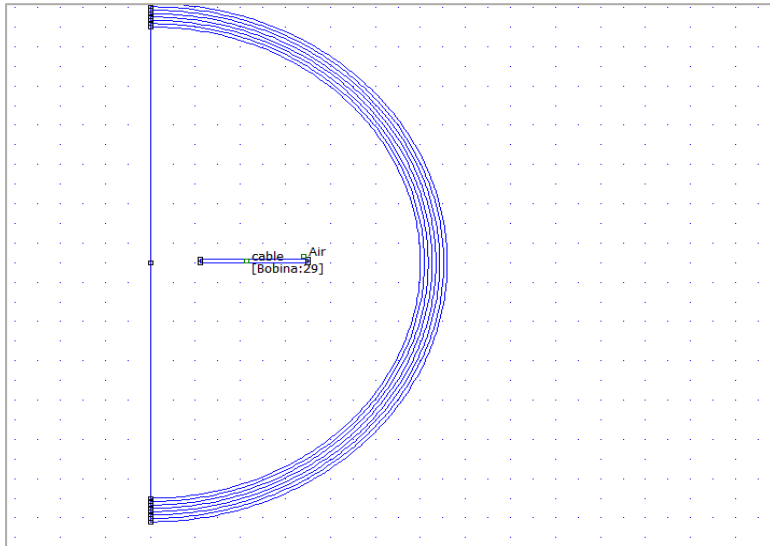
5.1.1.2 Construcción del boundary y parametrización de las condiciones de frontera.

Para crear el boundary se ubicó un punto en el origen P0 (0,0) y otro en P1(0,120) a partir de este ubicar siete puntos más hacia arriba hasta P8(0,132) a una distancia aproximada de 2 mm entre ellos, unir con la herramienta segmento de línea todos los puntos en el eje z, repetir lo mismo

hacia $-z$ empezando por $-P1(0,-120)$ hasta $-P8(0,-132)$, finalmente unir $P1$ con $-P1$ con un segmento de arco, repetir esta acción con cada punto hasta unir $P8$ con $-P8$. La geometría del contorno se observa en la Figura 13.

Figura 13

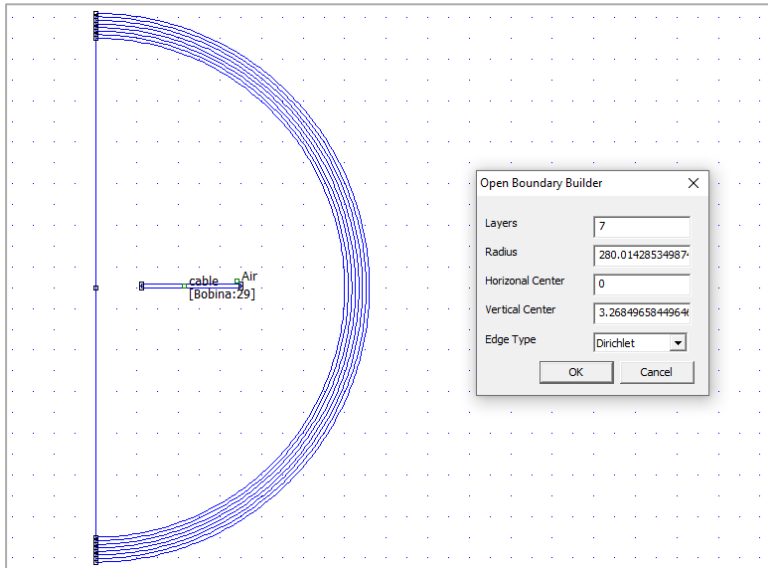
Construcción de la geometría del boundary al rededor del bloque bobina.



En la barra de tareas seleccionar *Edit/ Create Open Boundary/* para establecer los parámetros del contorno, para el desarrollo del problema se trabajará con los valores establecidos por default: número de capas: 7, radio: 280.01, centro horizontal: 0, centro vertical: 3.268, tipo de borde: Dirichlet, los cuales se observan en la Figura 14.

Figura 14

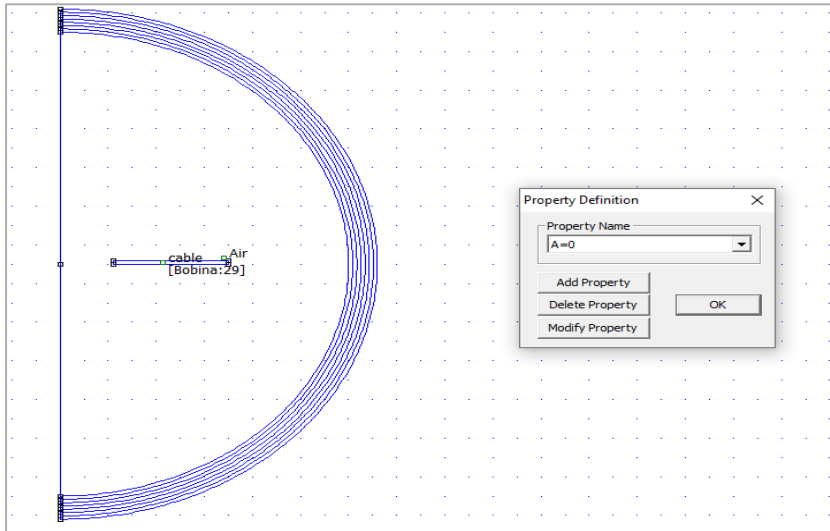
Parametrización de las propiedades del contorno.



En la barra de tareas seleccionar *Properties/ Boundary/ Property Name/*, en esta ventana se indica el potencial A que se establece en el límite, para el cual la aplicación más común es asignar que $A=0$ como se indica en la Figura 15 para evitar que el flujo magnético sobrepase el límite establecido por las capas.

Figura 15

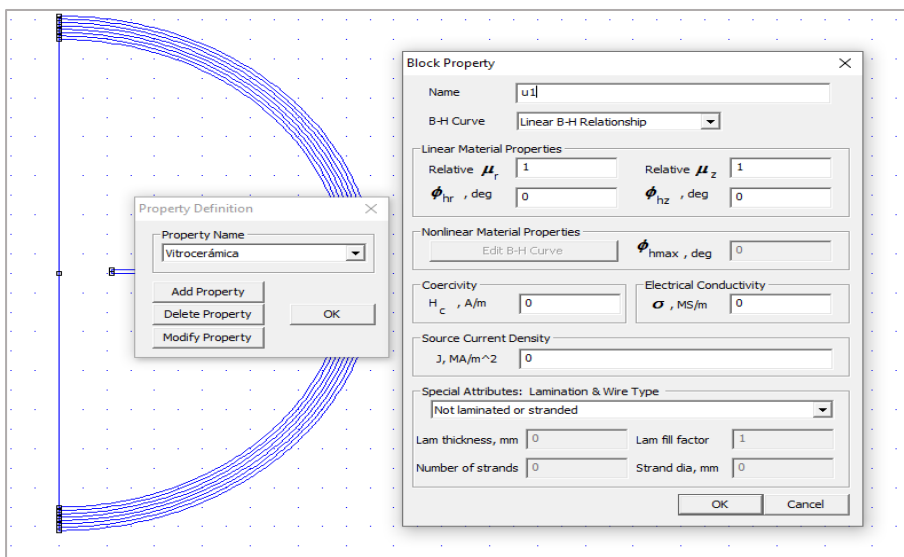
Parametrización del potencial A del contorno.



En la Figura 16 se observa la ventana de creación y configuración del material que se le asignará a cada capa del boundary, en este caso se les llamará u1, u2, u3, u4, u5, u6 y u7, dirigirse a *Properties/ Materials/ Add property/Name*.

Figura 16

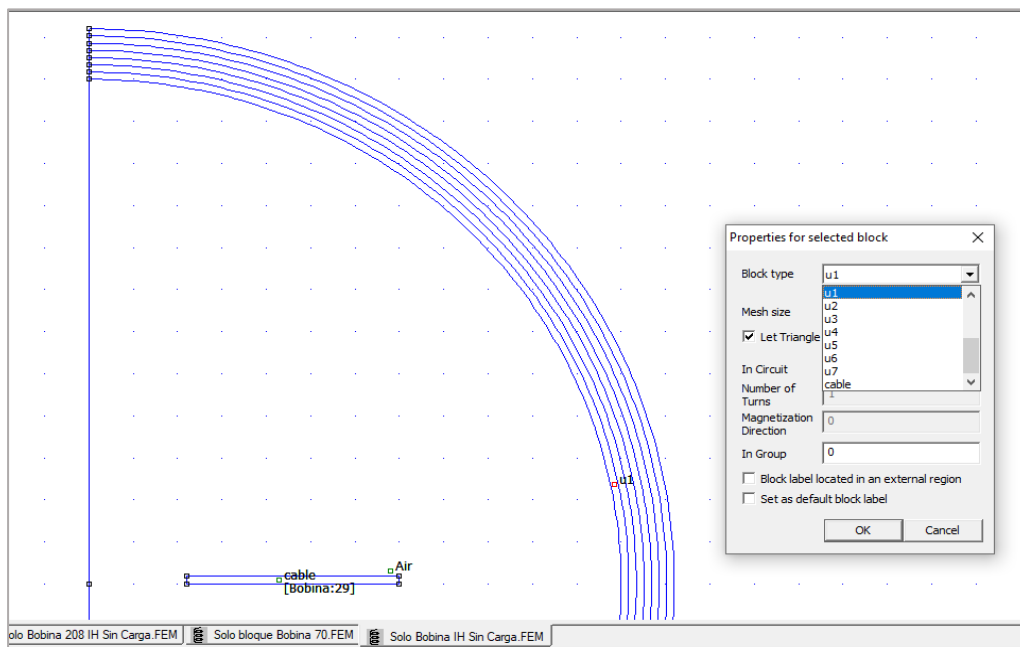
Creación y parametrización del material llamado u1



Una vez añadidos los siete materiales se asigna uno a cada capa del contorno de adentro hacia afuera, se selecciona la herramienta *etiqueta de bloque*, y se ubica sobre el primer espacio curvo vacío un punto, luego presionar la barra espaciadora y en la ventana flotante asignar la etiqueta del material correspondiente, en la Figura 17 se presenta este proceso paso a paso para la primera capa.

Figura 17

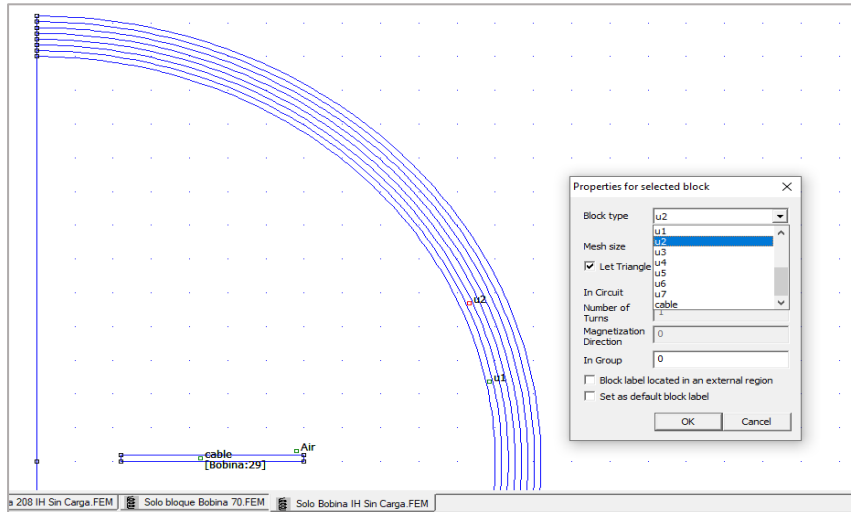
Asignación del material llamado u1 en el contorno de la bobina



De la misma forma en la Figura 18 se detalla la asignación del material u2 para la segunda capa de la bobina. Este procedimiento se repetirá en todas capas que conforman el contorno, hasta la capa u7.

Figura 18

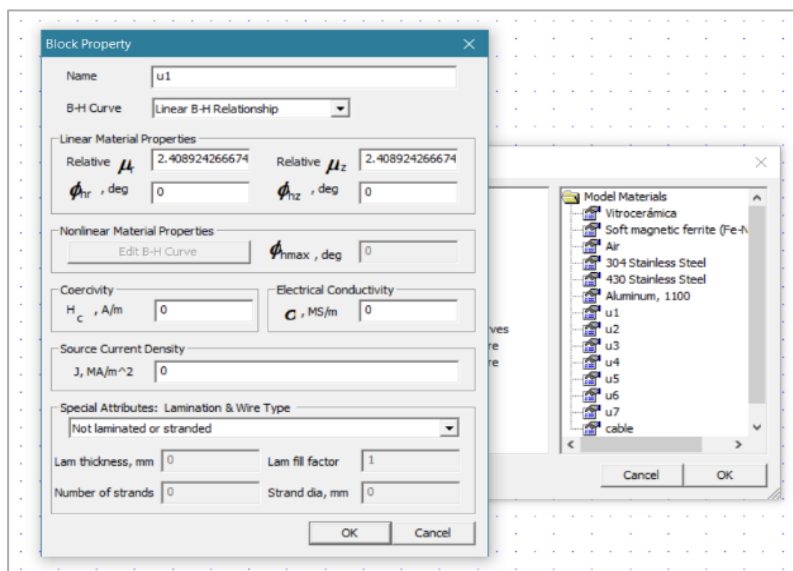
Asignación del material llamado u2 en el contorno de la bobina



En las Figura 19 se establecen las propiedades para μ_r y μ_z para el material u1. Estas propiedades permitirán variar la magnitud de cada una de las capas que conforman el contorno. Para esto dirigirse a *Properties/ Materials/ Add property/ Block property*

Figura 19

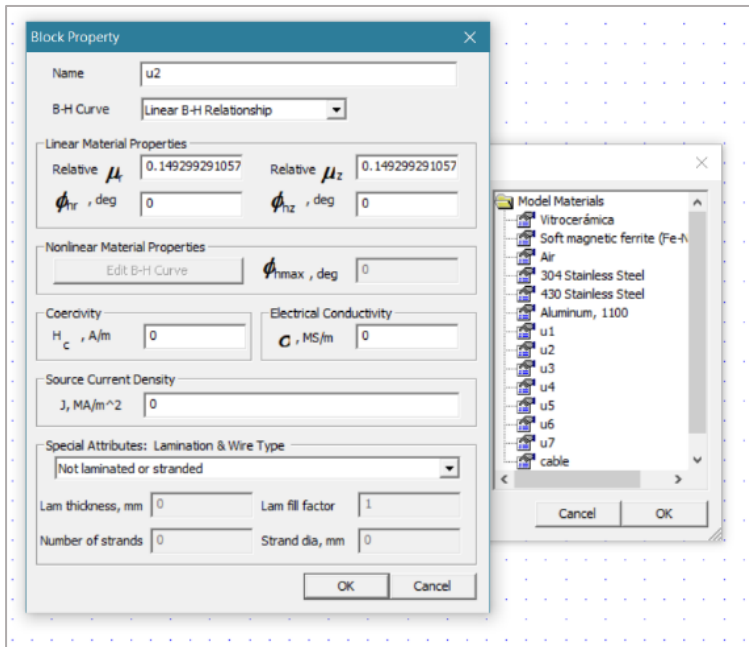
Parametrización del bloque de materiales del material llamado u1



En las Figura 20 se establecen las propiedades para μ_r y μ_z respecto al material u2 que corresponde a la segunda capa del contorno.

Figura 20

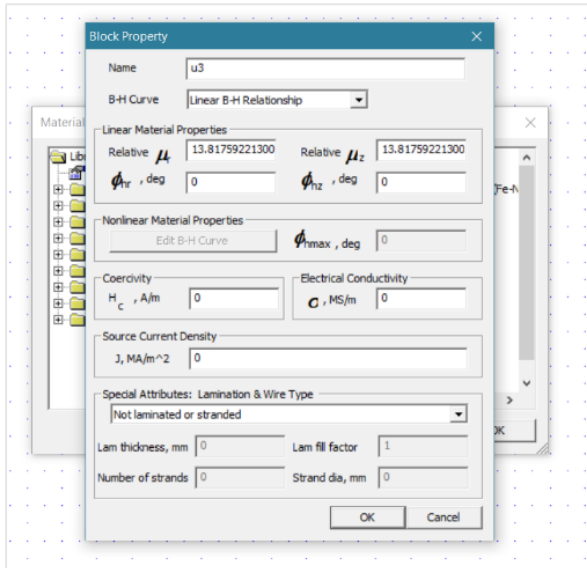
Parametrización del bloque de materiales del material llamado u2



De la misma forma en la Figura 21, se observa la parametrización de las propiedades del material u3 el cual corresponde a la tercera capa del contorno.

Figura 21

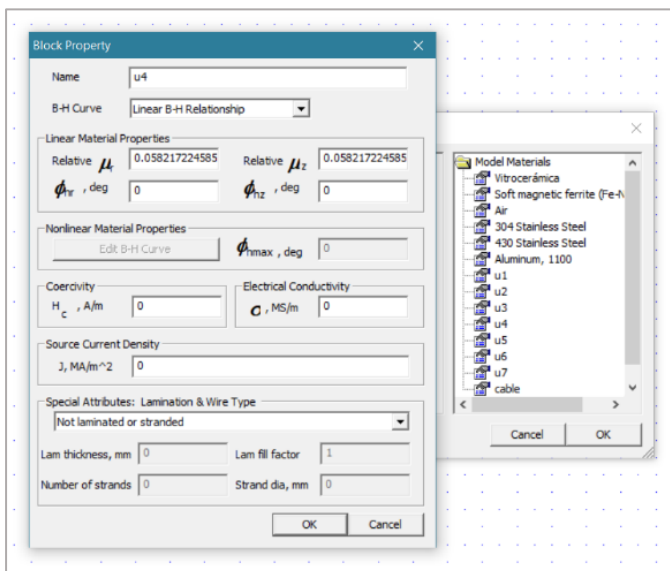
Parametrización del bloque de materiales del material llamado u3



Se observa en la Figura 22 la parametrización de las propiedades para el material u4, el cual corresponde a la cuarta capa del contorno.

Figura 22

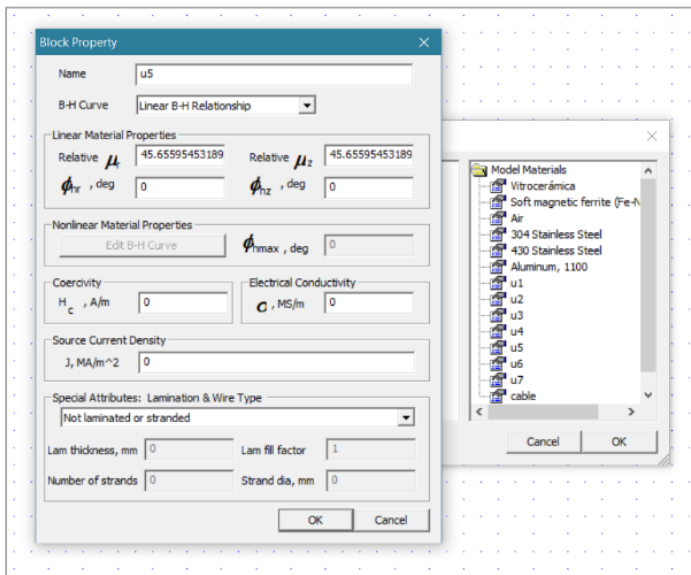
Parametrización del bloque de materiales del material llamado u4



En la Figura 23 se visualizan los parámetros definidos para el material de la quinta capa de contorno determinada previamente como u5.

Figura 23

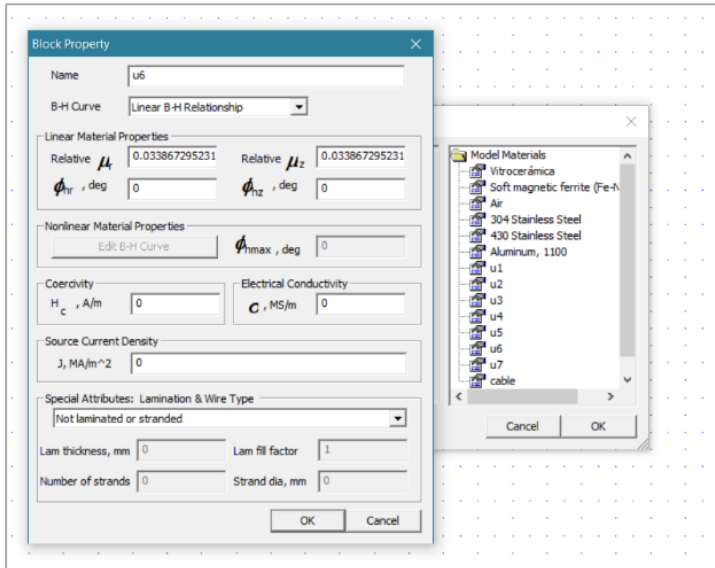
Parametrización del bloque de materiales del material llamado u5



En la Figura 24, se parametrizan las propiedades del material u6 que pertenece a la sexta capa del contorno.

Figura 24

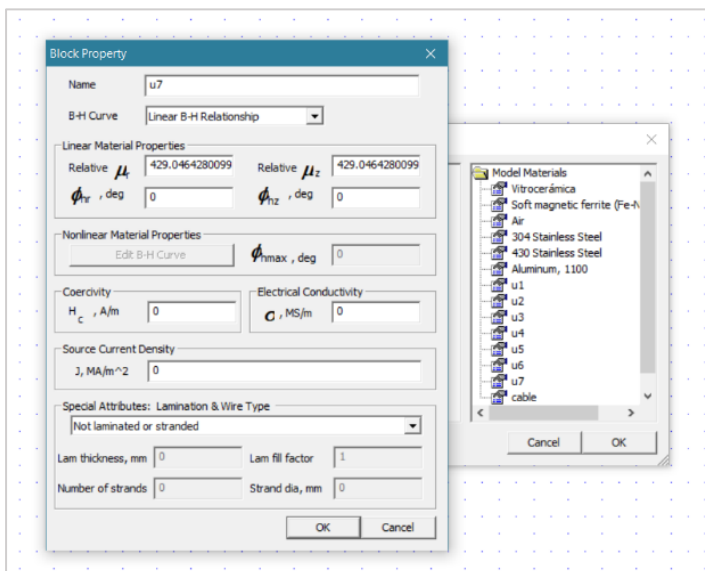
Parametrización del bloque de materiales del material llamado u6



Finalmente, en la Figura 25 se parametrizan las propiedades para el bloque u7 que corresponden a la séptima y última capa del contorno.

Figura 25

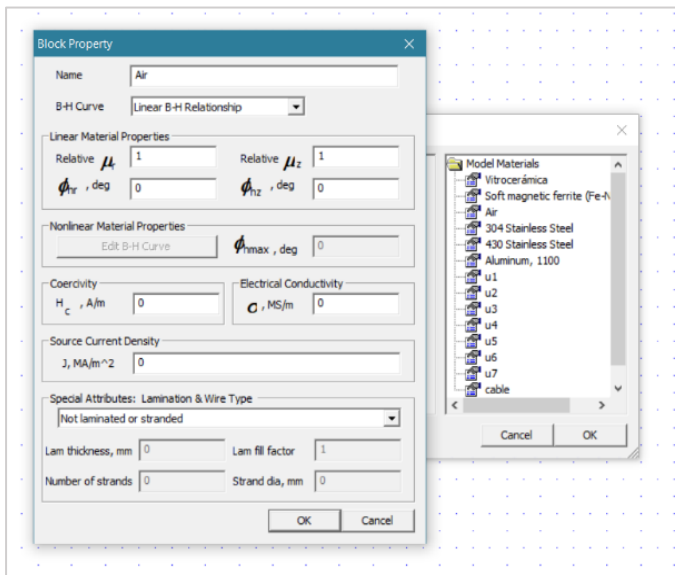
Parametrización del bloque de materiales del material llamado u7



En la Figura 26 se aprecia la parametrización de las propiedades de los materiales que se asignarán en la zona exterior de la bobina.

Figura 26

Parametrización de la etiqueta del material llamado aire



5.1.2 Diseño de la geometría de la bobina plana de calentamiento por inducción de 140 mm de diámetro externo con carga.

A continuación, se detallará el diseño la bobina plana de calentamiento con carga partiendo de la geometría de la bobina plana de calentamiento sin carga realizado anteriormente, por lo que se recomienda guardar el mismo archivo con un nuevo nombre para continuar el diseño desde esta plantilla.

Para este caso es indispensable tener en cuenta que para que exista el calentamiento por inducción entre la bobina y la carga, es necesario que la carga cuente con los materiales correctos que permitan el efecto electromagnético de calentamiento, es por esto que para la geometría de

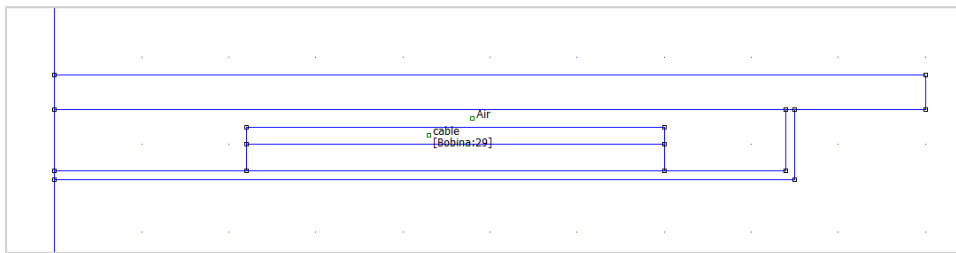
este problema no solo se ha definido el entorno interior y exterior de la bobina si no también el entorno de la carga.

5.1.2.1 Construcción del entorno interior y exterior de la bobina

Con respecto a la bobina se ha completado su estructura añadiendo secciones y bloques con el fin de definir el problema lo más parecido a una zona de una placa de inducción real, para esto se coloca primero los puntos que serán las aristas del gráfico y luego se une estos puntos con segmentos de línea, de la misma forma que se hizo para crear el bloque bobina, hasta obtener la estructura que se observa en la Figura 27.

Figura 27

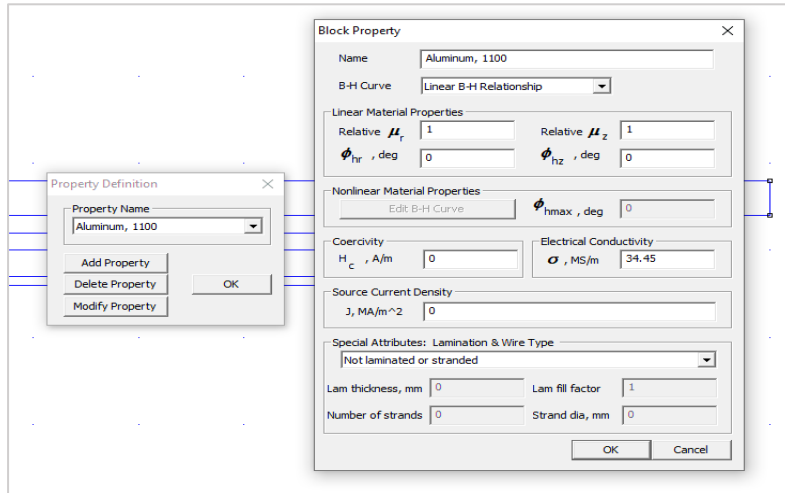
Geometría de la bobina para la hoja de trabajo bobina con carga.



Para completar el diseño del problema es necesario contar con los materiales definidos con sus respectivas propiedades siendo estos: aluminio 1100, ferrita magnética suave, bloque llamado bobina, aire y vitrocerámica para la bobina, y acero inoxidable 430, aluminio 1100 y acero inoxidable 304 para la carga, en la Figura 28 se observan las propiedades del material denominado Aluminio 1100 mediante la ventana *block property*.

Figura 28

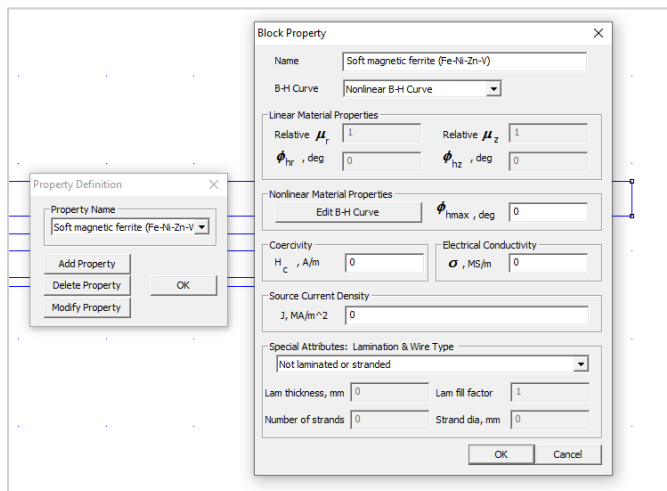
Parametrización de la etiqueta para el material denominado Aluminio 1100



En la Figura 29, se parametrizan las propiedades para el material denominado ferrita magnética suave.

Figura 29

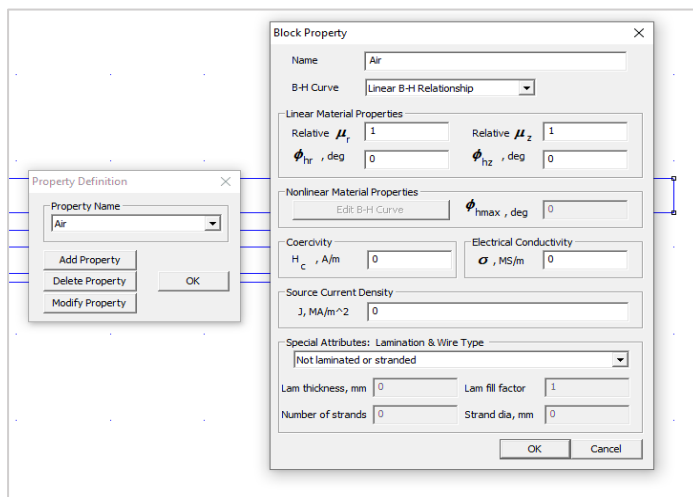
Parametrización de la etiqueta para el material denominado ferrita magnética suave



De la misma manera, mediante el bloque de propiedades se parametrizan las propiedades para el material denominado aire en la Figura 30.

Figura 30

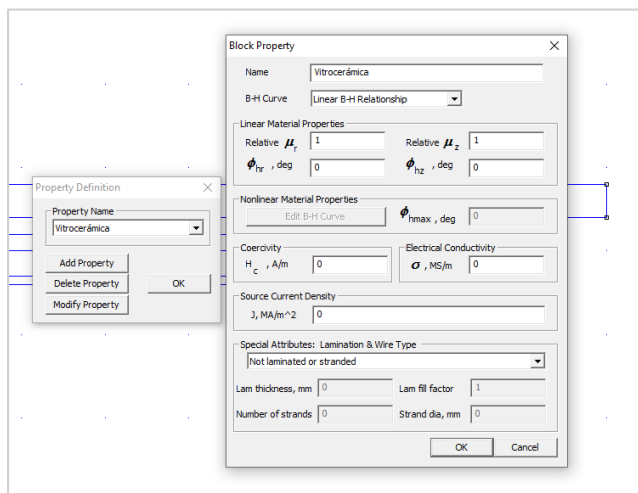
Parametrización de la etiqueta para el material denominado Aire



Como se indica en la Figura 31 se asignan los parámetros las propiedades para el material denominado vitrocerámica.

Figura 31

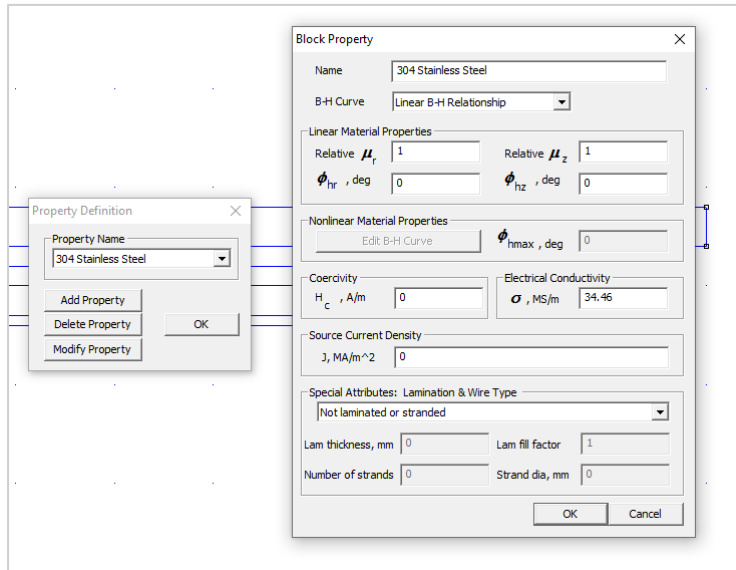
Parametrización de la etiqueta para el material denominado Vitrocerámica



En la Figura 32 se asignan las propiedades del material denominado Acero inoxidable 304.

Figura 32

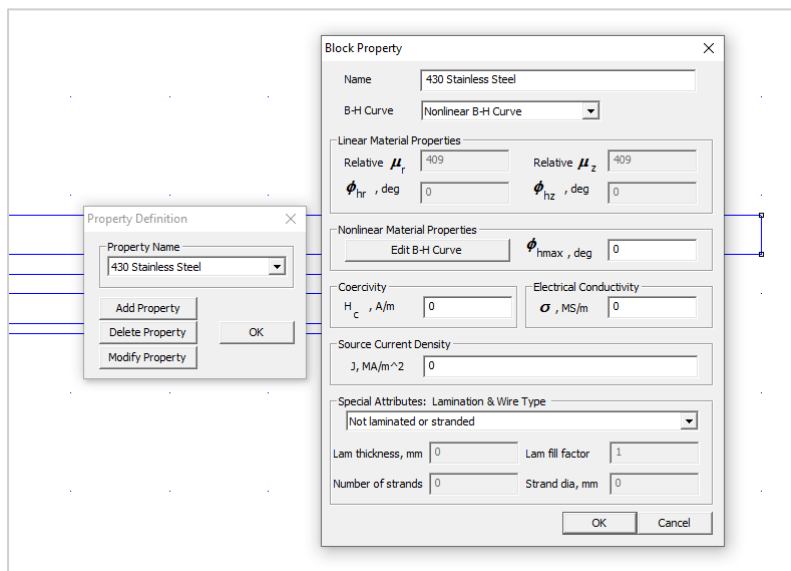
Parametrización de la etiqueta para el material denominado Acero inoxidable 304



Finalmente, en la Figura 33 se parametrizan las propiedades del material denominado Acero inoxidable 430.

Figura 33

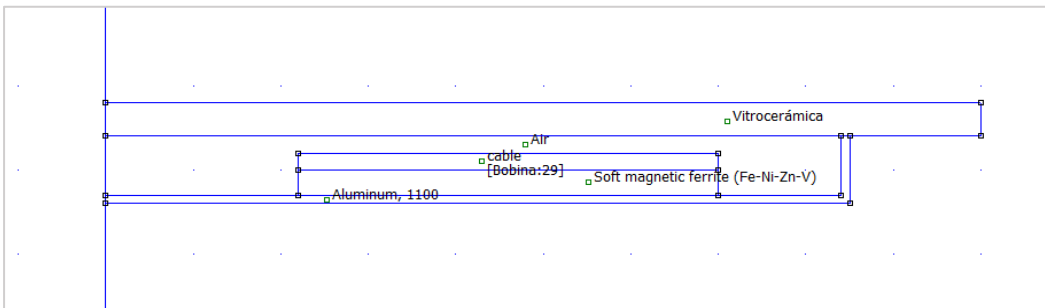
Parametrización de la etiqueta para el material denominado Acero inoxidable 430



En la Figura 34 se aprecian los materiales de los cuales está conformada la bobina, empezando por la base, aluminio 1100, sobre el aluminio se coloca un bloque de ferrita magnética suave, después el bloque llamado bobina, luego una capa de aire y finalmente la vitrocerámica que permitirá separar la bobina de la olla.

Figura 34

Geometría del bloque bobina para la bobina con carga

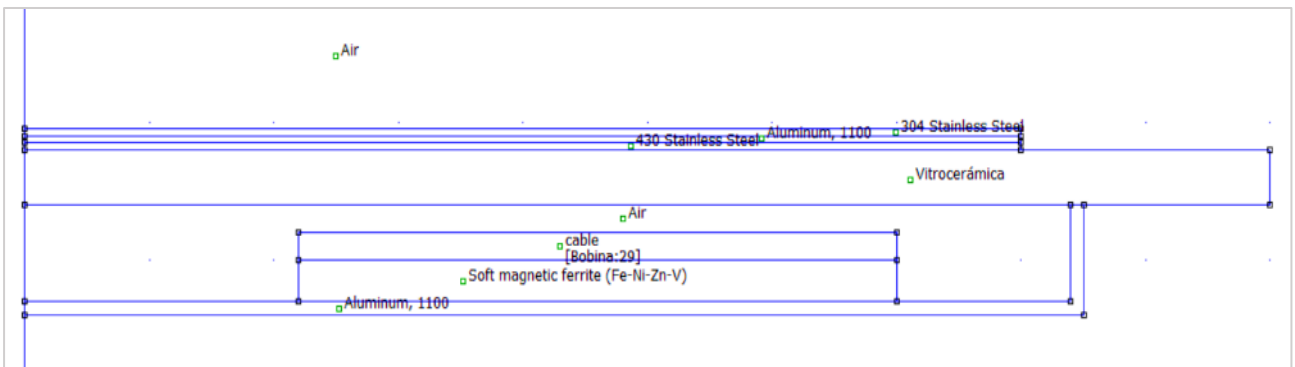


5.1.2.2 Construcción del entorno de la base magnética de la olla de inducción

En la Figura 35 se observan tres bloques dibujados sobre la vitrocerámica, estos bloques representan el fondo magnético de la olla a los cuales se le han asignado las etiquetas de los materiales acero inoxidable 430, aluminio 1100 y acero inoxidable 304 en las capas correspondientes, obteniendo así la plantilla de trabajo de la bobina con carga.

Figura 35

Geometría de la bobina de inducción con el fondo magnético de la olla.



5.2 Diseño geométrico del problema para la bobina plana de calentamiento por inducción de 208 mm de diámetro externo

Al igual que en la bobina de 140 mm de diámetro externo, también para la bobina de 208 mm de diámetro externo será necesario diseñar la bobina sin carga y con carga.

5.2.1 Diseño de la geometría de la bobina plana de calentamiento por inducción de 208 mm de diámetro externo sin carga.

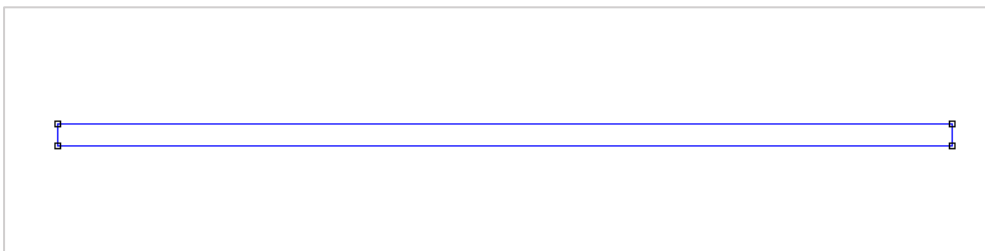
El procedimiento es el mismo que se plateó en el ítem 6.1.1 cambiando ciertos parámetros propios de la nueva bobina.

5.2.1.1 Construcción y configuración del bloque bobina

Se grafica un bloque que simulará la bobina de 24 mm de radio interno y 104 mm de radio externo, el centro de la bobina será el origen de coordenadas rz, se ubicarán cuatro puntos diferentes en las coordenadas (24,0); (24,2); (104,0) y (104,2) finalmente se debe unir los puntos con la herramienta segmento de línea, como se indica en la Figura 36.

Figura 36

Gráfica del radio del bloque bobina de 208 mm de diámetro externo.

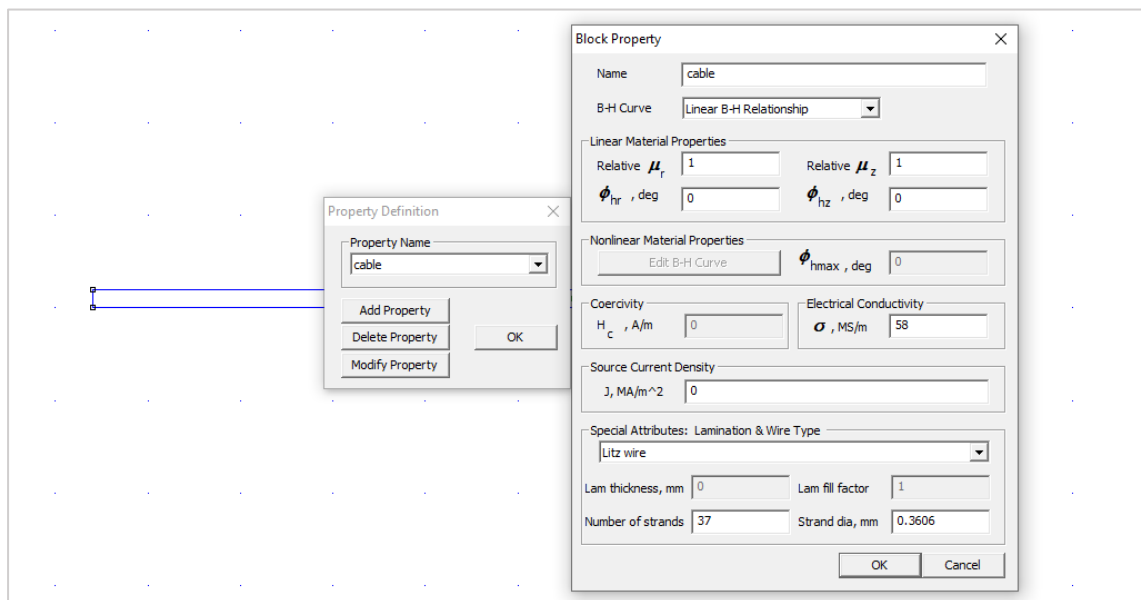


En la Figura 37 se crea y parametriza las propiedades del material del que está construido el bloque bobina, dirigirse a *Properties/ Materials/ Property/ Add Property/*, se despliega el cuadro de diálogo denominado “*Block Property*”, se definen los siguientes parámetros nombre:

cable, conductividad del cable: 58 MS/m, densidad de carga: nula, tipo de cable: multihilo trenzado, diámetro inicial: 0.1 mm en un hilo, diámetro de hilo: 0.3660 y número de hilos: 37.

Figura 37

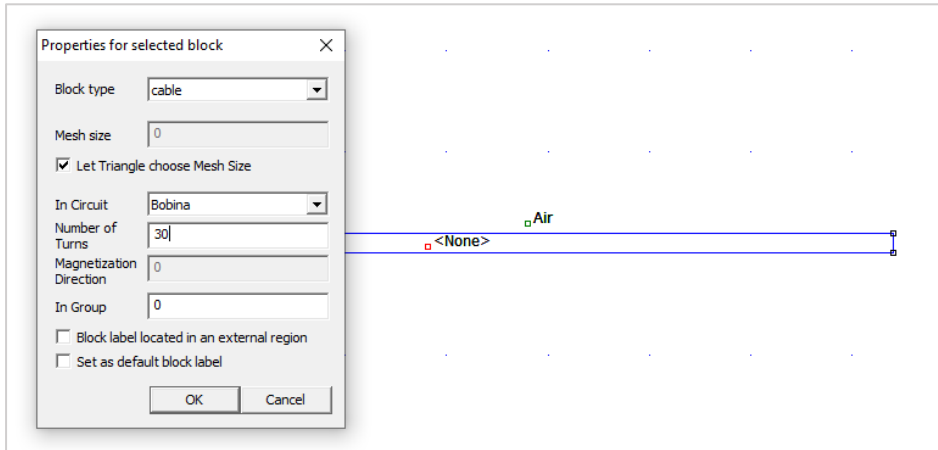
Creación y configuración del material denominado cable.



Seleccionar con el ratón el ícono de la herramienta etiqueta de bloque, dar clic derecho dentro del bloque dibujado para agregar la etiqueta y luego clic izquierdo para seleccionar el punto, seguido presionar la barra espaciadora para establecer ciertos parámetros en la ventana *Properties for selected block*, tipo de bloque: cable, circuito: bobina, número de vueltas: 30, presionar OK para guardar los cambios, como se indica en la Figura 38.

Figura 38

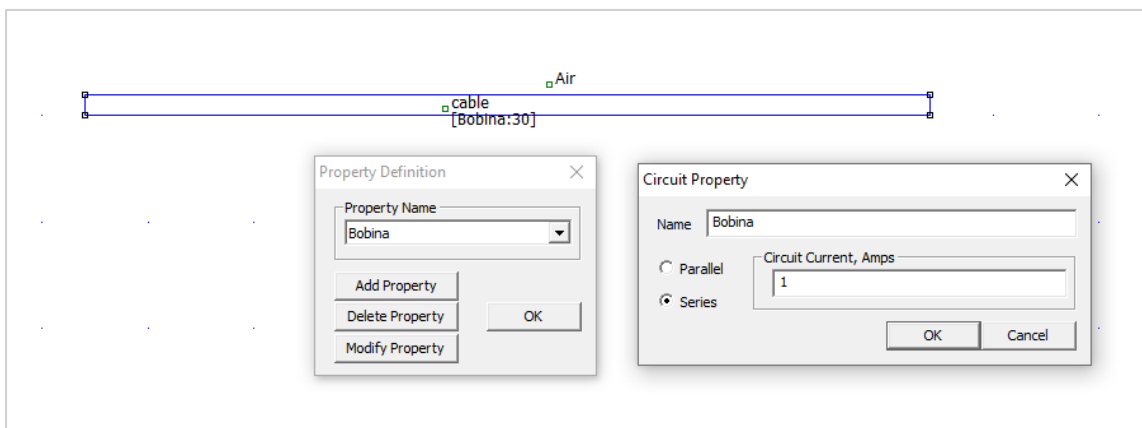
Asignación del material cable y configuración de propiedades del bloque.



En la Figura 39 se indica el tipo de circuito y la corriente del bloque bobina, *Property/Circuito/Bobina/Modify Property/*, seleccionar la opción Circuito en serie y establecer una corriente de 1 A.

Figura 39

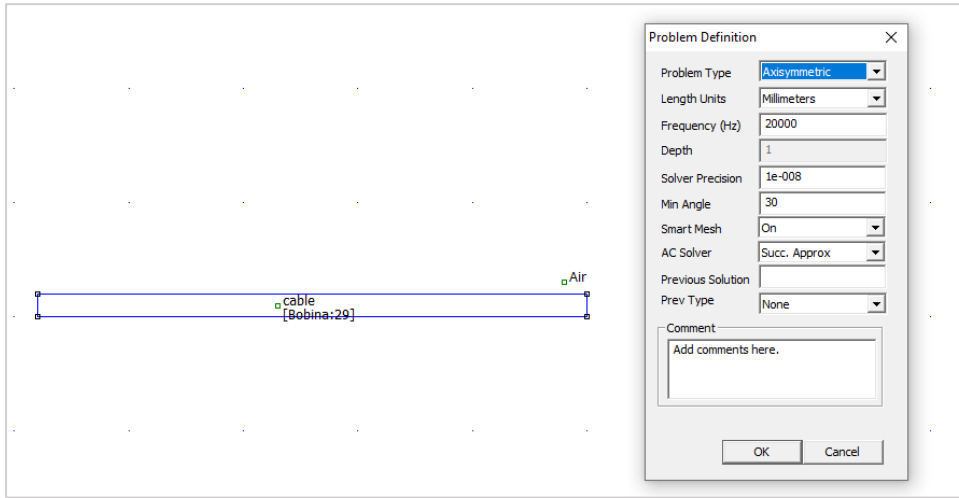
Propiedades del circuito de la bobina.



Al dar clic en la opción Problem se abre una ventana donde se establece los parámetros que definen el problema, *Problem Definition*, tipo de problema: axisimétrico, unidades de longitud: milímetros, frecuencia: 20 kHz, como se indica en la Figura 40.

Figura 36

Definición del problema de la bobina plana de inducción



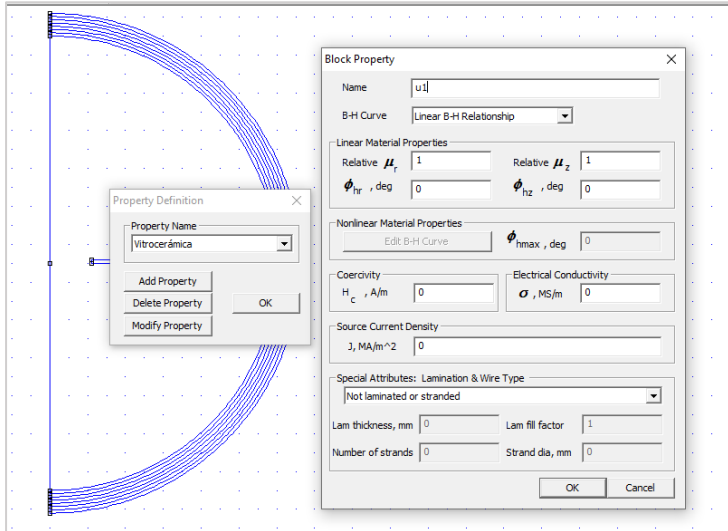
5.2.1.2 Construcción del boundary y configuración de las condiciones de frontera

Para construir la geometría del contorno se deben repetir los pasos del apartado 4.2.1.2, las condiciones de frontera se establecen en *Edit/ Create Open Boundary/*, conservar los parámetros del establecidos por default; mientras que para evitar que el flujo magnético sobrepase el límite establecido por las capas, en la ventana *Properties/ Boundary/ Property Name/* se debe asignar $A=0$.

De la misma forma que la bobina anterior el contorno está compuesto por siete capas de materiales u1, u2, u3, u4, u5, u6 y u7, para crear las etiquetas de cada material, dirigirse a *Properties/ Materials/ Add property/Name*. En la Figura 41 se muestra la creación de u1.

Figura 37

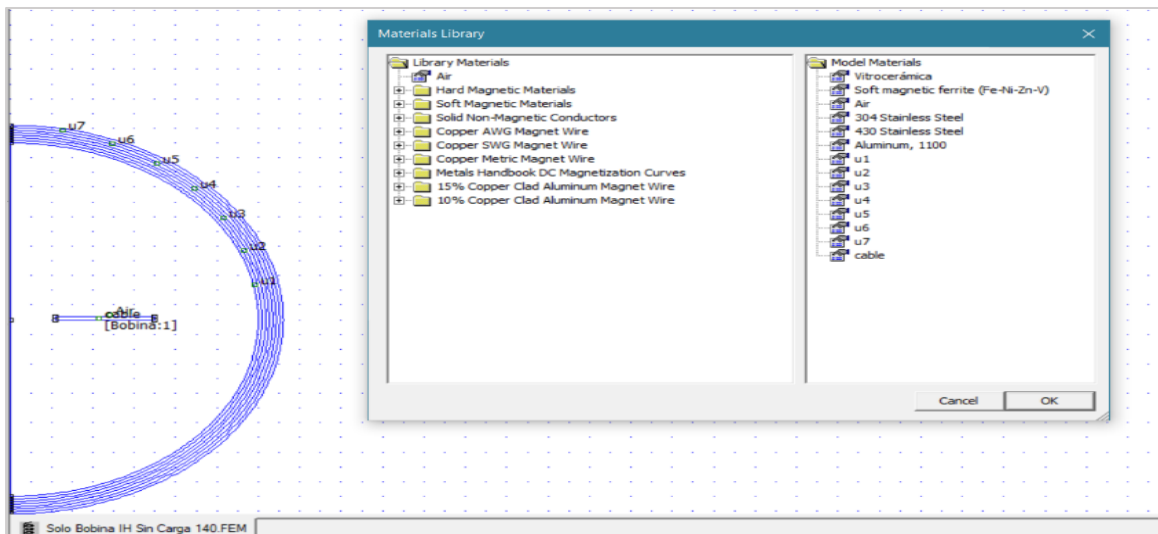
Creación y parametrización del material llamado u1



Una vez creados los siete materiales se asignan las etiquetas al bloque mediante la opción de *drag and drop* o *arrastrar y soltar*, en la Figura 42 se muestra un ejemplo de este proceso al asignar el material u7.

Figura 38

Asignación del material llamado u7 en el contorno de la bobina



De esta herramienta se podrá intercambiar las definiciones de las propiedades entre la biblioteca y el modelo, tener en cuenta que es posible importar información establecida en otras bibliotecas.

En *Properties/ Materials/ Add property/ Block property* se establecen las propiedades con los mismos parámetros que en la bobina 1 para μ_r y μ_z las cuales permitirán variar la magnitud de cada una de las capas que conforman el contorno.

5.2.2 Diseño de la geometría de la bobina plana de calentamiento por inducción de 208 mm con carga.

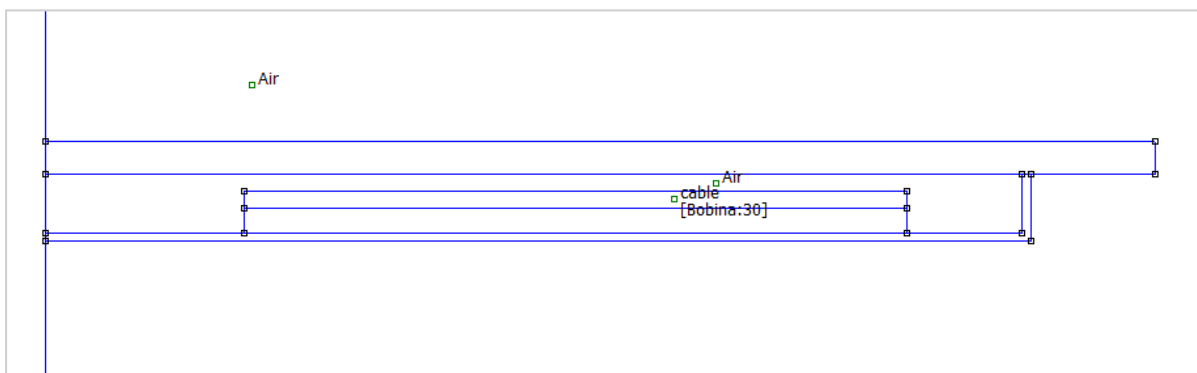
Se continúa el diseño de la bobina plana de calentamiento con carga, a partir de la geometría de la bobina plana de calentamiento sin carga, guardar el mismo archivo con un nuevo nombre y continuar graficando en esta nueva hoja de trabajo.

5.2.2.1 Construcción del entorno de la bobina

Al igual que en el apartado 4.2.2.1 completar el bloque hasta obtener la estructura que se observa en la Figura 43.

Figura 39

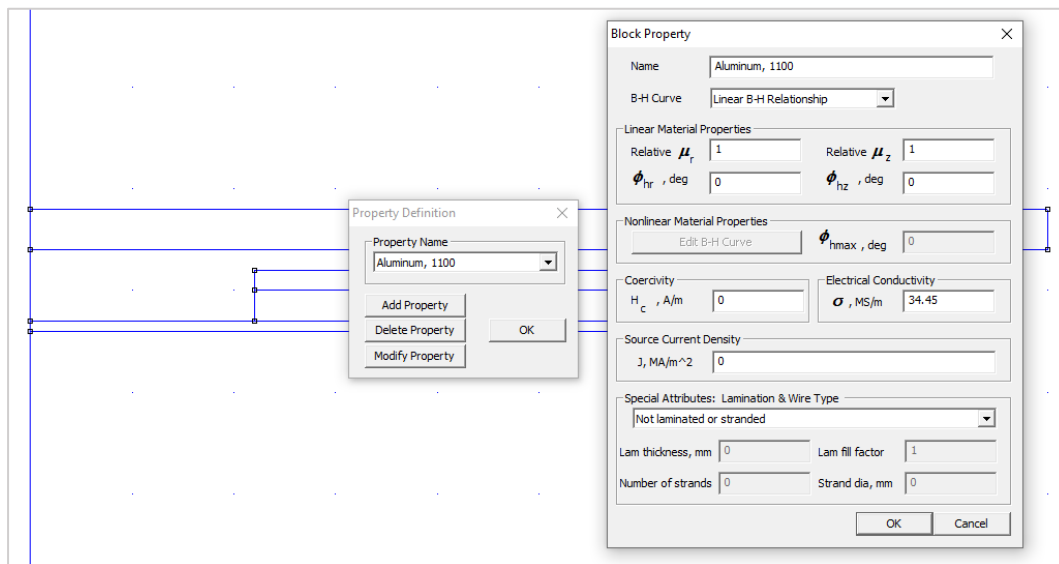
Estructura de la bobina para la plantilla bobina con carga.



Nuevamente crear las etiquetas de los materiales y parametrizarlos en *Properties/ Materials/ Add property/Name*, aluminio 1100, ferrita magnética suave, bloque llamado bobina, aire y vitrocerámica para la bobina, para la bobina; y acero inoxidable 430, aluminio 1100 y acero inoxidable 304 para la carga, se visualiza un ejemplo en la Figura 44.

Figura 40

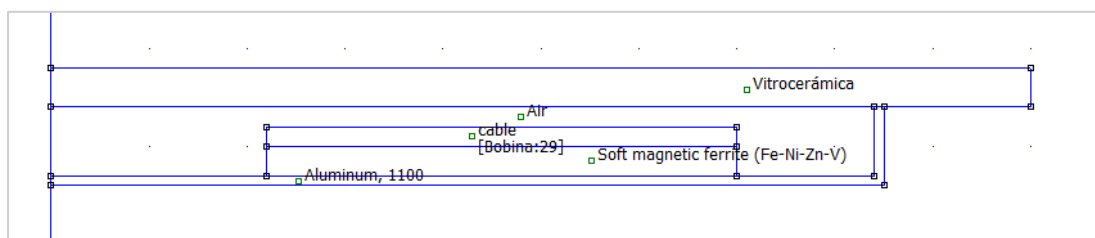
Configuración del bloque de materiales para el material denominado Aluminio 1100



En la Figura 45 se observa la disposición de los materiales de los cuales está conformada la bobina, que es exactamente igual a la bobina de 140 mm de diámetro externo.

Figura 45

Bloque bobina etiquetado con los materiales de cada capa.

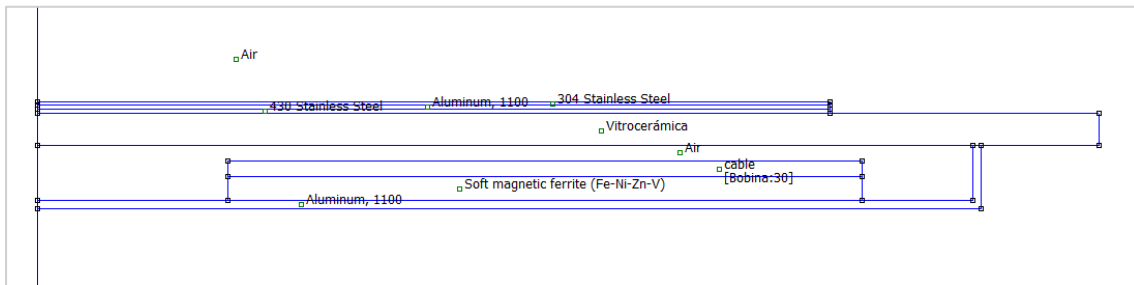


5.2.2.2 Construcción del entorno de la base magnética de la olla de inducción

En la Figura 46 se observan de tres bloques dibujados sobre la vitrocerámica, estos bloques representan el fondo magnético de la olla y a ellos se encuentran asignados los materiales acero inoxidable 430, aluminio 1100 y acero inoxidable 304.

Figura 46

Geometría de la bobina de inducción con el fondo magnético de la olla



5.2.3 Ejecución de la solución del problema

Para ejecutar la solución del problema se pasará por tres fases, preprocesamiento, procesamiento y post-procesamiento, que se ejecutan mediante botones ubicados en la barra de herramientas como se observan en la Figura 47.

Figura 47

Botones para efectuar la solución del problema.



Nota: El botón amarillo activa el preprocesamiento, el botón que se asemeja a una manivela inicia el procesamiento y el ícono de los anteojos ejecuta el post-procesamiento.

Primero presionar el botón amarillo para activar el generador de malla, la malla se carga en la memoria, e inicia así el preprocesamiento como se observa en la Figura 48.

Figura 48

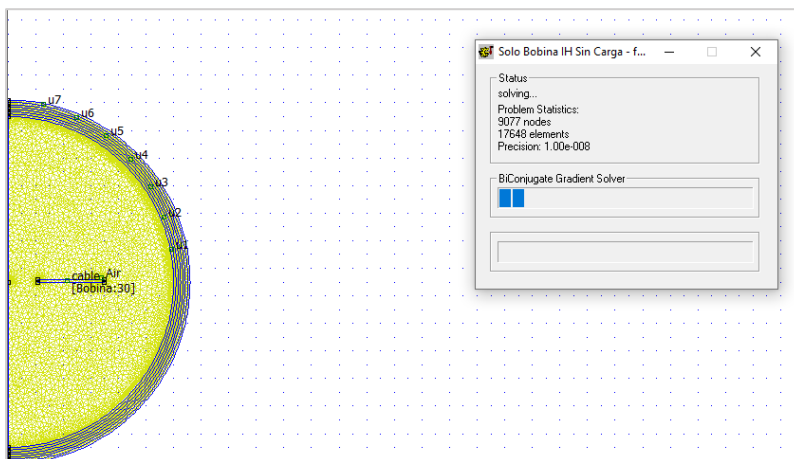
Malla generada en las bobinas con y sin carga



Culminada la creación de la malla se procede a ejecutar el solver o procesamiento, automáticamente se despliega una ventana flotante que brinda detalles acerca del estado del proceso como se observa en la Figura 49.

Figura 49

Malla generada en las bobinas con y sin carga



Finalmente ejecuta el botón de post-procesamiento, este nivel permite examinar los resultados en una nueva ventana, que proporciona herramientas de análisis en tres modos de operación diferente: modo de valores de punto, modo de contorno y modo de bloque, así también permite la visualización de curvas, cálculo de integrales y vista de parámetros nominales los íconos correspondientes se observan en la Figura 50.

Figura 50

Controles disponibles en la ventana de post-procesamiento



Nota: De izquierda a derecha los íconos son análisis en puntos, contorno y bloque; y visualización de curvas, medidas en bloques y medidas en superficies

Con el modo de valores de punto al hacer clic en diferentes puntos se observa en la ventana de salida de FEMM los valores de los campos locales asociados a cada uno de esos puntos.

Con el modo de contorno se tiene la capacidad de establecer contornos personalizados, una vez que se ha establecido el contorno deseado se pueden generar visualizaciones de gráficas, así como realizar evaluaciones de integrales de línea a lo largo de ese contorno.

El modo de bloque permite seleccionar un bloque dentro de la región de solución y hallar en el bloque seleccionado integrales de área y volumen.

5.3 Código de Matlab para calcular la resistencia de inducción

El código desarrollado será utilizado para ambas bobinas ya que las variables que se van a calcular son la mismas en ambos casos, se compone de un código principal y tres códigos de funciones.

Matlab ha sido usada para enviar instrucciones a FEMM, para conseguir este enlace es necesario primero indicar la ruta donde se aloja la carpeta del software FEMM y los archivos de trabajo que serán llamados, mediante la instrucción: `addpath('c:\\femm42\\mfiles');` y `savepath;` guardará la ruta establecida.

5.3.1 Programa principal de Matlab

Es necesario primero definir los parámetros de entrada del problema, establecidos en FEMM, se tiene parámetros que son iguales para ambos casos, como los siguientes.

- conductividad=58 siemens
- corriente=1 A
- frecuencia=20kHz
- radio=0.1803 mm

Mientras que otros, también de entrada, serán más específicos, pues son propios de cada bobina.

Bobina de 140 mm

- vueltas=29
- hilos=22

Bobina de 208 mm

- vueltas=30
- hilos=37

Establecidos estos parámetros lo siguiente será identificar los parámetros tomados desde FEMM con comandos directos como el volumen y área del archivo de la bobina sin carga; así como los hallados mediante las funciones “*haciafemm208*” con la cual se obtiene los valores de

la resistencia sin carga r_{sc} y la resistencia con carga r_{cc} , y la función “*promedioH208*” la cual obtiene el valor de la variable **medicion** que corresponde al cuadrado del promedio del campo magnético H presente en la bobina.

En función a todos los parámetros definidos y hallados, se puede hacer los cálculos de las resistencias de inducción, conducción, aproximación y eficiencia haciendo uso de las fórmulas establecidas por (Larco & Pérez, 2018) en su tesis orientada al Análisis Del Modelo Matemático de una Bobina Plana de Calentamiento por Inducción y Optimización de su Eficiencia

5.3.1.1 RESISTENCIA DE INDUCCIÓN

Según (Larco & Pérez, 2018) “la resistencia de inducción es la resistencia propia del inductor” (p.21), ha sido calculada a partir de la ecuación (1) en función de las resistencias con carga y sin carga de la bobina

$$r_{ind} = r_{aproxCC} - r_{aproxSC} \quad (1)$$

Donde;

r_{ind} = Resistencia de inducción

$R_{aproxCC}$ = Resistencia de aproximación con carga

$R_{aproxSC}$ = Resistencia de aproximación sin carga

5.3.1.2 RESISTENCIA DE CONDUCCIÓN

Esta resistencia incluye la resistencia DC y la de efecto piel. Se puede determinar la resistencia de conducción para una bobina de una vuelta con una hebra de radio r_w .

Considerando que la longitud de la vuelta (MLT) se obtiene dividiendo el volumen de la bobina para el área de la sección transversal. (Larco & Pérez, 2018, pp 29-30)

La resistencia de conducción para una bobina de una vuelta con una hebra de radio r_w , corresponde a la ecuación (2):

$$r_{cond} = \frac{1}{\pi r_w^2 \sigma_h} MLT \quad (2)$$

Dónde;

MLT = longitud promedio de la vuelta de la bobina

r_w = radio del conductor expresado en metros

σ_h = conductividad en siemens por metro

La variable MLT viene dada por la ecuación (3):

$$MLT = \frac{volumen}{area} \quad (3)$$

5.3.1.3 RESISTENCIA DE PROXIMIDAD

Los autores (Larco & Pérez, 2018) aseguran que “la resistencia de proximidad corresponde a las pérdidas de proximidad inducida por la propia bobina”. (p.31) Así como para la resistencia de conducción, se establece el estudio de la resistencia de proximidad r_{prox} . Es así como, la resistencia de proximidad por unidad de longitud de una hebra redonda de radio r_w se puede expresar como en la ecuación (4). (Lope & col., 2015, pp. 5089-5101)

$$r_{prox} = \frac{\pi}{\sigma_h} \left(\frac{r_w}{\delta_h} \right)^4 \langle 2\pi r | \bar{H} |^2 \rangle \quad (4)$$

Dónde;

r_w = radio del conductor expresado en metros

σ_h = conductividad en siemens por metro

δ_h = profundidad de penetración en milímetros/ efecto piel

$r|\bar{H}|$ = promedio del campo magnético H presente en el área de la bobina.

Las ecuaciones (5) y (6) gobiernan el modelo matemático de δ_h y $r|\bar{H}|$

$$\delta_h = \frac{1}{\sqrt{\mu_o \sigma_h f}} \quad (5)$$

$$|H_o|^2 = n^2 \left[\sqrt{(H_{0,1x})^2 + (H_{0,1y})^2 + (H_{0,1z})^2} \right]^2 = n^2 |H_{0,1}|^2 \quad (6)$$

Siendo μ_o la constante de la permeabilidad magnética en el vacío.

5.3.1.4 EFICIENCIA

Para establecer la eficiencia, el análisis matemático se realizará en función a los valores obtenidos con las ecuaciones (1), (2) y (4), se debe considerar que estos resultados han sido hallados para una bobina de una hebra y una vuelta.

En la ecuación (7) la eficiencia depende de lo valores de las resistencias mencionadas anteriormente y del número de vueltas e hilos correspondientes a las bobinas que son objeto de estudio (Larco & Pérez, 2018, pp 39-40).

$$\eta = \frac{nr_{ind}}{nr_{ind} + \frac{1}{nn_h} r_{con} + nn_h r_{prox}} \quad (7)$$

Dónde;

r_{ind} = resistencia de inducción

n = número de vueltas de la bobina

n_h = número de hilos del conductor

r_{con} = resistencia de conducción

r_{prox} = resistencia de proximidad

5.3.2 Código de la función haciafemm208.m

Esta función entregará el valor de la resistencia sin carga y la resistencia con carga de la bobina haciendo uso de las variables frecuencia, hilos, vueltas, radio, conductividad y corriente, establecidas en el script principal del programa y de la función “*resistencia208*”

5.3.3 Código de la función promedioH208.m

Se traza la superficie de la bobina sin carga y se establece el número de puntos que serán leídos, mediante dos lazos *for* en cascada se calcula el promedio del campo magnético H presente en cada punto de la bobina, obteniendo finalmente el promedio del campo magnético H del área completa, este valor es guardado en la variable ***medicion***.

5.3.4 Código de la función resistencia208.m

Para el cálculo de las resistencias es necesario resolver un análisis matemático alrededor de las características del conductor y parámetros de la bobina, la función resistencia está diseñada para resolver toda esta matemática y entregar el valor real de resistencia a la función “*haciafemm208*”.

VI RESULTADOS

Concluida la construcción y parametrización de la geometría de las bobinas, así como el preprocesamiento y procesamiento de las gráficas, se procede al post-procesamiento presionando el ícono de análisis, representado por unas gafas, una vez culminada la etapa de post-procesamiento FEMM muestra una primera vista del comportamiento del circuito magnético en una nueva ventana de trabajo.

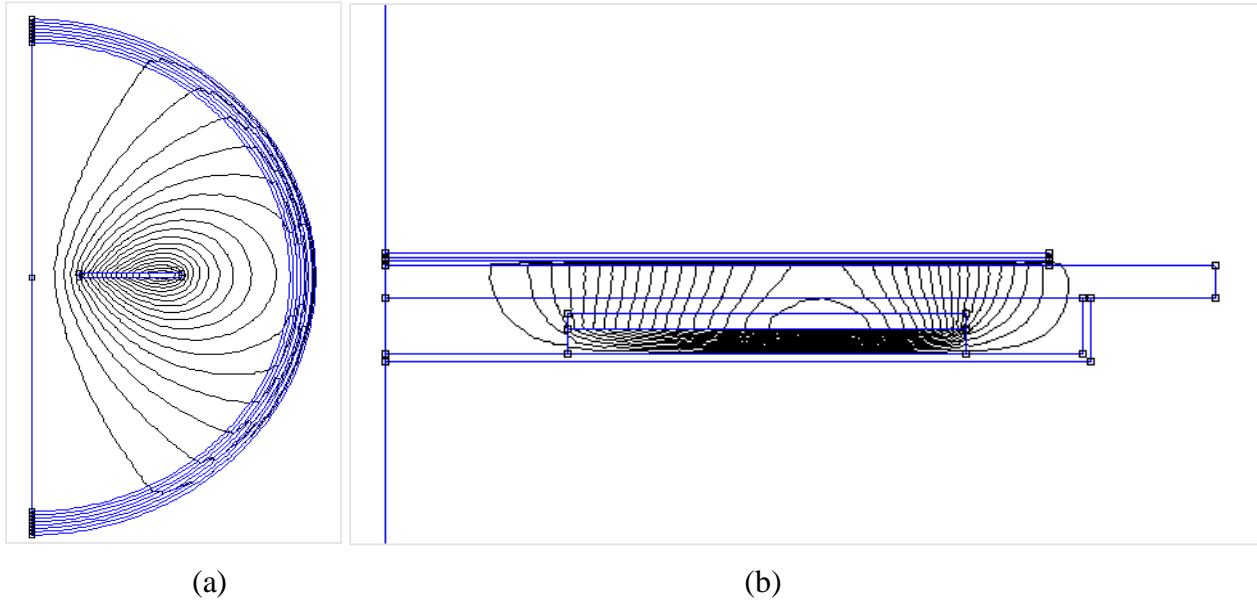
Los resultados sobre la corriente total, la caída de voltaje, la inductancia, la resistencia y la potencia real, reactiva entre otros se observan presionando el ícono semejante a una bobina este despliega, una ventana flotante de salida de datos de FEMM "*Circuit Properties*", basado en la ley de Ohm el parámetro voltaje/corriente proporciona información sobre la resistencia, la cual es necesaria para trabajar en MATLAB.

6.1 Bobina de calentamiento por inducción de 140 mm de diámetro externo

En la ventana principal de la etapa de post-procesamiento se observan unas líneas curvas de color negro, similares a las de la Figura 51, estas líneas de fuerza o campo se generan en consecuencia a la presencia de la bobina construida, estas líneas responden de mejor manera ante la presencia de material magnético; las líneas que no se cierran por el material o están en dirección al espacio de aire, es decir, están fuera de la estructura bobina se les llama líneas de dispersión.

Figura 41

Líneas de fuerza o campo magnético del circuito bobina.

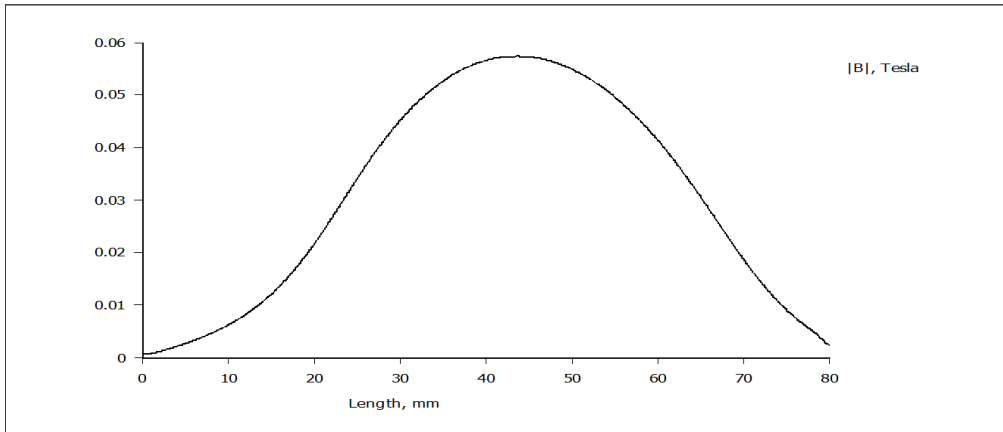


Nota: En la Figura 51(b) se observa que las líneas de campo se generan en el circuito bobina y se dirigen hacia el material ferromagnético de la base de la olla, mientras que en la Figura 51(a) en la bobina no se han generado líneas de campo, sino, únicamente líneas de dispersión las cuales no sobrepasan el contorno definido.

En la Figura 52 se la presenta gráfica de distribución del campo magnético respecto a la longitud de la bobina, lo cual permite analizar el comportamiento del campo magnético a medida que se avanza a lo largo de las superficies seleccionadas de la olla.

Figura 42

Distribución del campo magnético.

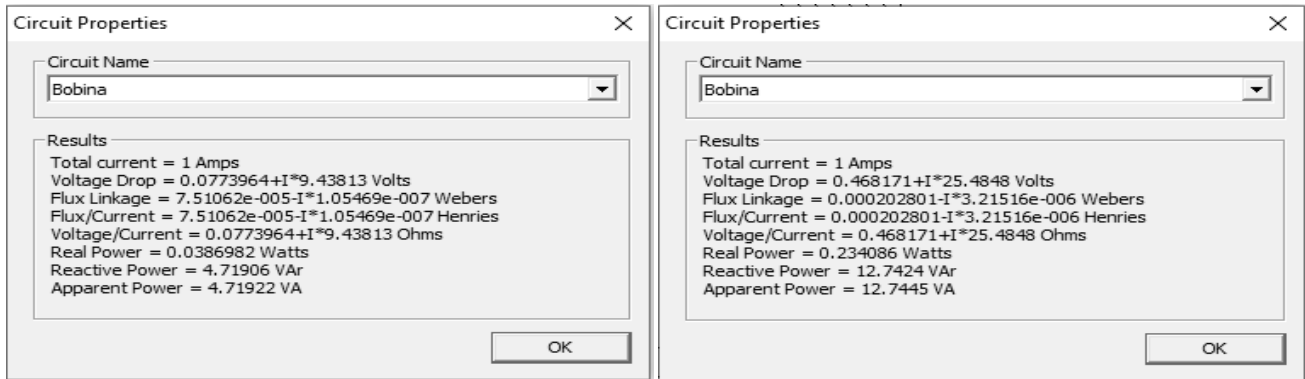


Nota: La figura corresponde a la Distribución del campo magnético en la capa inferior del fondo magnético de la olla.

Para el caso de estudio mediante FEMM se necesita específicamente el dato de resistencia del circuito, esta resistencia se alberga en el parámetro *voltage/current* o *voltage drop*, la resistencia de las bobinas con y sin carga se observa en la Figura 53 una diferencia entre ambas de 0,4 aproximadamente.

Figura 43

Parámetros calculados por FEMM de la bobina de 140 mm de diámetro externo.



(a)

(b)

Nota: La Figura 53(a) corresponde a los parámetros de la bobina de 140 mm de diámetro externo sin carga, mientras la Figura 53(b) corresponde a los parámetros de la bobina de 140 mm de diámetro externo con carga.

Mediante Matlab además de confirmar los datos de resistencia obtenidos en FEMM se hallan otros parámetros necesarios para el cálculo matemático de la resistencia de inducción, así como la eficiencia de la bobina, estos resultados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1

Datos obtenidos en matlab de la bobina de 140 mm de diámetro externo.

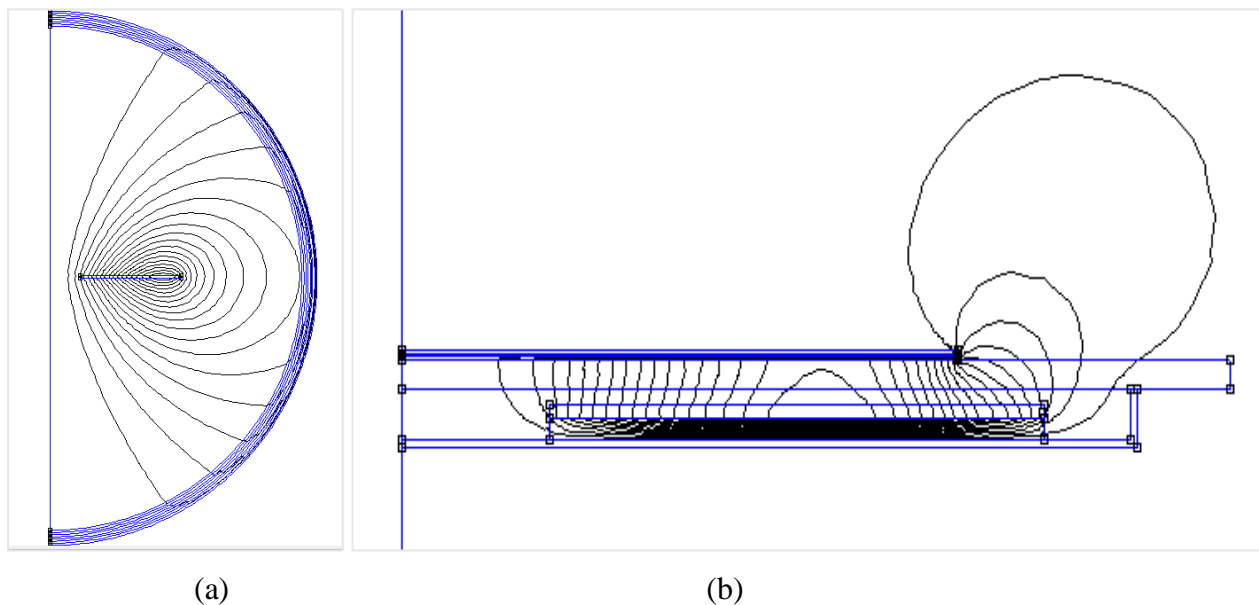
<i>Parámetros de Lectura</i>		<i>Lectura</i>
Resistencia sin carga	[Ω]	0.0774
Resistencia con carga	[Ω]	0.4682
Resistencia de inducción	[mΩ]	0.3908
Resistencia de conducción	[Ω]	0.0488
Resistencia de proximidad	[mΩ]	3.2
Eficiencia	[%]	86.42

6.2 Bobina de calentamiento por inducción de 208 mm de diámetro externo

Las líneas de la Figura 54(a) corresponde a líneas de dispersión, mientras que en la Figura 54(b) se observan líneas de campo en el bloque bobina estas a su vez estas se dirigen hacia el material de la base de la olla, además se observa una curva de dispersión bastante pronunciada.

Figura 44

Líneas de fuerza o campo magnético del circuito bobina.

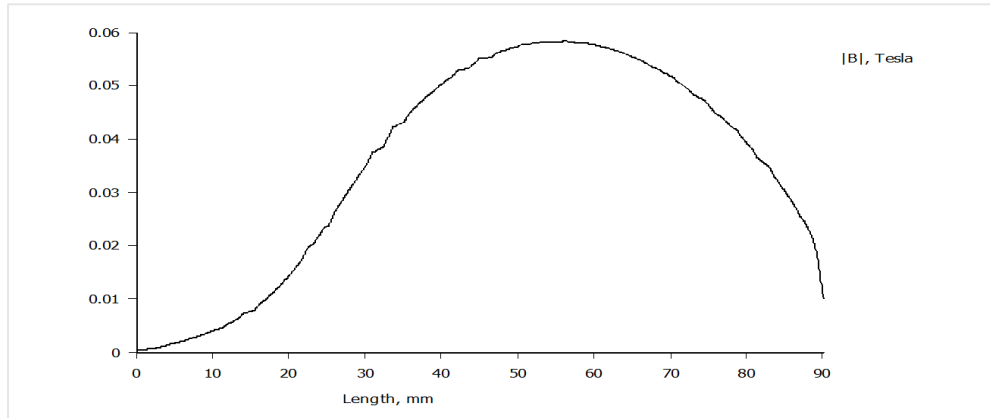


Nota: En la Figura 54(a) se observan líneas de dispersión, mientras en la Figura 54(b) las líneas de campo están distribuidas en sentido al bloque de la base de la olla, en la esquina izquierda se generan líneas de dispersión debido a que la base de la olla no logra cubrir toda la superficie de la bobina, por lo tanto, el campo se dispersa a través del aire buscando la superficie conductora de la base más próxima.

En la Figura 55 muestra el comportamiento del campo magnético en la bobina y en la base de la olla.

Figura 45

Distribución del campo magnético.

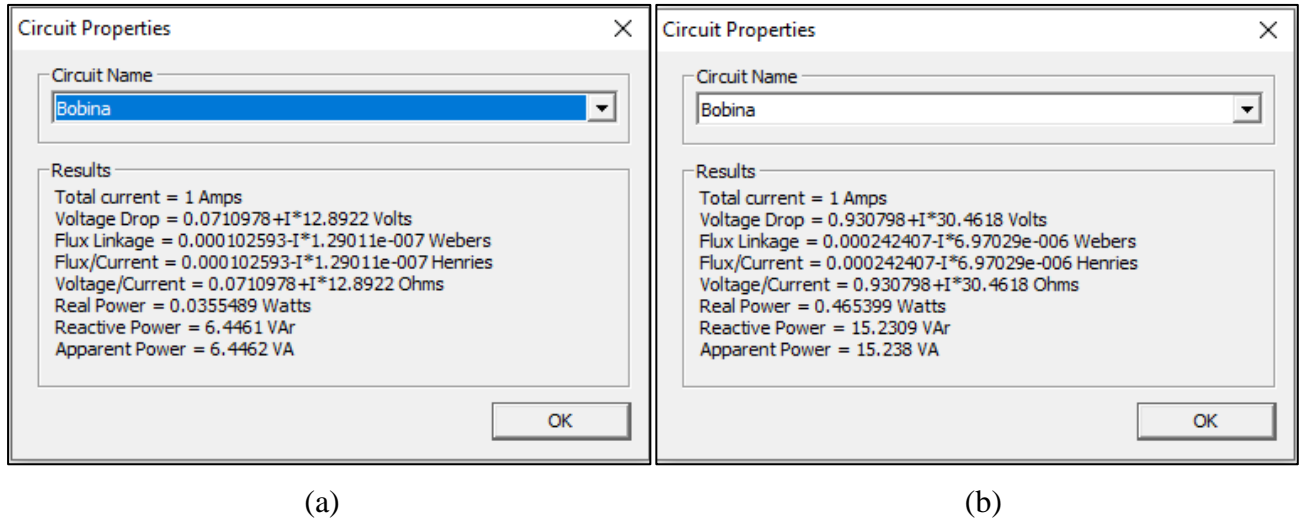


Nota: Al analizar el campo magnético crece de forma moderada a medida que se acerca al centro de la base de la olla, a partir del centro de la base el campo magnético disminuye.

En la Figura 56 se observa que la resistencia obtenida en la bobina sin carga corresponde a 0.07109 ohmios mientras que resistencia de esta misma bobina con carga es igual a 0.9308 ohmios, en este caso se observa que la diferencia entre las resistencias es un tanto más significativo, esto cobra sentido si se considera que se tiene una bobina más grande, por lo tanto, la resistencia generada debe ser mayor para cubrir toda esta superficie.

Figura 46

Parámetros calculados por FEMM de la bobina de 208 mm de diámetro externo sin carga y con carga respectivamente.



Nota: La Figura 56(a) corresponde a los parámetros de la bobina de 208 mm de diámetro externo sin carga, mientras la Figura 56(b) corresponde a los parámetros de la bobina de 208 mm de diámetro externo con carga.

Adicional a estos valores se han analizado las resistencias de inducción, conducción y proximidad, los acules han sido hallados también mediante Matlab y usados para calcular la eficiencia de la bobina, en la Tabla 2 se observa los datos obtenidos por el software, así también se comprueba que el valor de resistencia entregado en FEMM es correcto ya que estos conciden.

Tabla 2

Datos obtenidos en matlab de la bobina de 208 mm de diámetro externo.

<i>Parámetros de Lectura</i>		<i>Lectura</i>
Resistencia sin carga	[Ω]	0.0711
Resistencia con carga	[Ω]	0.9308
Resistencia de inducción	[Ω]	0.8597
Resistencia de conducción	[Ω]	0.0679

Resistencia de proximidad	[$\mu\Omega$]	3.6304
Eficiencia	[%]	87.51

6.3 Análisis comparativo

La Tabla 3 es una agrupación de los datos obtenidos en las Tablas 1-2.

Tabla 3

<i>Parámetros de Lectura</i>	<i>Bobina 140 mm</i>	<i>Bobina 208 mm</i>
Resistencia sin carga	0.0488 [Ω]	0.0711 [Ω]
Resistencia con carga	0.0490 [Ω]	0.9308 [Ω]
Resistencia de inducción	2.1048 [$m\Omega$]	0.8597 [Ω]
Resistencia de conducción	0.0488 [Ω]	0.0679 [Ω]
Resistencia de proximidad	3.7988 [$m\Omega$]	3.6303 [$\mu\Omega$]
Eficiencia	86.42 [%]	87.51 [%]

Conforme a los datos tabulados se puede concluir que las resistencias con carga y sin carga son proporcionales a la medida de las bobinas, es decir en una bobina más grande se encuentra más resistencia alta.

De la misma forma se puede deducir que a medida que la resistencia de inducción disminuye la bobina es más eficiente.

Así también es claro que, al exponer una olla de 180 mm de diámetro de fondo magnético a una bobina de inducción de mayor diámetro, se obtiene como resultado una mejor eficiencia eléctrica que al exponerla a una bobina más pequeña que este recipiente.

VII CRONOGRAMA

En la Tabla 4 se presenta la propuesta del cronograma de actividades dispuesto por semanas, haciendo un total de 20 semanas de trabajo, para el desarrollo del Proyecto de Titulación en los meses de mayo a septiembre correspondientes al periodo académico 62, aspirando que en la primera semana de septiembre se culmine con la sustentación.

Tabla 4

Cronograma de actividades para el desarrollo del Proyecto de Titulación

ACTIVIDADES	Mayo		Junio				Julio				
	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Propuesta del tema y redacción del anteproyecto del Trabajo de Titulación											
Revisiones con el tutor y aprobación del tema de Titulación.											
Investigación sobre el uso de FEMM Y Matlab y pruebas de simulación del proyecto											
Entrega del avance del documento al tutor (primera revisión)											
Entrega del avance del documento al tutor (segunda revisión)											
Finalización del documento de Titulación											

VIII PRESUPUESTO

Considerando que el proyecto será desarrollado en simulación dentro del presupuesto se ha considerado las horas de trabajo de ingeniería invertidas en el desarrollo de esta investigación, así como útiles de trabajo requerido para la culminación del proyecto, valores que se detallan en la Tabla 5, sumando un estimado de \$ 460,00.

Tabla 5

Presupuesto estimado para el desarrollo del Proyecto de Titulación

Cant.	Detalle	Valor unit	Valor total
150	Horas de ingeniería	3,00	\$450,00
1	Material de trabajo	10,00	\$10,00
Valor total			\$460,00

IX CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos en Matlab, Tabla 3, se observa como a medida que el diámetro de la bobina aumenta, la resistencia de inducción se incrementa, es decir, a mayor diámetro, mayor resistencia.

Una mayor eficiencia eléctrica corresponde a una resistencia de inducción baja, es decir, al tener la base de la olla una resistencia baja, esta actúa como un conductor, permitiendo que la corriente fluya por el material presente en la base de la olla, lo que implica una reducción de corrientes inducidas o corrientes parásitas.

El Reglamento RTE – INEN 1011 indica que para las medidas de las bobinas $X \leq 140 \text{ mm}$ y $X \geq 210$ se corresponden ollas de 140 mm y 210 mm de diámetro de fondo magnético respectivamente, estas condiciones se traducen en una eficiencia eléctrica ideal, la hipótesis planteada no corresponde a lo normado en este Reglamento, es por esto que se adjudica a la falta de normativa en el planteamiento del problema, el hecho de que la eficiencia en ambos casos se mantenga en un porcentaje menor al 90%, siendo 86.42% y 87.51%. A pesar de esto, se puede considerar un resultado aceptable.

X RECOMENDACIONES

En este proyecto se ha hecho uso de la plataforma 2D FEMM, que se basa en el cálculo de elementos finitos, para el diseño de la geometría de la bobina por la facilidad para acceder al software al ser este un software libre, sin embargo, se sugiere contrastar los resultados obtenidos mediante el uso de otros softwares de simulación electromagnética como por ejemplo COMSOL Multiphysics, el cual es una plataforma en 3D de modelización para la simulación de cualquier proceso físico.

Es posible realizar el análisis matemático del problema de forma analítica, sin embargo, el proceso analítico demanda el uso de operaciones matemáticas bastante complejas y repetitivas, que requerirán de mucho tiempo, dejando un margen de error considerable, es por esto que se sugiere el uso de un software de programación y cálculo numérico como MATLAB u Octave que es la versión de código abierto de MATLAB, con el fin de conseguir resultados más precisos en menos tiempo.

XI REFERENCIAS

- Alexander, C. K., & Sadiku, M. (2006). *Fundamentos de Circuitos Eléctricos*. McGraw-Hill.
- Cabanillas Mendoza, C., Valdéz, L., Cabrera, C., Merino, C., Bentz, E., & Provasi, P. F. (2019). Ley de Faraday y Ley de Biot y Savart: Campo magnético de una espira circular en un punto fuera del eje. 243. Obtenido de https://repositorio.unne.edu.ar/bitstream/handle/123456789/48205/RIUNNE_FACENA_AR_Cabanillas_Mendoza-Valdez-Cabrera.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Faraday, M. (1831). *Experimental Researches in Electricity* (Vol. 3). Royal Society of London.
- Furlan García, L. A. (2017). Metodología de Medición de la Eficiencia Energética en Cocinas de Inducción para el Ecuador.
- Gil Pozo, M. J. (2014). Fundamentos e implementación del calentamiento por inducción electromagnética, aplicado en cocinas residenciales.
- HVH. (1994). *HVH Industrial Solutions*. Obtenido de <https://hvhindustrial.com/es/blog/principios-de-calentamiento-por-inducci%C3%B3n>
- Larco, V. D., & Pérez, R. E. (2018). Análisis del Modelo Matemático de una Bobina Plana de Calentamiento por Inducción y Optimización de su Eficiencia. (U. P. Salesiana, Ed.)
- Lenz, H. F. (1834). *Ueber die Bestimmung der Richtung der durch elektrodynamische Vertheilung erregten galvanischen Ströme*. *Annalen der Physik und Chemie*.
- Lope, I; Acero, J; Carretero, C. (2015). Analysis and Optimization of the Efficiency of Induction Heating Applications with Litz-Wire Planar and Solenoidal Coils. 5089-5101.
- Martínez Ledesma, J. A. (2013). Desarrollo de un inversor resonante para calentamiento por inducción electromagnética. 12.

Martínez Ledesma, J. A. (2013). *Desarrollo de un Inversor Resonante por Calentamiento por Inducción Electromagnética*. Instituto Politécnico Nacional. Obtenido de

<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19317/1/CD-8686.pdf>

Meeker, D. (25 de Octubre de 2015). *femm.info*. Obtenido de

<https://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>

RTE INEN 101. (2017). Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 101. *Artefactos*

Electrodomésticos para Cocción por Inducción. Ecuador.

XII ANEXO

Código del programa principal de Matlab

```
%% Código de Inicialización de la bobina de 208 mm de diámetro exterior
addpath('c:\\femm42\\mfiles'); % indica la ruta de la carpeta en donde se encuentra
instalado el software FEMM y los archivos a los que se llamará
savepath; % guarda la ruta

%% Limpieza de variables normales y globales, y del espacio de trabajo
clear all; % borra los datos almacenados en todas las variables del Workplace.
clc; % borra información del Command Window

%% Creación de variables globales.
% se las ha creado como variables globales para que el valor que obtengan en
% el programa principal pueda ser utilizado en varias de las funciones
convocadas

global rind_b2; % variable para la resistencia de inducción de 30 vueltas y 37
hilos
global rcond_b2; % variable para la resistencia de conducción de 30 vueltas y 37
hilos
global rprox_b2; % variable para la resistencia de proximidad de 30 vueltas y 37
hilos
global rw_b2; % variable para el radio de una hebra del conductor en
milímetros
global MLT_b2; % variable para la longitud promedio de un vuelta de la bobina
global volumen_b2; %variable para el volumen del espacio en el que se alojará la
bobina
global area_b2; %variable para el área transversal del espacio en el que se
alojará la bobina

%% Se inicializan las variables
rind_b2=0;
rcond_b2=0;
rprox_b2=0;
rw_b2=0;
MLT_b2=0;
volumen_b2=0;
area_b2=0;

%% Sección para abrir el programa FEMM y el archivo del cuál se obtendrá el área y
volumen del espacio en que se situará la bobina
openfemm; % abre FEMM
opendocument('C:\femm42\tesis\Solo Bobina 208 IH Sin Carga.FEM'); % abre el
archivo de la bobina sin carga
mi_analyse(1); % instrucción para que FEMM construya la malla y luego ejecute los
cálculos
mi_loadsolution; % indica a FEMM que cargue los datos en el archivo .ans
mo_selectblock(55,1); % selecciona el bloque en el que se encuentra la bobina con
la ubicación r=55 y z=1
```

```

volumen_b2=mo_blockintegral(10); % obtiene el volumen del bloque de la bobina
area_b2=mo_blockintegral(5); % obtiene el área del bloque de la bobina
MLT_b2=volumen_b2/area_b2; % calcula la longitud promedio de la vuelta de la
bobina en metros
mo_clearblock; % quita la selección del bloque en el que se
encuentra la bobina

%% Parámetros que se enviarán a FEMM (para el cálculo de las resistencias)
vueltas_b2=30; % define el número de vueltas "n" de la bobina
hilos_b2=37; % define el número de hilos "ns" de la bobina
conductividad=58; % conductividad del cobre en MegaSiemens por metro
corriente=1; % define la corriente de la bobina en amperios
uo=4e-07*pi; % constante de la permeabilidad magnética en el vacío
frecuencia=20e3; % estable la frecuencia del programa f=20KHz
radio=0.1803; % radio del conductor en milímetros

%% Cálculo de la resistencia de inducción
% Función para abrir el archivo de la Bobina Sin Carga y Con Carga
% cálculo de la resistencia sin carga rsc y la resistencia con carga rcc

[rsc_b2,rcc_b2]=haciafemm208(frecuencia,hilos_b2,vueltas_b2,radio,conductividad,corr
iente);

% Cálculo de la Resistencia de Inducción obtenida de la diferencia de la resistencia
con carga menos la resistencia sin carga.
rind_b2=rcc_b2-rsc_b2 % rind almacena el valor de la resistencia de inducción de la
bobina

%% Código para calcular las resistencias de conducción rcond para una vuelta y un
hilo y la resistencia de proximidad rprox de una vuelta y un hilo
rw_b2=radio*1e-03; %se pasa de milímetros a metros el radio elegido del conductor
sigw=conductividad*1e+06; % conversión de la conductividad del cobre a Siemens por
metro
epsilon=(pi*uo*sigw*frecuencia)^0.5;
skin=1/epsilon; %Cálculo de la profundidad de penetración en milímetros/ efecto piel
condicion_b2=rw_b2/skin; %verificación de que con la frecuencia de operación el
radio del conductor es menor que la profundidad de penetración.

rcond_b2=MLT_b2/(pi*rw_b2.^2*sigw) %cálculo de la resistencia de conducción para una
vuelta y un hilo

disp('Promedio campo magnético H');
medicion_b2=promedioH208() % Obtención desde FEMM del promedio del campo magnético H
al cuadrado en el espacio de la bobina

rprox_b2=((2*medicion_b2*pi^2)/sigw)*(rw_b2./skin)^4 %cálculo de la resistencia de
proximidad para una vuelta y un hilo
%% Eficiencia
%cálculo de la eficiencia para toda la bobina con el radio del conductor y la
frecuencia seleccionada
display('Eficiencia de la bobina 2')
display('Diametro ext. 208 mm, # vueltas 30, # hilos 37')
eficiencia_b2=(vueltas_b2*rind_b2/(vueltas_b2* rind_b2 +
(vueltas_b2*rcond_b2)/hilos_b2 + vueltas_b2^3*hilos_b2*rprox_b2))*100

```

Código de la función haciafemm208.m

```
%% Código de la función para abrir el archivo de la Bobina Sin Carga y Con Carga y
llamar a la función resistencia.m calcular sus respectivas resistencias

% vueltas=30; %define el número de vueltas "n" inicial para el programa
% hilos=37; %define el número de hilos "ns" inicial para el programa
% conductividad=58; %conductividad del cobre en MegaSiemens por metro
% corriente=1; %define la corriente en amperios para el programa
% sigw=conductividad*1e+06; %conductividad del cobre en Siemens por metro
% uo=4e-07*pi; %permeabilidad magnética del vacío
% frecuencia=20e3; %define una frecuencia para el programa
% radio=0.1803;

function
[rsc,rcc]=haciafemm208(frecuencia,hilos_b2,vueltas_b2,radio,conductividad,corriente)

opendocument('C:\femm42\tesis\Solo Bobina 208 IH Sin Carga.FEM'); %Solo Bobina 208
IH Sin Carga.FEM'); %abre el archivo de la bobina sin carga

rsc=resistencia208(frecuencia,hilos_b2,vueltas_b2,radio,conductividad,corriente);
%llama a la función resistencia208 para realizar la simulación en FEMM y calcular la
resistencia y la reactancia de la bobina sin carga.

mi_saveas('C:\femm42\tesis\Solo Bobina 208 IH Sin Carga.FEM'); %Solo Bobina 208 IH
Sin Carga.FEM'); %guarda el archivo de la bobina sin carga

mi_close; %cierra el pre-procesador, es decir cierra el archivo del dibujo
mo_close; % cierra el post-procesador, es decir el archivo de resultados

opendocument('C:\femm42\tesis\Bobina 208 IH Con Carga.FEM'); %Bobina 208 IH Con
Carga.FEM'); %abre el archivo de la bobina con carga

rcc=resistencia208(frecuencia,hilos_b2,vueltas_b2,radio,conductividad,corriente);
%llama a la función resistencia208 para realizar la simulación en FEMM y calcular la
resistencia de la bobina con carga.

mi_saveas('C:\femm42\tesis\Bobina 208 IH Con Carga.FEM'); %Bobina 208 IH Con
Carga.FEM'); %guarda el archivo de la bobina con carga

mi_close; %cierra el pre-procesador, es decir cierra el archivo del dibujo
mo_close; % cierra el post-procesador, es decir el archivo de resultados

end
```

Código de la función promedioH208.m

```
% Código de la función para el cálculo del promedio del campo magnético H al
cuadrado en el espacio de la bobina

function medicion=promedioH208();

opendocument('C:\femm42\tesis\Solo Bobina 208 IH Sin Carga.FEM'); %abre el archivo
de la bobina sin carga
mi_analyse(1); %se indica a FEMM que construya la malla y luego ejecute los cálculos
mi_loadsolution; %se indica a FEMM que cargue los datos en el archivo .ans

zi=0; %altura z inicial en milímetros
zf=2; %altura z final en milímetros
pz=10; %número de puntos leídos en z

ri=24; %radio r inicial en milímetros
rf=104; %radio r final en milímetros
pr=40; %número de puntos leídos en r

rj=0;
zj=0;
hocuaradio=0;

for r=ri:(rf-ri)/pr:rf;
    rj=rj+1;
    for z=zi:(zf-zi)/pz:zf;
        zj=zj+1;
        ho=mo_geth(r,z); %campo magnético leído en el punto r,z
        horeal=real(ho); %parte real del campo magnético
        hocuadrado=horeal(1)^2+horeal(2)^2;
        hocuaradio=hocuaradio+rj*hocuadrado;
    end
end

medicion=hocuaradio/(1000*(pr*pz)); %se divide para 1000 porque los radios están en
milímetros
mi_close; %cierra el pre-procesador, es decir cierra el archivo del dibujo
mo_close; % cierra el post-procesador, es decir el archivo de resultados

end
```

Código de la función resistencia208.m

```
function
res=resistencia208(frecuencia,hilos_b2,vueltas_b2,radio,conductividad,corriente)
%función "resistencia208" que trae "hilos" y "vueltas" de "pruebaFR"

mi_probdef(frecuencia,'millimeters','axi',1E-8,0,30,0) %mi_probdef cambia las
definiciones del problema
%frecuencia = toma el valor de la frecuencia definido en "principal.m"
%millimeters = indica que las dimensiones del problema están en milímetros
%axi = indica que el problema es axisimétrico
%1E-8 = indica la precisión del solver
%0 = este valor se usa para problemas axisimétricos e indica la profundidad
%del problema dentro de la dirección de la página
%30= restricción que representa el valor mínimo del ángulo de los
%triángulos construidos por el generador del enmallado.
%0 = indica que el solver utilizará el método de aproximaciones sucesivas

mi_deletematerial('cable'); %para borrar de la librería el material cable antes de
crearlo desde cero
mi_addmaterial('cable', 1, 1, 0, 0, conductividad, 0, 0, 1, 5, 0, 0, hilos_b2,
2*radio); %para añadir el cable a la librería
mi_addblocklabel(55,1); %añade un bloque de etiqueta "<None>" en la coordenada r=55
y z=1 donde irá el material "cable"
mi_selectlabel(55,1); %selecciona el bloque "cable" localizado en la coordenada r=55
mm y z=1 mm para luego editar sus atributos
mi_setblockprop('cable',1,0,'<None>',0,0,vueltas_b2) %añade el material "cable" al
bloque "<None>" situado en r=55 y z=1
mi_setblockprop('cable',1,0,'Bobina',0,0,vueltas_b2); %se define que el bloque ya no
sea vacío "<None>" sino que tenga asignado una bobina con # de vueltas
mi_clearselected; %se quita la selección del bloque "cable"

mi_modifycircprop('Bobina',2,1); %mi_modifica las propiedades del circuito "Bobina"
%el valor de 2 es para indicar se quiere cambiar la configuración de la bobina
%el valor 1 es para indicar que la configuración de la bobina es en serie.

mi_setcurrent('Bobina',corriente) %asigna el valor de corriente definido en
"principal.m" al circuito "Bobina"
mi_analyse(1); %se indica a FEMM que construya la malla y luego ejecute los cálculos
mi_loadsolution; %se indica a FEMM que cargue los datos en el archivo .ans

pb=mo_getcircuitproperties('Bobina'); %mo_getcircuitproperties lee los resultados
del circuito "Bobina" y se
%asigna a la variable pb.

pbreal=real(pb); %se obtiene la parte real de pb que es la resistencia

res=pbreal(2)/pbreal(1); %se obtiene el valor de la resistencia dividiendo
%el voltaje almacenado en la posición 2 de pbreal para la
corriente almacenado en la posición 1 de pbreal.
%el resultado se almacena en res para ser devuelto a
"principal.m"

end
```