



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELÉCTRICA

ANÁLISIS DE LA RESONANCIA ELÉCTRICA EN LA
FUNDICIÓN DE HORNOS DE INDUCCIÓN DE MATERIALES

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO
ELECTRICISTA

PRESENTAN

JESÚS CALDERÓN ROJAS
GAD ELISEO ZAINOS DIAZ

ASESORES

M. en C. BALDOMERO GUEVARA CORTÉS
Dr. DAVID SEBASTIÁN BALTAZAR



México D.F.

Diciembre del 2013

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD PROFESIONAL "ADOLFO LÓPEZ MATEOS"

TEMA DE TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN
DEBERA (N) DESARROLLAR**

**INGENIERO ELECTRICISTA
TESIS COLECTIVA Y EXAMEN ORAL INDIVIDUAL
JÉSUS CALDERÓN ROJAS
GAD ELISEO ZAINOS DÍAZ**


**"ANÁLISIS DE LA RESONANCIA ELÉCTRICA EN LA FUNDICIÓN DE HORNOS DE INDUCCIÓN
DE MATERIALES"**

**ANALIZAR EL COMPORTAMIENTO Y EFECTOS DE UN HORNO DE INDUCCIÓN DURANTE SU
OPERACIÓN EN UNA RED ELÉCTRICA INDUSTRIAL.**

- **PRINCIPIOS Y LEYES PRESENTES EN LA OPERACIÓN DE LOS HORNOS DE INDUCCIÓN.**
- **CLASIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS HORNOS ELÉCTRICOS.**
- **SIMULACIÓN DEL ESQUEMA DE FUNDICIÓN PARA EL HORNO DE INDUCCIÓN.**
- **ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.**

MÉXICO D.F., A 5 DE FEBRERO DEL 2015.


ASESORES



M. EN C. BALDOMERO GUEVARA CORTÉS



DR. DAVID SEBASTIÁN BALTAZAR


ING. CESAR DAVID RAMIREZ ORTIZ
JEFE DEL DEPARTAMENTO ACADÉMICO
DE INGENIERÍA ELÉCTRICA JEFATURA DE
INGENIERIA ELECTRICA





JESÚS CALDERÓN ROJAS

A mi gloriosa institución, el Instituto Politécnico Nacional, por brindarme un espacio en sus aulas y ofrecerme esta importante herramienta que es mi profesión.

A mi padre, Jesús Calderón Salazar por guiarme a lo largo de mi vida y brindarme siempre el apoyo, fuerza y confianza para seguir adelante y poder alcanzar mis metas.

A mi madre, Marcela Rojas González, por darme su amor, su tiempo y sus consejos, inculcándome valores para ser una mejor persona.

A mi hermana, Fernanda Joselyn Calderón Rojas, quien sin saberlo me ha motivado a salir adelante para poder ofrecerle un buen ejemplo hacia el camino del bien.

A mis maestros, por brindarme su tiempo y sus conocimientos aún fuera de las aulas.

A mis asesores, por darme un poco de su espacio y sus conocimientos para que esta tesis saliera adelante.

A mi compañero, colega y amigo Gad Eliseo Zainos Díaz, por su apoyo, colaboración y seguimiento para que este proyecto se llevara a cabo y a quien deseo un tremendo éxito en el futuro.

A las personas que me aprecian y me estiman, y que en algún momento de mi vida me han apoyado con sus consejos y sus buenos deseos, que me enseñaron la belleza de la vida y como hacerle frente, así como el verdadero valor de la amistad, fraternidad y cariño, que dios los bendiga a todos y cada uno de ustedes...

**GAD ELISEO ZAINOS DIAZ**

A DIOS, mi Padre Celestial, por darme la vida, la salud y la oportunidad de prepararme todos los días conforme a su fascinante e inescrutable plan.

Al Instituto Politécnico Nacional, mi Alma Máter, que desde el nivel bachillerato me ha acogido e impartido conocimientos invaluable.

A padres, Alfredo Zainos Carrillo y Elena Díaz Murillo, quienes a lo largo de mi vida me han brindado su amor, apoyo, confianza y su ayuda siempre que la he necesitado.

A hermana, Flor Minea Zainos Díaz, porque a pesar de todo me ha soportado y me motiva a ser mejor persona.

Al doctor David Sebastián Baltazar, por su paciencia, apoyo y asesoría durante el proceso de elaboración de este trabajo.

Al M. en C. Baldomero Guevara Cortés, por su apoyo, tiempo y confianza que ayudaron a que se pudiera lograr este trabajo.

A mi compañero y amigo, Jesús Calderón Rojas, quién trabajo arduamente en esta tesis y se convertirá pronto en un excelente ingeniero.

Y a todas las personas que me han enseñado y con las que he compartido tantas experiencias a través de este corto viaje que se llama vida.



ÍNDICE

Objetivos.....	9
Resumen.....	10
Abstract.....	11

CAPÍTULO I

PRINCIPIOS Y LEYES PRESENTES EN LA OPERACIÓN DE LOS HORNOS DE INDUCCIÓN

1.1 Introducción.....	12
1.2 Ley de Biot-Savart.....	12
1.3 Ley de Ampere de los circuitos – ecuación de Maxwell.....	14
1.4 Densidad de flujo magnético – ecuación de Maxwell.....	15
1.5 Campo magnético.....	16
1.6 Permeabilidad magnética de un material.....	17
1.7 Magnetización de los materiales.....	17
1.8 Curva de saturación.....	23
1.9 Inductores e inductancias.....	25
1.10 Circuitos magnéticos.....	28
1.11 Efecto parásito.....	31
1.12 Resonancia eléctrica.....	32

CAPÍTULO II

CLASIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS HORNOS ELÉCTRICOS

2.1 Introducción.....	38
2.2 Hornos de arco.....	38
2.2.1 Hornos de arco de calentamiento directo.....	38
2.2.2 Hornos de arco de calentamiento indirecto.....	39
2.2.3 Campos de aplicación.....	39
2.2.4 Ventajas y desventajas.....	40
2.3 Hornos de Whilote (altos hornos).....	40
2.3.1 Revestimiento.....	41



2.3.2 Funcionamiento.....	41
2.3.3 Ventajas y desventajas.....	42
2.4 Hornos de resistencia.....	42
2.4.1 Campos de aplicación.....	43
2.4.2 Ventajas y desventajas.....	43
2.5 Hornos de inducción.....	43
2.5.1 Equipos con núcleo magnético.....	44
2.5.2 Equipos sin núcleo magnético.....	44
2.5.3 Campos de aplicación.....	45
2.5.4 Ventajas y desventajas.....	46

CAPÍTULO III

SIMULACIÓN DEL ESQUEMA DE FUNDICIÓN PARA EL HORNO DE INDUCCIÓN

3.1 Introducción.....	47
3.2 Propiedades de la carga.....	47
3.2.1 Resistividad eléctrica.....	47
3.2.2 Permeabilidad magnética.....	50
3.2.3 Calor específico y entalpía.....	50
3.2.4 Conductividad térmica.....	52
3.2.5 Emisividad.....	52
3.3 Hornos de crisol.....	53
3.3.1 Capacidad y frecuencia.....	54
3.3.2 Agitación electromagnética.....	54
3.3.3 Relación entre capacidad, potencia y frecuencia.....	55
3.4 Modelo aplicado para la simulación.....	57
3.5 Determinación del esquema de fundición.....	60
3.6 Simulación en el ATP-Draw.....	68
3.7 Rendimiento del calentamiento por inducción.....	74



CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

4.1 Introducción.....	81
4.2 Conclusiones.....	81
4.3 Recomendaciones.....	82
BIBLIOGRAFÍA.....	83



ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1: Determinación de la dirección de dH por medio de la regla de mano derecha.	13
Figura 1.2: (a) Electrón con movimiento orbital en torno al núcleo;(b) espín del electrón.	19
Figura 1.3: Momento magnético dipolar en un volumen Δv : (a) antes de aplicar B , (b) después de aplicar B	20
Figura 1.4: a) Dobles extremos cuando se llega a un nivel de valores H_0 y B_0 , b) Linealidad para un intervalo determinado de valores	23
Figura 1.5: Regiones de la curva de saturación.	24
Figura 1.6: Campo magnético B producido por un circuito	26
Figura 1.7 Interacción magnética entre dos circuitos	27
Figura 1.8: Analogía entre circuitos eléctricos y magnéticos	29
Figura 1.9: Ejemplo con un núcleo de transformador, para representar una circulación de flujo magnético.	31
Figura 1.10: Circuito resonante serie	33
Figura 1.11: Frecuencia de resonancia	34
Figura 1.12: Componente imaginaria de impedancia del circuito resonante	35

Capítulo 2

Figura 2.1: Horno de arco de calentamiento directo	39
Figura 2.2: Horno de Whilote	40
Figura 2.3: Horno de resistencia de calentamiento indirecto	42
Figura 2.4: Horno de inducción sin núcleo magnético	44

Capítulo 3

Figura 3.1: Resistividad de metales	49
Figura 3.2: Resistividad de diferentes aceros	49
Figura 3.3: Entalpía de diferentes aceros	51
Figura 3.4: Conductividad térmica de aceros	52



Figura 3.5: Esquema de horno de inducción	53
Figura 3.6: Esquema y utilización de la potencia del horno en función del nivel de llenado con hierro fundido.	55
Figura 3.7: Potencia y factor de agitación en media frecuencia	56
Figura 3.8: Esquema representativo del material dentro del crisol refractario.	58
Figura 3.9: Curvas de saturación de algunos materiales metálicos	61
Figura 3.10: Modelo del horno de inducción resonante paralelo cargado con 50 kg de hierro.	68
Figura 3.11: Respuesta a la frecuencia de la carga de hierro cuando entra en resonancia.	69
Figura 3.12: Gráfica de la tensión del sistema con carga de hierro	69
Figura 3.13: Gráfica de la corriente del sistema con carga de hierro	70
Figura 3.14: Modelo del horno de inducción resonante paralelo cargado con 50 kg de acero.	70
Figura 3.15: Respuesta a la frecuencia de la carga de acero cuando entra en resonancia.	71
Figura 3.16: Gráfica de la tensión del sistema con carga de acero.	71
Figura 3.17: Gráfica de la corriente del sistema con carga de acero.	72
Figura 3.18: Modelo del horno de inducción resonante paralelo cargado con 50kg de níquel.	72
Figura 3.19: Respuesta a la frecuencia de la carga de níquel cuando entra en resonancia.	73
Figura 3.20: Gráfica de la tensión del sistema con carga de níquel.	73
Figura 3.21: Gráfica de la corriente del sistema con carga de níquel.	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Conjunto de fórmulas para inductancia de elementos comunes	30
Tabla 2 Resistividades y coeficientes de resistividad	48
Tabla 3 Permeabilidad magnética máxima de materiales ferrosos	50
Tabla 4 Calor específico de aceros en KJ/Kg-K	51
Tabla 5 Emisividad de varios metales	52
Tabla 6 Coeficientes de agitación y tipos de chatarra	56
Tabla 7 Resistividades y coeficientes de resistividad	60

**OBJETIVO GENERAL:**

Analizar el comportamiento y efectos de un horno de inducción durante su operación en una red eléctrica industrial.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Proponer un modelo que describa el comportamiento del horno bajo condiciones de operación.
- Someter a prueba el modelo propuesto empleando un software libre.
- Analizar la curva de saturación presente en el horno durante su operación con distintos metales propuestos.
- Observar el comportamiento del horno de inducción bajo condiciones de resonancia serie.
- Interpretar los resultados obtenidos en las simulaciones para establecer la eficiencia eléctrica del modelo propuesto.



RESUMEN

En éste trabajo se presentan los resultados obtenidos mediante la simulación del modelo de un horno eléctrico de inducción o también llamados hornos de crisol, mismo que está constituido de los elementos básicos del horno para la operación, como características generales del devanado inductor y capacitor resonante, basándose en el paquete computacional ATP-Draw, en el que se describen los efectos de la resonancia eléctrica presentes en la carga metálica durante la operación del equipo, referenciándose a partir de tres metales usuales en la industria de la fundición, cubriendo así sus características físicas como la masa y volumen a fundir, magnéticas como la curva de saturación y eléctricas como resistencia y reactancia inductiva propias del material.

Como parte importante del trabajo, se llevó a cabo un barrido de frecuencia, el cual describe el comportamiento del material bajo condiciones de frecuencia distintas.

Finalmente se establecen las conclusiones.



ABSTRACT

In this paper we present the results obtained by simulating the model of an electric induction furnace or crucible furnaces also called, which consists of the basic elements for operation of the furnace as general characteristics of winding inductor and resonant capacitor, based on the software package ATP-Draw, which describes the effects of electrical resonance present in the metal charge during operation of the equipment, based from three common metals in the foundry industry, covering their physical characteristics such as the mass and volume to melt, as the magnetic saturation curve, and electrical as inductive reactance and resistance of the material itself.

As part of the work was carried out a frequency sweep, which describes the material behavior under different frequency.

Finally conclusions are established.



CAPÍTULO I

PRINCIPIOS Y LEYES PRESENTES EN LA OPERACIÓN DE LOS HORNOS DE INDUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan y se describen las leyes y principios de la física, de la electricidad y magnetismo que están presentes y describen el funcionamiento del equipo, dicho lo anterior este capítulo se propuso con la finalidad de acercar y orientar al lector para entender los fenómenos físicos que se requieren para la operación del horno de inducción.

1.2 LEY DE BIOT-SAVART

La ley establece que la intensidad del campo magnético dH producido en un punto P , multiplicado a su vez por el elemento diferencial de corriente $I dl$, es proporcional al producto $I dl$ y al seno del ángulo α , comprendido entre el elemento y la línea que une a P con el elemento, y es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia R entre P y el elemento, como se muestra:

$$dH \propto \frac{I dl \operatorname{sen} \alpha}{R^2} \quad (1.1)$$

o sea,

$$dH = \frac{k l \operatorname{sen} \alpha}{R^2} \quad (1.2)$$

en donde k es la constante de proporcionalidad. En unidades del SI, $k = 1/4\pi$, por lo que la ecuación 1.2 se convierte en:

$$dH = \frac{I dl \operatorname{sen} \alpha}{4\pi R^2} \quad (1.3)$$

De la definición de producto cruz de la ecuación, es fácil notar que la ecuación (1.3) se expresa mejor en forma vectorial como:

$$d\mathbf{H} = \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{a}_R}{4\pi R^2} = \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{R}}{4\pi R^3} \quad (1.4)$$

en la cual $R=|\mathbf{R}|$ y $\mathbf{a}_R = \mathbf{R}/R$. En consecuencia, la dirección de $d\mathbf{H}$ puede determinarse por la regla de la mano derecha con el pulgar derecho apuntando en la dirección de la corriente, y los dedos de la mano derecha cubriendo al alambre en la dirección de $d\mathbf{H}$, como se muestra en la figura 1.1.

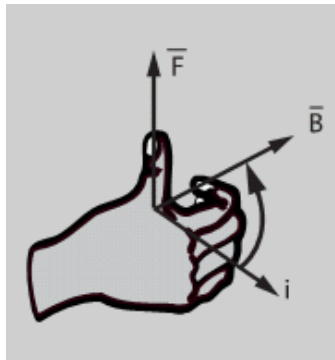


Fig 1.1 Determinación de la dirección de $d\mathbf{H}$ por medio de la regla de mano derecha.

De la misma forma que pueden tenerse diferentes configuraciones de carga, también pueden tenerse diferentes distribuciones de corriente: corriente lineal, corriente superficial y corriente volumétrica. Si se define \mathbf{K} como la corriente superficial (en amperes/metro) y \mathbf{J} como la densidad de corriente volumétrica (en amperes/metro cuadrado), los elementos de la fuente están relacionados por:

$$I d\mathbf{l} = \mathbf{K}dS = \mathbf{J}dv \quad (1.5)$$

En consecuencia, en función de las fuentes de corriente distribuida, la ley de Biot-Savart como aparece en la ecuación (1.4) se convierte en:

$$H = \int_L \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{a}_R}{4\pi R^2} \quad (\text{corriente lineal}) \quad (1.6)$$

$$H = \int_S \frac{K dS \times a_R}{4\pi R^2} \quad (\text{corriente superficial}) \quad (1.7)$$

$$H = \int_V \frac{J dv \times a_R}{4\pi R^2} \quad (\text{corriente volumétrica}) \quad (1.8)$$

1.3 LEY DE AMPERE DE LOS CIRCUITOS – ECUACIÓN DE MAXWELL

La ley de Ampere establece que la integral de línea de la componente tangencial de \mathbf{H} en torno a una trayectoria *cerrada* es igual a la corriente neta I_{enc} encerrada por la trayectoria. En otras palabras, la circulación de \mathbf{H} es igual a I_{enc} ; es decir,

$$\oint H \cdot dl = I_{enc} \quad (1.9)$$

La ley de Ampere es similar a la ley de Gauss y se aplica con facilidad para determinar \mathbf{H} cuando la distribución de la corriente es simétrica. Debe observarse que siempre es válida la ecuación (1.9) aún cuando la distribución de la corriente es o no simétrica, pero solo puede usarse la ecuación para determinar \mathbf{H} cuando existe una distribución simétrica de la corriente. La ley de Ampere es un caso especial de la ley de Biot-Savart; la primera puede deducirse a partir de la segunda.

Al aplicar el teorema de Stokes el miembro izquierdo de la ecuación (1.9), se obtiene:

$$I_{enc} = \oint_L H \cdot dl = \int_S (\nabla \times H) \cdot dS \quad (1.10)$$

A su vez,

$$I_{enc} = \int_S J \cdot dS \quad (1.11)$$



Si se comparan las integrales de superficie de las ecuaciones (1.10) y (1.11), se observa claramente que:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1.12)$$

Ésta es la tercera ecuación de Maxwell por deducir; es en esencia la ley de Ampere en forma diferencial (o puntual), mientras que la ecuación (1.10) es la forma integral. De la ecuación (1.12) se debería observar que $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \neq 0$; es decir, el campo magnetostático no es conservativo.

1.4 DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO – ECUACIÓN DE MAXWELL

La densidad de flujo magnético \mathbf{B} es similar a la densidad de flujo eléctrico \mathbf{D} . Igual que se tiene $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}$ en el vacío o espacio libre, la densidad de flujo magnético \mathbf{B} está relacionada con la intensidad del campo magnético \mathbf{H} según la expresión:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (1.13)$$

en donde μ_0 es una constante que se conoce como la *permeabilidad del vacío o espacio libre*. La constante está en Henry/metro (H/m) y tiene el valor de:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \quad (1.14)$$

El flujo magnético que pasa a través de una superficie S lo da la expresión:

$$\Psi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (1.15)$$

en el cual el flujo magnético Ψ está en webers (Wb) y la densidad de flujo magnético está en webers/metro cuadrado (Wb/m^2) o teslas.



1.5 CAMPO MAGNÉTICO

Da la explicación de aquel fenómeno que representa la creación de un espacio de fuerzas a partir de la circulación de una corriente eléctrica, es decir, si se tiene un conductor por el cual circule una corriente eléctrica, entonces esta misma formará un campo de fuerzas alrededor de conductor cuya dirección y forma depende del sentido de la corriente y tipo de conductor. Por lo tanto, estas fuerzas ejercidas son llamadas "fuerzas magnetizantes" y el espacio en donde se ejercen se le llama "Campo magnético".

En este apartado el estudio se centra en los dos puntos siguientes:

- 1. La circulación de una corriente a lo largo de un conductor provoca un campo magnético alrededor del mismo.**
- 2. Si a través de una espira se introduce un campo magnético variable con el tiempo, se inducirá un voltaje en la misma espira.**

La ley de Ampere establece la intensidad de un campo magnético por la acción de una corriente eléctrica aplicada y se puede definir como:

$$\int H \cdot dL = I_{total} \quad (1.16)$$

donde:

H: intensidad de campo magnético producido por la I_{total} medida en unidades de amper-vuelta.

dL: define una diferencial de longitud determinada por la trayectoria del campo magnético.

Es decir, si se tiene un material (que posee la propiedad de tener átomos que tienden a alinearse fácilmente cuando se les aplica un campo magnético exterior) con un enrollado de "N" vueltas en una de las columnas se puede observar que el campo magnético producido por una corriente "i" en su mayoría se encuentra atrapado a lo largo del núcleo en donde el intervalo de integración de la ley de Ampere será a lo largo de la trayectoria definida por la longitud media L_0 y la corriente total I_{tot} será N veces la corriente "i" debido a que la corriente "i" pasa por la espira N veces dentro del tramo de integración, entonces se tiene un producto $N \cdot i$ que es igual a la I_{tot} ,

entonces, la integral de Ampere es una integral cerrada que es igual al producto de los dos términos que dan por resultado la I_{tot} . Por lo cual se puede definir como:

$$HL_0 = Ni$$
$$H = \frac{N_i}{L_0} \quad (1.17)$$

Se tiene que la "H" define el esfuerzo que realiza una corriente "i" aplicada para que se pueda producir un campo magnético en el conductor.

Se encontrará que existe un flujo de campo magnético fluctuando a lo largo del material; esta, a su vez, es otra característica del campo dentro de un material ferromagnético y es llamada comúnmente "flujo magnético (el símbolo para definirlo generalmente es la letra griega phi φ)" cuyas unidades de medida en el SI son los *Webers* el flujo magnético sobre viene una característica más, esa es la "Densidad de flujo magnético" que depende del tipo de material del cual se encuentra fabricado el núcleo, normalmente se define con la letra "B" y sus unidades de medida en el S.I. son [Webers por m^2 o Teslas], de esta manera se puede expresar la Densidad de flujo magnético como una función de la intensidad de campo magnético "H" (que tiene el nombre de inducción magnética o de campo magnético) de la forma siguiente.

$$B = \mu H \quad (1.18)$$

La ecuación anterior muestra que la Densidad de flujo magnético es proporcional a la intensidad de campo en un valor establecido μ que es una "constante" determinante de la permeabilidad magnética del material. [1]

1.6 PERMEABILIDAD MAGNÉTICA DE UN MATERIAL

La permeabilidad magnética es una característica que determina los niveles de la densidad de flujo magnético e intensidad de campo que se permiten dentro de un núcleo dado, es decir, la facilidad que el material da para que se desarrolle un campo magnético en el mismo. En un hecho esta característica va a depender del tipo de material utilizado para la fundición.

La permeabilidad magnética de un material difiere mucho si se compara con la permeabilidad del espacio libre o vacío. Así, se define la permeabilidad relativa del material que se expresa como:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1.19)$$

donde:

μ_r = permeabilidad relativa

μ_0 = permeabilidad en vacío

μ = permeabilidad magnética

La μ_0 que define la permeabilidad del vacío tiene el valor siguiente:

$$\mu_0 = 4 \times 10^{-7} \frac{H}{m} \quad (1.20)$$

Y entonces se tiene que la permeabilidad relativa define la facilidad con la cual se pueden magnetizar diferentes materiales. La densidad de flujo es descrita por la siguiente ecuación

$$\beta = \mu H = \frac{\mu Ni}{L_0} \quad (1.21)$$

1.7 MAGNETIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Se sabe que un material cualquiera está compuesto por átomos. Cada átomo puede considerarse formado por electrones que recorren órbitas alrededor de un núcleo central positivo, pero debemos de agregar que los electrones, a su vez, giran alrededor de sus propios ejes. Como consecuencia, se produce un campo magnético interno por la acción de los electrones que se mueven en órbitas alrededor del núcleo como en la figura 1.2 (a), o de los electrones que giran en sus ejes (espín), como en la figura 1.2 (b)

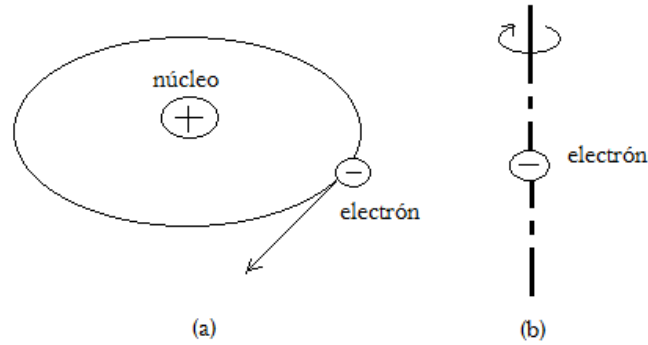


Fig. 1.2 (a) Electrón con movimiento orbital en torno al núcleo;
(b) espín del electrón.

Los dos movimientos electrónicos que se han descrito producen campos magnéticos internos B_i que son similares al campo magnético producido por un lazo de corriente, como se representa en la figura 1.3. La espira de corriente equivalente tiene un momento magnético de $\mathbf{m} = I_b S \mathbf{a}_n$, en donde S es el área de la espira e I_b es la corriente ligada (ligada al átomo).

Sin un campo externo $\boldsymbol{\beta}$ aplicado al material, la suma de \mathbf{m} y S es cero debido a la orientación aleatoria como en la figura 1.3(a). Cuando se aplica un campo externo $\boldsymbol{\beta}$, los momento magnéticos de los electrones se alinean más o menos por sí mismos con $\boldsymbol{\beta}$, de manera que el momento magnético neto no sea cero, como se ilustra en la figura 1.3(b). Si hay N átomos en un volumen dado Δv y el átomo de orden k tiene un momento magnético \mathbf{m}_k , se define la *magnetización* \mathbf{M} (en amperes/metro) como el momento magnético dipolar por unidad de volumen; es decir,

$$M = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\sum_{k=1}^N m_k}{\Delta v} \quad (1.22)$$

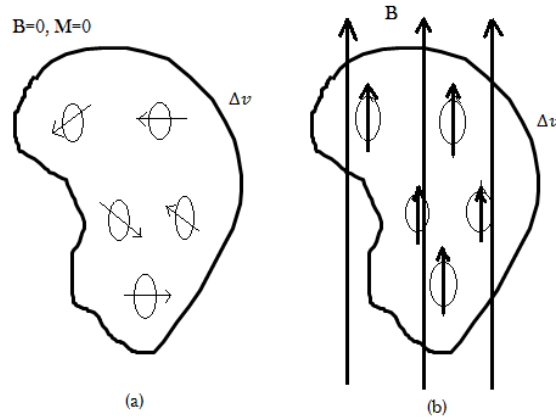


Fig.1.3 Momento magnético dipolar en un volumen Δv : (a) antes de aplicar β , (b) después de aplicar β .

Se dice que está magnetizado un medio para el cual \mathbf{M} no sea cero en todas partes. Para un volumen diferencial dv' , el momento magnético $d\mathbf{m} = \mathbf{M} dv'$. El potencial magnético vectorial debido a $d\mathbf{m}$ es:

$$dA = \frac{\mu_0 \mathbf{M} \times \mathbf{a}_R}{4\pi R^2} dv' = \frac{\mu_0 \mathbf{M} \times \mathbf{R}}{4\pi R^3} dv'$$

Si se sabe que:

$$\frac{\mathbf{R}}{R^3} = \nabla' \frac{1}{R}$$

Por lo tanto,

$$A = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \mathbf{M} \times \nabla' \frac{1}{R} dv' \quad (1.23)$$

Al utilizar la ecuación siguiente:

$$\mathbf{M} \times \nabla' \frac{1}{R} = \frac{1}{R} \nabla' \times \mathbf{M} - \nabla' \times \frac{\mathbf{M}}{R}$$

La sustitución de ésta en la ecuación (1.23)

$$A = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v'} \frac{\nabla' \times M}{R} dv' - \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v'} \nabla' \times \frac{M}{R} dv'$$

Al aplicar la identidad vectorial:

$$\int_{v'} \nabla' \times F dv' = - \oint_{S'} F \times dS$$

a la segunda integral, se obtiene:

$$\begin{aligned} A &= \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v'} \frac{\nabla' \times M}{R} dv' + \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{S'} \frac{M \times a_n}{R} dS' \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v'} \frac{J_b dv'}{R} + \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{S'} \frac{K_b dS'}{R} \end{aligned} \quad (1.24)$$

Si se tiene la ecuación (1.24) al suprimir las primas, se obtiene:

$$J_b = \nabla \times M \quad (1.25)$$

y

$$K_b = M \times a_n \quad (1.26)$$

En donde \mathbf{J}_b es la *densidad volumétrica de corriente latente o la densidad volumétrica de corriente de magnetización* (en amperes por metro cuadrado), \mathbf{K}_b es la *densidad superficial de corriente latente o ligada* (en amperes por metro), y a_n es un vector unitario normal de superficie. La ecuación (1.24) indica que el potencial de un cuerpo magnético se debe a una densidad de corriente volumétrica \mathbf{J}_b que existe en todo el cuerpo, y una corriente superficial \mathbf{K}_b que hay sobre la superficie del cuerpo. El vector M es análogo a la polarización P en los dieléctricos, y a veces se llama *densidad magnética de polarización* del medio. En otro sentido, M es análogo a H y ambos tienen las mismas unidades. A este respecto, como $J = \nabla \times H$, también se tiene que $J_b = \nabla \times M$.

Como se ve claramente en las ecuaciones (1.24) a (1.26), J_b y K_b pueden obtenerse de M ; por lo tanto, J_b y K_b no suelen utilizarse comúnmente.

En el vacío o espacio libre $\mu=1$ y se tiene:

$$\nabla \times H = J_f \quad \text{o bien} \quad \nabla \times \left(\frac{B}{\mu_0} \right) = J_f \quad (1.27)$$

en donde J_f es la densidad volumétrica de corriente libre. En un medio material $M \neq 0$, y como resultado, β cambia de tal manera que:

$$\begin{aligned} \nabla \times \left(\frac{B}{\mu_0} \right) &= J_f + J_b = J \\ &= \nabla \times H + \nabla \times M \end{aligned}$$

O sea,

$$\beta = \mu_0(H + M) \quad (1.28)$$

La relación que expresa la ecuación (1.28) es cierta para todos los materiales, lineales o no lineales. Para materiales lineales, M (en A/m) depende linealmente de H , de manera que:

$$M = X_m H \quad (1.29)$$

en donde X_m es una cantidad adimensional (la razón de M y H) a la que se llama *susceptibilidad magnética* del medio. Esto es una medida de que tan susceptible (o sensible) es el material a un campo magnético. La sustitución de la ecuación (1.29) en la ecuación (1.28) da:

$$\beta = \mu_0(1 + X_m)H = \mu H \quad (1.30)$$

o sea,

$$\beta = \mu_0 \mu_r H \quad (1.31)$$

en donde:

$$\mu_r = 1 + X_m = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1.32)$$

A la cantidad $\mu = \mu_0 \mu_r$ se le llama *permeabilidad* del material y se mide en henrys/metro. La cantidad adimensional μ_r es la razón de la permeabilidad de un material dado a la del vacío o espacio libre, y se conoce como la *permeabilidad relativa* del material.

Debe tenerse presente que las relaciones de las ecuaciones (1.29) a (1.32) solo se cumplen para materiales lineales e isotrópicos.

1.8 CURVA DE SATURACIÓN

El "efecto de saturación" es un efecto sumamente importante que define sobre medida el cambio de las características magnéticas del transformador. Con anterioridad se expuso el tema de permeabilidad magnética como la facilidad que muestra cierto material o espacio para que se pueda establecer un campo magnético.

En la figura 1.4 una curva presenta un grado de linealidad para un intervalo de valores determinado y también, muestran dobles extremos cuando se llega a un nivel de valores de coordenadas (H_0 , β_0).

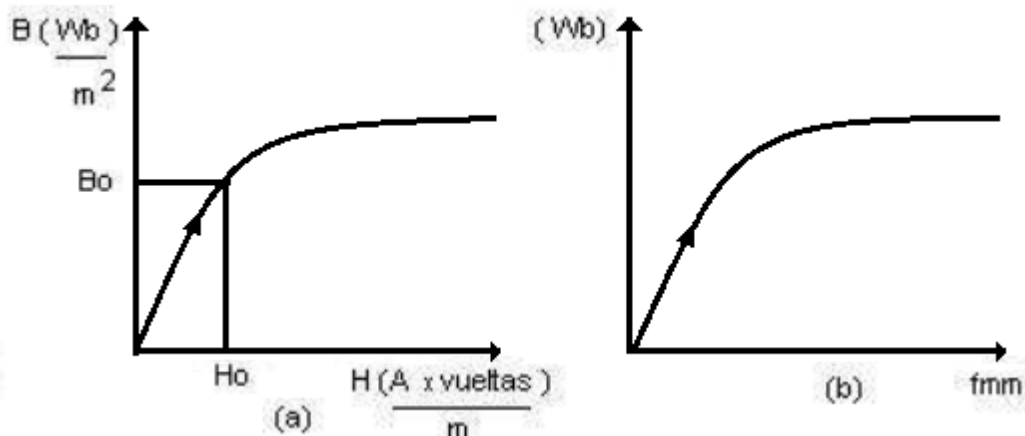


Fig. 1.4 Curvas de saturación. a) Dobles extremos cuando se llega a un nivel de valores H_0 y β_0 , b) Linealidad para un intervalo determinado de valores

Si un equipo es sometido a una fuente de alimentación de corriente continua (cc) entonces se tienen las curvas características de la figura 1.4. Como se sabe que la intensidad de campo magnético H es proporcional a la fuerza magnetomotriz fmm y la densidad de flujo magnético β es proporcional al flujo magnético f , entonces se tiene:

$$\beta = \mu H \quad (1.33)$$

Para establecer los esquemas de la figura 1.4, considerando la existencia de una proporcionalidad entre β y H que da por resultado una proporcionalidad entre f y la fmm

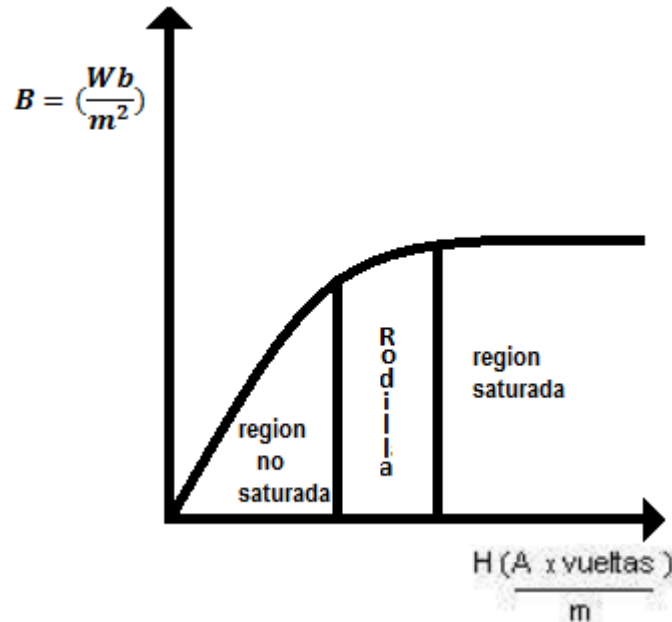


Fig. 1.5 Regiones de la curva de saturación.

La figura 1.5, muestra que existen tres regiones en una curva de saturación, la primer región define una curva casi lineal en donde la constante de proporcionalidad entre B y H es la permeabilidad magnética del material m que ya no cuenta como un valor constante debido a que se manejan condiciones reales para la magnetización del núcleo con la fuente de cc (la curva de saturación también recibe el nombre de curva de magnetización); en esta región se observa que con un incremento pequeño de intensidad de campo H , se logra un crecimiento considerable en la densidad de flujo magnético en el núcleo, o lo que es lo mismo, con una pequeña cantidad de campo de la figura 1.4.(b) se obtiene una gran elevación de flujo magnético.

La segunda región es de transición generalmente llamada "Rodilla de la curva" que es el paso entre la parte no-saturada y la saturada; es una zona delicada debido a que cualquier cambio de las características del núcleo dentro de la misma puede provocar un estado de saturación inequívoco.



La última región que se ve reflejada por un trazo casi horizontal demuestra que se necesitarán grandes niveles de fmm o \mathbf{H} para obtener cambios pequeños en la densidad de flujo magnético. La no linealidad de las últimas dos zonas crea graves problemas en el núcleo del transformador originando así, la variación de las características ideales establecidas. Por eso, es deseable que el operador se cuide de manejar el dispositivo antes de la región de saturación cuando se encuentra operando en la rodilla de la curva con la finalidad de obtener el mayor rendimiento.

1.9 INDUCTORES E INDUCTANCIAS

Un circuito (o trayectoria cerrada) por el que fluye una corriente I produce un campo magnético β que da origen a un flujo $\Psi = \int \beta dS$ que pasa por cada vuelta del circuito. Si el circuito tiene N vueltas idénticas, definimos el eslabonamiento de flujo λ como:

$$\lambda = N \Psi \quad (1.34)$$

Además, si el medio que circunda al circuito es lineal, el eslabonamiento de flujo λ es proporcional a la corriente I que lo produce; es decir,

$$\lambda \propto I \quad (1.35)$$

O sea, $\lambda = LI$

en donde L es una constante de proporcionalidad a la que se llama inductancia del circuito. La inductancia L es una propiedad de la disposición física del circuito. A un circuito, o parte del circuito, que tiene inductancia, se le llama inductor. Por las ecuaciones (1.34) y (1.35), podemos definir la inductancia L de un inductor como la razón de eslabonamiento del flujo magnético λ a la corriente I , que pasa por el inductor.

$$L = \frac{\lambda}{I} = \frac{N \Psi}{I} \quad (1.36)$$

La unidad de inductancia es el Henry (H) que es lo mismo que webers/ampere. Como el Henry es una unidad relativamente grande, las inductancias se expresan, por lo general, en miliHenrys (mH).

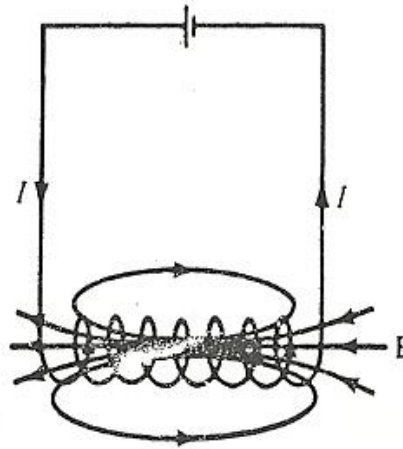


Fig. 1.6 Campo magnético β producido por un circuito

La unidad de inductancia es el Henry (H) que es lo mismo que webers/ampere. Como el Henry es una unidad relativamente grande, las inductancias se expresan, por lo general, en miliHenrys (mH).

La inductancia que define la ecuación (1.36) se conoce comúnmente como autoinductancia en vista de que los eslabonamientos son producidos por el inductor mismo. Al igual que la capacitancia, se puede considerar la inductancia como una medida de la cantidad de energía magnética que hay almacenada en un inductor. La energía magnética en (Joules) almacenada en un inductor se expresa en la teoría de los circuitos como:

$$w_m = \frac{1}{2}LI^2 \quad (1.37)$$

$$L = \frac{2w_m}{I^2} \quad (1.38)$$

En consecuencia, la autoinductancia de un circuito puede definirse o calcularse a partir de consideraciones de energía.

Si en vez de tener un circuito único se tienen dos circuitos que conduzcan las corrientes I_1 e I_2 como se muestra en la figura 1.7, existe una interacción magnética entre los circuitos. Se producen cuatro flujos componentes Ψ_{11} , Ψ_{12} , Ψ_{21} y Ψ_{22} . El flujo Ψ_{12} , por ejemplo, es aquel que

pasa por el circuito 1 debido a la corriente I_2 del circuito 2. Si B_2 es el campo, debido a I_2 , y S_1 es el área del circuito 1, entonces

$$\Psi_{12} = \int_{S_1} B_2 * dS \quad (1.39)$$

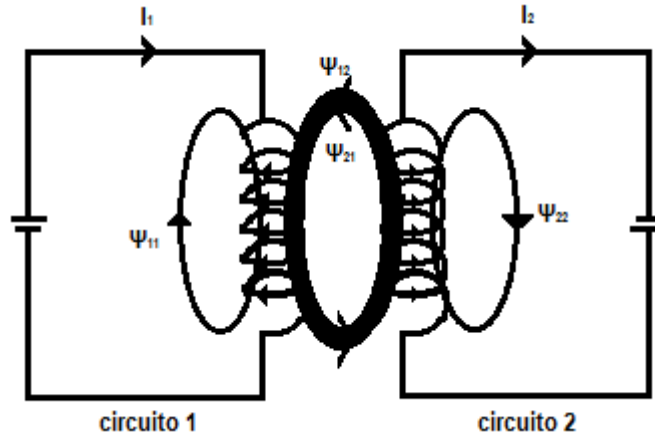


Fig. 1.7 Interacción magnética entre dos circuitos

La inductancia mutua M_{12} se define como la razón de eslabonamiento de flujo

$\lambda = N_1 \Psi_{12}$ en el circuito 1 debido a la corriente I_2 , es decir,

$$M_{12} = \frac{\lambda_{12}}{I_2} = \frac{N_1 \Psi_{12}}{I_2} \quad (1.40)$$

De modo similar, la inductancia mutua M_{21} se define como los eslabonamientos de flujo del circuito 2 por unidad de la corriente I_1 , es decir,

$$M_{12} = \frac{\lambda_{21}}{I_2} = \frac{N_2 \Psi_{21}}{I_1} \quad (1.40a)$$

Utilizando conceptos de energía, puede demostrarse, que si el medio que circunda a los circuitos es lineal (es decir, es ausencia de material ferromagnético),

$$M_{12} = M_{21} \quad (1.40b)$$

La inductancia mutua M_{12} o M_{21} se expresa en Henrys y no debe confundirse con el vector de magnetización M expresado en amperes/metro.

Las autoinductancias de los circuitos 1 y 2 se definen, respectivamente como:

$$L_1 = \frac{\lambda_{11}}{I_1} = \frac{N_1 \Psi_1}{I_1} \quad (1.41)$$

y

$$L_2 = \frac{\lambda_{22}}{I_2} = \frac{N_2 \Psi_2}{I_2} \quad (1.42)$$

En donde $\Psi_1 = \Psi_{11} + \Psi_{12}$ y $\Psi_2 = \Psi_{21} + \Psi_{22}$. La energía total en el campo magnético es igual a la suma de las energías que se deben a L_1 , L_2 y M_{12} es decir,

$$\begin{aligned} W_m &= W_1 + W_2 + W_{12} \\ &= \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 \pm M_{12} I_1 I_2 \quad (1.43) \end{aligned}$$

Se toma el signo positivo, si las corrientes I_1 e I_2 fluyen en tal forma que los campos de los dos circuitos se refuerzan entre sí. Si las corrientes fluyen en tal forma que sus campos magnéticos sean opuestos entre sí, se toma el signo negativo.

Como se mencionó antes, un inductor es un conductor dispuesto en forma apropiada para almacenar energía magnética. Algunos ejemplos típicos de inductores son los toroides, los solenoides, las líneas de transmisión coaxiales y las líneas de transmisión de hilos paralelos. La inductancia de cada uno de estos inductores puede determinarse, siguiendo un procedimiento similar al que se usa para determinar la capacitancia de un capacitor, tal como lo indica la tabla 1.

1.10 CIRCUITOS MAGNÉTICOS

El concepto de los circuitos magnéticos está basado en la resolución de algunos problemas de campo magnético por la aplicación del procedimiento de los circuitos. Los dispositivos magnéticos como transformadores, motores, generadores y relevadores, pueden considerarse como circuitos magnéticos. El análisis de estos circuitos se simplifica mucho si se aprovecha una analogía que existe entre los circuitos magnéticos y eléctricos. Una vez hecho esto, se pueden aplicar directamente los conceptos de los circuitos eléctricos para resolver los circuitos magnéticos análogos.

La analogía entre los circuitos magnéticos y los eléctricos se presenta en forma resumida en la tabla 2 y gráfica en la figura 1.8, donde se describe la fuerza electromotriz (fem) \mathcal{F} (en ampere-vueltas) se define por la expresión

$$\mathcal{F} = NI = \oint H * dl \quad (1.44)$$

La fuente de fmm en los circuitos magnéticos suele ser, generalmente, una bobina por la que fluye corriente como se representa en la figura 1.8. La reluctancia \mathcal{R} (en ampere-vueltas/weber) se define como:

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu S} \quad (1.45)$$

En donde l y S son la longitud media y el área de sección transversal del núcleo magnético, respectivamente. El recíproco de la reluctancia es la permeancia. La relación básica para los elementos del circuito es la ley de Ohm ($V=IR$):

$$\mathcal{F} = \Psi \mathcal{R} \quad (1.46)$$

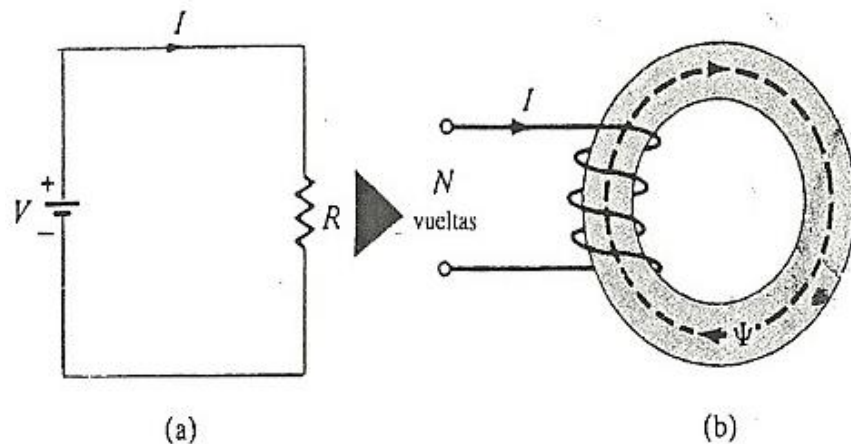


Figura 1.8 Analogía entre circuitos eléctricos y magnéticos

Con base a lo que se ha expuesto, pueden aplicarse las leyes de Kirchhoff de la corriente y tensión a los nodos y mallas de una circuito magnético determinado, del mismo modo que se hace en un circuito eléctrico. Las reglas que se han visto para la suma de tensiones y para combinar resistencia en serie y paralelo, también se cumplen para las fuerzas magnetomotrices y las reluctancias. Así, para n elementos en serie de un circuito magnético

$$\Psi_1 = \Psi_2 = \Psi_3 = \dots = \Psi_n \quad (1.47)$$

y

$$\mathbb{F} = \mathbb{F}_1 + \mathbb{F}_2 + \dots = +\mathbb{F}_n \quad (1.48)$$

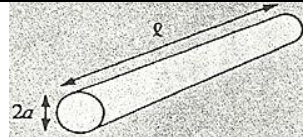
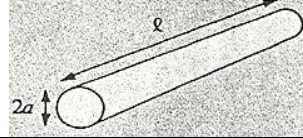
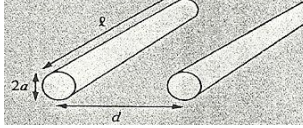
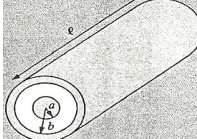
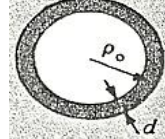
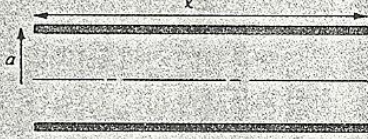
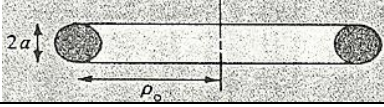
Para n elementos en paralelo de un circuito magnético

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2 + \dots + \Psi_n \quad (1.49)$$

y

$$\mathbb{F}_1 = \mathbb{F}_2 = \mathbb{F}_3 = \dots = \mathbb{F}_n \quad (1.50)$$

Tabla 1 Conjunto de fórmulas para inductancia de elementos comunes

Conjunto de fórmulas para inductancia de elementos comunes		
1. Alambre	$L = \frac{\mu_0 * l}{8\pi}$	
2. Cilindro Hueco	$L = \frac{\mu_0 * l}{2\pi} \left(\ln \frac{2 * l}{a} - 1 \right)$ $e \gg a$	
3. Alambres Paralelos	$L = \frac{\mu_0 * l}{\pi} \left(\ln \frac{d}{a} \right)$ $e \gg d, d \gg a$	
4. Conductor coaxial	$L = \frac{\mu_0 * l}{\pi} \left(\ln \frac{b}{a} \right)$	
5. Espira circular	$L = \frac{\mu_0 * l}{2\pi} \left(\ln \frac{4 * l}{d} - 2.45 \right)$ $e = 2\pi\rho_0, \rho_0 \gg d$	
6. Solenoide	$L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l}$ $e \gg a$	
7. Toro (sección transversal Circular)	$L = \mu_0 N^2 \left[\rho_0 - \sqrt{\rho_0^2 - a^2} \right]$	

Deben puntualizarse algunas diferencias que existen entre los circuitos eléctricos y los magnéticos. A diferencia de un circuito eléctrico en el cual fluye una corriente I , en el circuito magnético no sucede así, Por otra parte, la conductividad σ es independiente de la densidad de corriente J en un circuito eléctrico, mientras que la permeabilidad μ varía con la densidad de flujo B en un circuito magnético. Esto ocurre porque normalmente se emplean materiales ferromagnéticos (no lineales) en la mayoría de los dispositivos magnéticos del mundo de la práctica. No obstante las diferencias señaladas, el concepto de circuito magnético sirve como un análisis aproximado de los dispositivos magnéticos de la práctica.

1.11 EFECTO PARÁSITO

El material metálico que se somete al proceso de la fundición, tiene también ciertas propiedades conductoras como las del material que se utiliza para los embobinados, por tanto, a presencia de un flujo magnético en el núcleo origina corrientes que circulan a lo largo del mismo como se muestra en la figura 1.9.

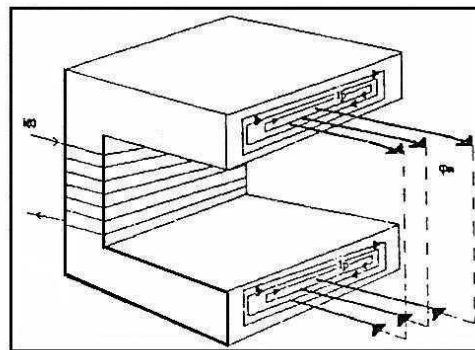


Figura 1.9 Ejemplo con un núcleo de transformador, para representar una circulación de flujo magnético.

El flujo se produce debido a una fmm aplicada por efecto de la circulación de una corriente total a lo largo de las “N” espiras del devanado, y el flujo de curvas cerradas del corte transversal, el flujo de curvas cerradas es la corriente inducida causada por la variación de las fluctuaciones magnéticas dentro del material y se le conoce con el nombre de “**corrientes parásitas**” o “**corrientes de Foucault**” o como se tratarán en este trabajo como “**corrientes de Eddy**”.

También se sabe que todo alambre de características conductivas se encuentra provisto de un cierto nivel de resistencia que determina el paso de corriente, en el caso del núcleo también tiene características conductivas y por lo tanto, adquiere un nivel relativo de resistencia.

La resistencia (reluctancia) es una propiedad que se presenta en cualquier dispositivo eléctrico provisto de núcleo, que es proporcional al tamaño de su sección transversal, a la resistividad del material con el que se construye y a la longitud de la trayectoria descrita por el flujo de las corrientes parásitas, limita el paso de las mismas ocasionando disipación de calor por efecto Joule y por supuesto, pérdidas de energía en el núcleo [2].

1.12 RESONANCIA ELÉCTRICA

Se define resonancia al comportamiento de un circuito con elementos inductivos y capacitivos, para el cual se verifica que la tensión aplicada en los terminales del mismo circuito, y la corriente absorbida, están en fase. La resonancia puede aparecer en todo circuito que tenga elementos L y C.

El fenómeno de resonancia se describe de manera aproximada como la condición que existe en todo sistema físico cuando una función forzada senoidal de amplitud fija, produce una respuesta de amplitud máxima. La condición de resonancia puede ser deseable o indeseable, según el propósito que se le va a dar al sistema físico.

En una red eléctrica de dos terminales que contenga al menos un inductor y un capacitor, se define la resonancia como la condición que existe cuando la impedancia en la entrada de la red es puramente resistiva.

Una red está en resonancia cuando la tensión y la corriente en las terminales de entrada de la red están en fase. También se producirá una respuesta de amplitud máxima en la red cuando se encuentra en la condición resonante.

El fenómeno de resonancia se manifiesta para una o varias frecuencias, dependiendo del circuito, pero no para cualquier frecuencia. Es por ello que existe una fuerte dependencia del comportamiento respecto de la frecuencia. Por ello la gran importancia de los circuitos sintonizados, (especialmente en el campo de las comunicaciones).

Generalmente se dice que un circuito está en resonancia cuando la tensión aplicada y la corriente están en fase, el factor de potencia resulta unitario.

Un circuito serie como se muestra en la figura (1.10), la impedancia se calcula como lo expresa la ecuación (1.51):

$$\bar{Z} = R_1 + j \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \quad (1.51)$$

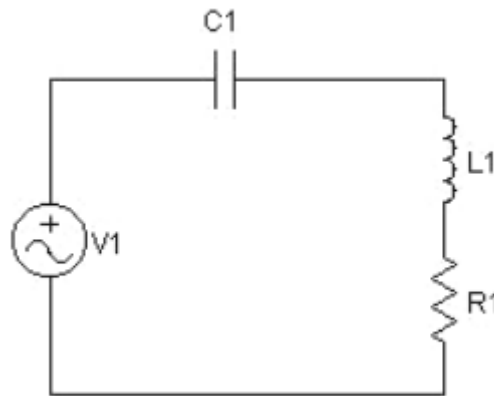


Fig. 1.10 Circuito Resonante Serie

Se traza el diagrama de tensiones y corrientes del circuito, se verificará que la tensión adelantará, atrasará o estará en fase con la corriente. Esto resulta evidente de la expresión anterior, en la cual, para algunas frecuencias se cumplirá que:

$$\omega L > \frac{1}{\omega C} \quad (1.52)$$

para otras frecuencias será:

$$\omega L < \frac{1}{\omega C} \quad (1.53)$$

En el primer caso, se comporta el circuito en forma inductiva, en el segundo, en forma capacitiva y, además, para alguna frecuencia, se cumplirá que:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (1.54)$$

Para este caso, el circuito se encontrará en resonancia, ya que la impedancia será resistiva pura. (tensión en fase con la corriente). Este tipo de circuito se denomina también Resonante en Tensiones, dado que los módulos de las tensiones en los componentes reactivos, son iguales pero opuestos en fase y se cancelan.

Los diagramas fasoriales son los que se muestra a continuación en la figura (1.11):

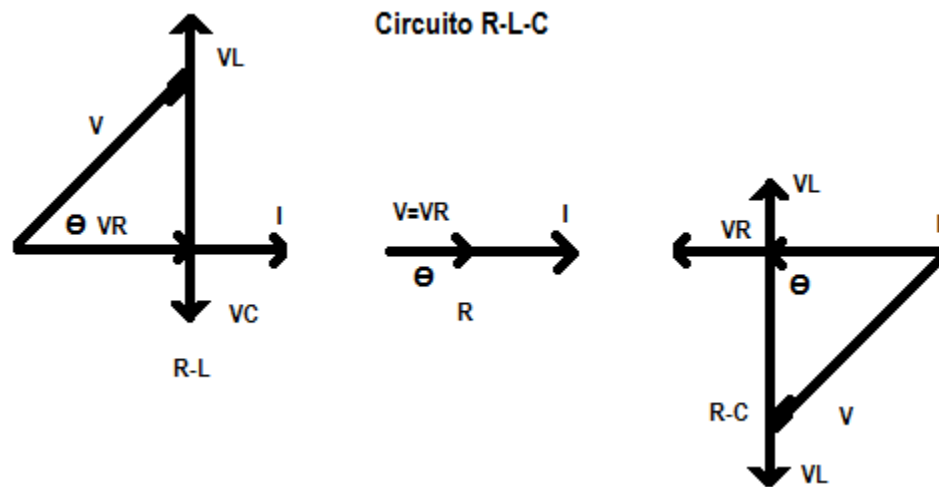


Fig. 1.11 Frecuencia de resonancia

Se puede observar que la componente imaginaria de la impedancia deberá ser nula, para que el circuito se comporte como resistivo puro. Para este caso simple, será:

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

si, $\omega_0 = 2\pi f_0$

Resulta

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.55)$$

Se ve en esta última expresión, que la frecuencia de resonancia, será siempre la misma en la medida que no cambie el producto LC.

Las distintas componentes de la impedancia en función de la frecuencia. La reactancia inductiva, X_L , será pues una recta con origen en cero.

La reactancia capacitiva, X_C , por su parte, será una hipérbola equilátera, es decir tendrá como asíntota horizontal al eje de las frecuencias.

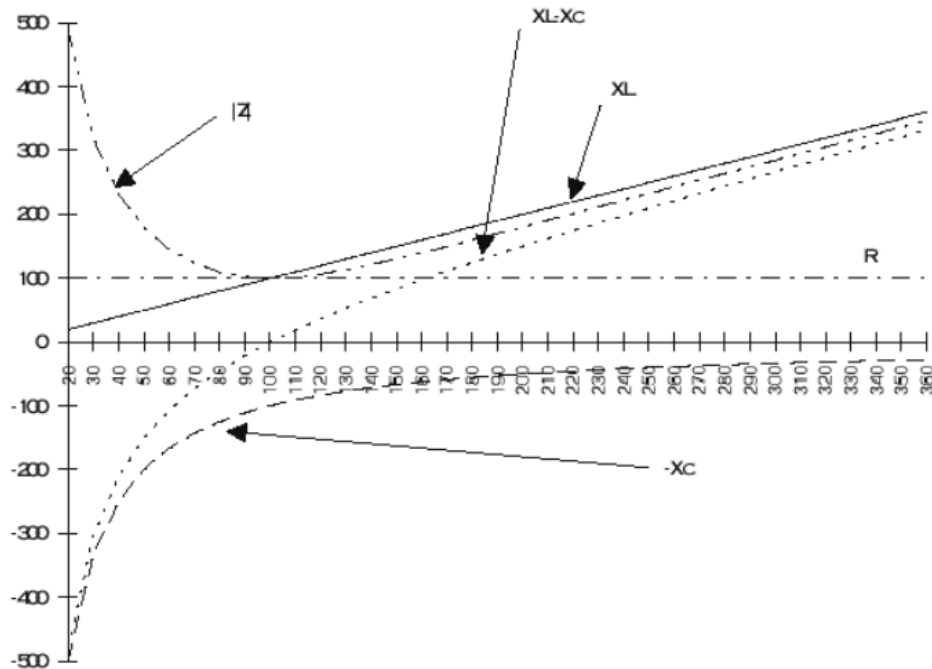


Fig. 1.12 Componente imaginaria de impedancia del circuito resonante

En la figura (1.12) se muestra la componente imaginaria de la impedancia del circuito,

$$\left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (1.56)$$

Finalmente se representa el módulo de la impedancia, es decir:

$$|\bar{Z}| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (1.57)$$

Prácticamente, la información más útil sobre el comportamiento del circuito a frecuencias cercanas a la de resonancia, se encuentra en la parte inferior (en forma de "V"), de la curva de la impedancia en función de la frecuencia. Por lo tanto, resulta útil representar la función inversa, es decir, la admitancia:

$$\bar{Y} = \frac{1}{\bar{Z}} \quad (1.58)$$

Además esta curva tendrá la misma forma que la corriente, si se excita el circuito con tensión constante, ya que:

$$I = V Y \quad (1.59)$$

La parte más importante se encuentra dentro de un intervalo comprendido en $\pm 10\% f_0$, donde f_0 es la frecuencia de resonancia, ya que a frecuencias mayores, las variaciones son muy pequeñas. Por último, conviene explicar también que en la gráfica se toma la frecuencia en coordenadas logarítmicas, lo cual es muy común cuando se grafican funciones de la frecuencia, ya que el espectro de los valores es muy amplio. Además aquí se tiene la ventaja adicional que el uso de coordenadas logarítmicas simetriza la curva respecto de la frecuencia de resonancia. En las figuras siguientes, observamos las curvas correspondientes al módulo y a la fase de la admitancia en la vecindad de la resonancia. Vemos en ellas que para frecuencias bajas, el comportamiento es capacitivo (fase 90°). Luego, el comportamiento capacitivo persiste pero en forma menos intensa (circuito RC), hasta la frecuencia de resonancia, donde el comportamiento es resistivo (fase 0°). Luego, el comportamiento se torna levemente inductivo, a medida que crece la frecuencia respecto de la resonancia (circuito RL), hasta que a frecuencias muy altas se torna fuertemente inductivo, circuito inductivo puro (fase -90°). Refiriéndonos ahora a la curva del módulo de la admitancia, se observa que a frecuencias muy bajas, resulta que dicho módulo es muy bajo, ya que la reactancia capacitiva es muy alta. En resonancia, el circuito presenta la impedancia mínima e igual a la resistencia, por lo que la admitancia será máxima e igual a la conductancia.

$$|\bar{Y}| = Y_0 = G = \frac{1}{R} \quad (1.60)$$

Por último, para frecuencias muy superiores a la de resonancia, la admitancia reduce su módulo, ya que la reactancia inductiva es muy alta, con lo cual la impedancia es también alta. Es interesante observar que si el circuito tiene una resistencia muy pequeña, la admitancia en resonancia tiende a infinito, lo mismo que la corriente. Si las pérdidas suben, sube R y, consecuentemente se reduce el módulo de admitancia en resonancia, por lo que la curva se aplasta. Resumiendo, si el Q del circuito es elevado, la curva es más aguda, mientras que si Q es



reducido, la curva resulta menos aguda. En lo que se refiere a la fase, la variación de la misma es mucho más rápida a valores de Q altos. La fase varía bruscamente, pasando de $+90^\circ$ a -90° . Todo esto pone de manifiesto que a valores de Q elevados, el fenómeno de resonancia se hace mucho más notorio que a valores bajos [3].

CAPÍTULO II

CLASIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS HORNOS ELÉCTRICOS

2.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el resultado de este largo recorrido en la industria de la fundición y la necesidad de producción en masa, es la concepción de modernos sistemas autónomos de producción en serie, que aportan a la industria ventajas como la disminución de costos, optimización de materia prima e implementación de métodos de producción más seguros, eficientes y amigables con el medio ambiente, entre otras ventajas.

En este capítulo se busca acercar al lector a la operación de la maquinaria eléctrica destinada a la fundición.

2.2 HORNOS DE ARCO

Los hornos de arco se emplean para la mayoría de las aplicaciones, incluyendo fusión de acero, latones, bronce y muchas aleaciones de níquel. El calentamiento por arco eléctrico es un tipo de calentamiento por plasma. Un arco eléctrico es creado cuando una corriente pasa a través de gas ionizado entre dos electrodos. Los hornos de arco se clasifican en dos grupos:

Hornos de calentamiento directo, se emplean en la fundición de hierro y acero.

Hornos de calentamiento indirecto, se emplean para fundición especiales de hierro y bronce.

2.2.1 HORNOS DE ARCO DE CALENTAMIENTO DIRECTO

Reciben este nombre porque el arco salta directamente entre el electrodo y el metal a fundir (figura 2.1). Los electrodos son de grafito o de carbón amorfo para soportar grandes

temperaturas. Los hornos de arco pueden ser monofásicos (capacidad de hasta 100 Kg) y trifásicos para mayores capacidades (hasta 150 toneladas).



Fig. 2.1. Horno de arco de calentamiento directo

Los electrodos se encuentran en los vértices de un triángulo equilátero. En los puntos en los que inciden al depósito se encuentran collares refrigerados con agua, que además de enfriar el electrodo en este punto, cierran las aberturas y evitan un efecto de chimenea excesivo.

2.2.2. HORNOS DE ARCO DE CALENTAMIENTO INDIRECTO

Reciben este nombre porque el arco salta entre dos electrodos de carbón completamente separados e independientes de la carga, que se calienta solo por radiación. Muchos de los hornos más antiguos eran de esta clase, pero el único superviviente de estos tipos de horno es el horno basculante de arco que se emplea con frecuencia para obtener fundiciones de hierro especiales, bronces y ocasionalmente aleaciones de níquel.

2.2.3. CAMPOS DE APLICACIÓN

En la actualidad después de una lenta introducción en la industria, se apreciaron sus ventajas en la fabricación de aceros especiales al carbón, hasta el punto de realizarse en hornos de arco la mayor parte de la producción en este campo.

2.2.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Las ventajas que presentan los hornos de arco son las siguientes:

- Alta capacidad de fundición de metales (1000 kg-150 toneladas).
- Altas temperaturas de operación (hasta 4000 °C).
- Su tamaño es menor al de los tradicionales.
- Su costo de instalación y operación es reducido.

Las desventajas que presentan los hornos de arco son las siguientes:

- Mano de obra calificada, en su operación.
- Potencia de operación elevada.
- Tiempo de vida de los electrodos relativamente corto.

2.3. HORNOS WHILOTE (ALTOS HORNOS)

El alto horno que trabaja con combustibles sólidos se emplea típicamente en la producción de hierro (figura 2.2), aunque también se usa en dimensiones más pequeñas para fundir cobre. No sirve para fundir latón o bronce, porque se produce una oxidación excesiva de cinc o estaño respectivamente.

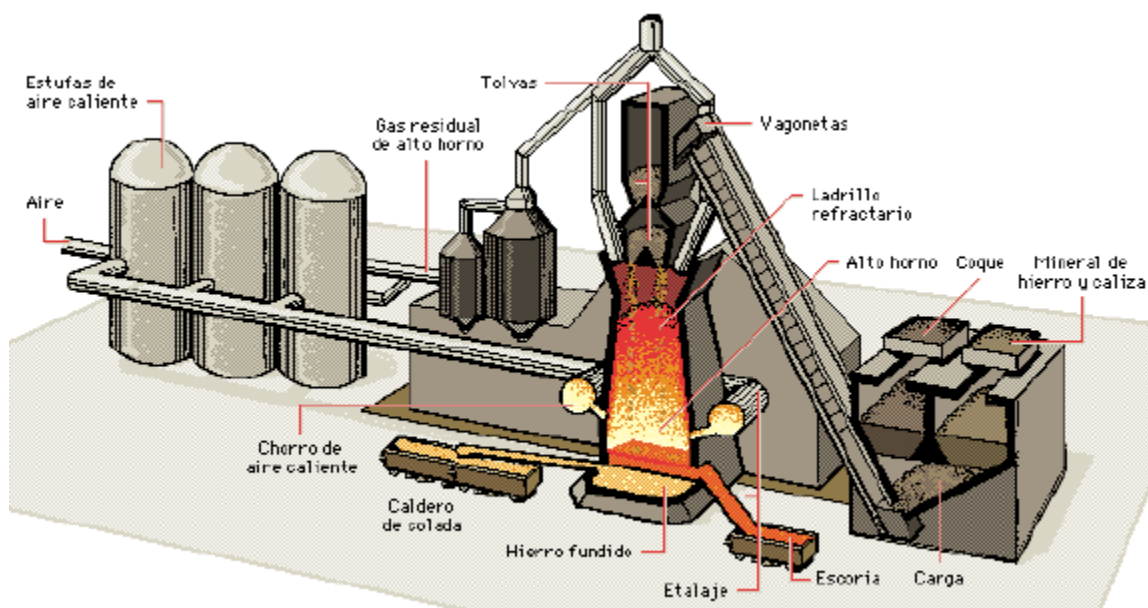


Fig. 2.2. Horno de Whilote



El alto horno consiste en una envuelta cilíndrica de acero que reposa verticalmente sobre una placa base sostenida por cuatro columnas o vigas de acero. Al principio se construían sobre una base de mampostería en vez de soportarlos por columnas. La envoltura de acero suele ser de chapa de aproximadamente de 3mm de espesor, y se construye por doblado o por soldadura.

El aire se suministra a la caja de viento mediante un ventilador y pasa al interior del horno a través de toberas que pueden estar situadas en la caja de viento o bajo ella. El número de toberas depende del tamaño del horno y es común disponer de una tobera por cada 15 cm de diámetro interno. La altura a que deben colocarse las toberas respecto al fondo depende de la capacidad que se necesite para el colado.

2.3.1. REVESTIMIENTO

El revestimiento del alto horno puede ser de ladrillos refractarios o de material apisonado, estos últimos se llaman también monolíticos. El espesor del revestimiento depende del tamaño del cubilote y de la duración de las coladas. En un funcionamiento normal, es decir, con cuatro a seis horas de colada por día, el espesor es de unos 114 mm. En muchos altos hornos el revestimiento entre las toberas y puerta de carga (tragante) es de espesor uniforme, pero cuando la distancia vertical entre toberas y tragante es relativamente pequeña, se le puede ensanchar para que la sección transversal sea mayor por encima de las toberas.

2.3.2. FUNCIONAMIENTO

En la conducción correcta del alto horno se empieza por encender un fuego sobre el fondo del horno y se añade coque en pequeñas cantidades hasta que alcance el nivel de las toberas, el fuego asciende progresivamente hasta que todo el coque este caliente, el aire es succionado a través de los agujeros de limpieza que se mantienen abiertos. Cuando el coque está bien encendido se cierra con arena el agujero de limpieza y se tapa con una placa de acero. Se añade más coque para alcanzar un lecho de altura requerida. Cuando el lecho está en su punto, se añaden las cargas para llenar el horno hasta el nivel del tragante. Se alternan las cargas de metal y coque. El fundente, que normalmente es caliza, se carga con el coque, cuando el cubilote está lleno comienza el soplado, y a los cinco o siete minutos debe verse pasar el metal líquido por delante de las toberas.

2.3.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Las ventajas que presentan los altos hornos son:

- Alta capacidad de carga.
- Alta resistencia a la corrosión.

Las desventajas que presentan los altos hornos son:

- Espacio físico del horno elevado.
- Gran cantidad de residuos sólidos y gaseosos provocados en la fundición.
- Alta concentración de gases de escape.

2.4. HORNOS DE RESISTENCIA

Se definen como hornos de resistencia (figura 2.3), a los equipos o dispositivos utilizados en la industria, en los que se calientan las piezas o elementos colocados en su interior por encima de la temperatura ambiente, se pueden clasificar en dos tipos:



Fig. 2.3. Horno de resistencia de calentamiento indirecto

- *Hornos de calentamiento directo*, la corriente eléctrica se hace pasar a través del material a calentar.

- *Hornos de calentamiento indirecto*, la corriente eléctrica se hace pasar por resistencias adaptadas independientes de la carga, el calentamiento se realiza a través de la transferencia de calor.

2.4.1. CAMPOS DE APLICACIÓN

Entre las aplicaciones metalúrgicas más comunes de los hornos de resistencia se encuentran:

- La fusión de metales no ferrosos.
- Tratamiento térmico para impartir determinadas propiedades.
- Recubrimiento de piezas con otros elementos.

2.4.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Las ventajas que presenta el horno de resistencia son:

- Baja concentración de gases de escape.
- Bajo mantenimiento de los equipos.

Las desventajas que presenta el horno de resistencia son:

- Relativa complejidad de construcción de las resistencias.
- Elevadas potencias de funcionamiento.

2.5. HORNOS DE INDUCCIÓN

El calentamiento por inducción se aplica industrialmente a la fusión de metales como el hierro (figura 2.4), de los cuales se clasifican en dos grupos:

- *Equipos con núcleo magnético*, se aplican a la fusión y mantenimiento de metales líquidos.
- *Equipos sin núcleo magnético*, se aplican fundamentalmente a la fusión (hornos de crisol).



Fig. 2.4. Horno de inducción sin núcleo magnético

2.5.1. EQUIPOS CON NÚCLEO MAGNÉTICO

Funcionan siempre a la frecuencia de la red y su comportamiento es idéntico al de un transformador, con el secundario formado por una espira en cortocircuito. Las pérdidas por efecto Joule en el primario y secundario coinciden con las pérdidas eléctricas en dichos arrollamientos. Interesa reducir estas pérdidas al mínimo para aumentar el rendimiento eléctrico del transformador.

2.5.2. EQUIPOS SIN NÚCLEO MAGNÉTICO

La corriente eléctrica que circula por el primario crea un campo magnético variable.

De acuerdo con la ley de Lenz, en toda sustancia conductora de electricidad que se encuentra sometida a un campo magnético variable, se induce una corriente eléctrica.

Esta corriente eléctrica inducida en la carga (naturaleza alterna), creará a su vez un campo magnético alterno que se opone al creado, en consecuencia:

- Las corrientes eléctricas en el primario y la carga son de sentido opuesto.
- Si la carga es maciza y de diámetro suficiente, el campo magnético será nulo en el centro y máximo en la superficie de la carga.



- La intensidad de corriente en la carga tendrá un máximo en la superficie anulándose en el centro.

La bobina inductora no es necesariamente un solenoide, pues todo inductor recorrido por una corriente periódica genera un campo magnético alterno, el cual da lugar a las corrientes inducidas en todo el cuerpo conductor. La configuración de los inductores depende de:

- La aplicación (Fusión, calentamiento, tratamiento térmico, etc.)
- La formación de la carga (palanquillas, barras, chapas, varillas, etc.)

El calentamiento por inducción pone en juego tres fenómenos físicos sucesivos pero prácticamente simultáneos:

- Transferencia de energía del inductor al cuerpo conductor.
- Transformación en el cuerpo conductor de la energía eléctrica en calor por efecto Joule.
- Transmisión de calor por conducción en el cuerpo.

2.5.3. CAMPOS DE APLICACIÓN

Las aplicaciones del calentamiento por inducción se pueden clasificar en:

- Fusión y mantenimiento a temperatura de colada de metales. Sus capacidades varían de unos cuantos kilogramos hasta 1500 toneladas.
- Calentamiento en toda la masa de los metales. Han desplazado a los hornos tradicionales de llamas en las instalaciones de producción en grandes series.
- Tratamientos térmicos, sobre todo en temple de aceros en la industria del automóvil.
- Soldadura de alta y baja temperatura de forma continua o intermitente.



2.5.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Las ventajas que presenta el calentamiento por inducción son las siguientes:

- El calor generado se encuentra en la carga.
- La inercia térmica de los equipos es reducida.
- Gran rapidez de calentamiento (elevada potencia en la carga.)
- Bajo ruido acústico en el funcionamiento de los equipos.
- Control de la potencia del equipo variando la frecuencia del sistema.

Las desventajas que presenta el calentamiento por inducción son las siguientes:

- Pérdidas por oxidación del material.
- Elevadas temperaturas de la bobina de inducción y equipos.
- Elevadas potencia de funcionamiento.
- Costos de instalación y energético moderadamente elevados.



CAPÍTULO III

SIMULACIÓN DEL ESQUEMA DE FUNDICIÓN PARA EL HORNO DE INDUCCIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se pretende, a través de la simulación de un modelo propuesto, puntualizar las características del horno de inducción bajo condiciones de operación.

3.2 PROPIEDADES DE LA CARGA

En el calentamiento por inducción se utilizan las propiedades de:

- Resistividad eléctrica.
- Permeabilidad magnética relativa.

En la transmisión de calor en la carga, aplicables a los cálculos de pérdidas de calor se aplican las propiedades de:

- Calor específico y entalpía.
- Conductividad térmica.
- Emisividad.

Estas propiedades, en conjunto, son función de la temperatura, por lo que se debe llevar documentación estadística.

3.2.1 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

En muchos metales la variación es lineal con la temperatura mediante la relación:

$$\rho = \rho_0 \cdot [1 + b(T - 20)].$$

Donde:

- ρ_0 = resistividad del metal puro estándar medido a 20 °C ($\Omega \cdot m$)
- b = coeficiente de resistividad ($^{\circ}C^{-1}$)
- T = temperatura de trabajo ($^{\circ}C$)

En la tabla 2 se muestran las resistividades y coeficientes de los materiales más usuales en la industria de la fundición.

Tabla 2. Resistividades y coeficientes de resistividad

Material	Resistividad ($\Omega \cdot m$) $\cdot 10^{19}$	Coficiente de resistividad ($^{\circ}C^{-1}$)
Aluminio (recocido)	28.28	0.0039
Cobre (recocido)	17.24	0.00393
Oro	24.4	0.0034
Hierro (99.99+%)	97.1	0.00651
Plomo (99.73+%)	206.48	0.00336
Magnesio (99.8%)	44.6	0.01784
Mercurio	958	0.00089
Níquel	68.4	0.0069
Nicrom (66%Ni+Cr y Fe)	1000	0.0004
Platino (99.99%)	106	0.003923
Plata (99.78%)	15.9	0.0041
Acero	175	0.0036
Wolframio	55.1	0.0045
Zinc	59.16	0.00419

En la figura 3.1 se aprecia que en los aceros y en la figura 3.2 en el níquel la variación es no lineal, variando irregularmente con la temperatura, debido al contenido del carbono y de otros elementos en los aceros aleados. Por encima de 800 °C, las resistividades se igualan.

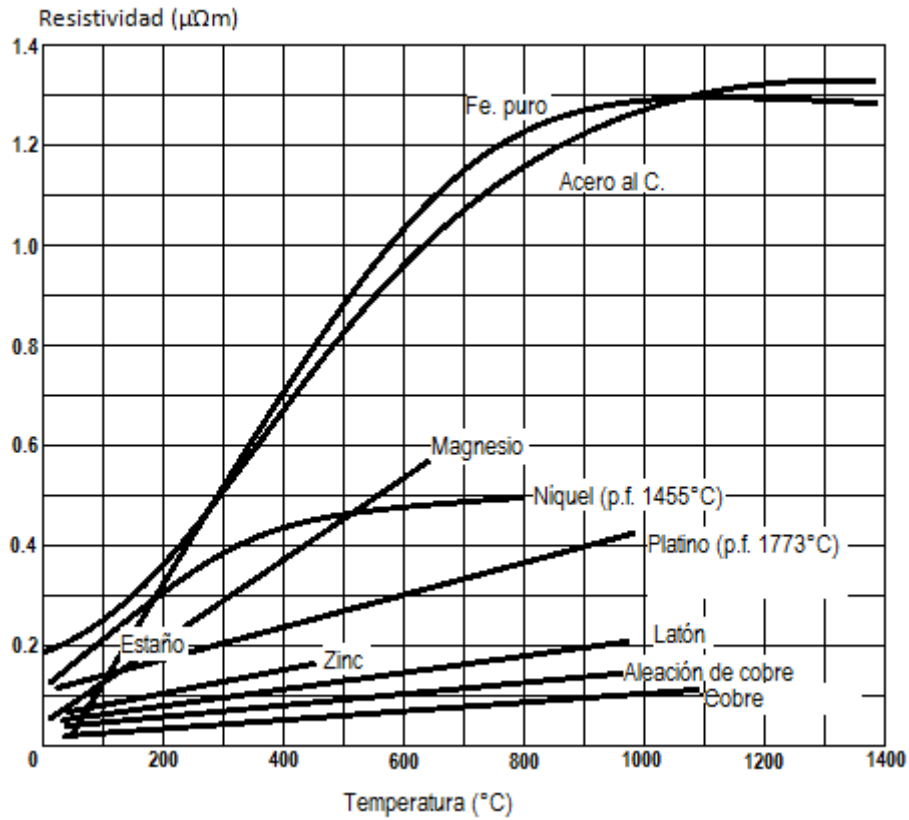


Fig. 3.1. Resistividad de metales

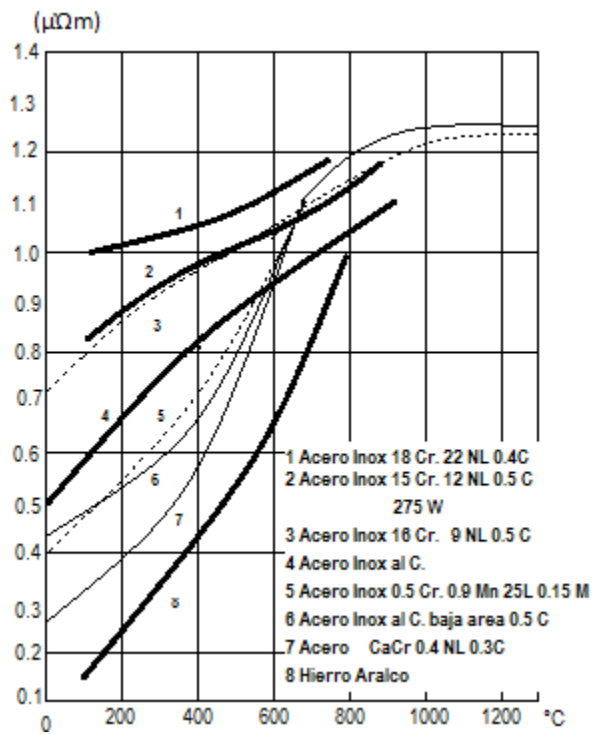


Fig. 3.2 Resistividad de diferentes aceros

3.2.2 PERMEABILIDAD MAGNÉTICA

La permeabilidad magnética en materiales amagnéticos es uno, pero se alcanza valores elevados en materiales ferro magnéticos y aleaciones de níquel. La permeabilidad magnética está relacionada con la permeabilidad magnética del vacío $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$, mediante la expresión $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$.

La variación depende de varios factores: temperatura, composición química, impurezas accidentales, intensidad del campo magnético. El punto de Curie se establece en 730-750°C para el acero.

En la tabla 3 se muestra la permeabilidad magnética máxima de materiales ferrosos.

Tabla 3. Permeabilidad magnética máxima de materiales ferrosos

Material	Permeabilidad relativa máxima (μ_r)
Hierro puro	14000
Acero dulce	2000
Acero templado	100
Fundición de hierro	300-900

3.2.3 CALOR ESPECÍFICO Y ENTALPÍA

El calor específico interviene directamente en el cálculo del tiempo de calentamiento. Es una función de la temperatura, en los aceros hay variaciones importantes debido a la composición química del mismo, por este motivo es preferible operar con las entalpías entre las temperaturas límites que determinan el calor específico medio. En la tabla siguiente se muestra la variación del calor específico para dos tipos de aceros.

En la tabla 4 se muestran los valores correspondientes al calor específico de los aceros.

Tabla 4. Calor específico de aceros en KJ/Kg-K

Temperatura (°C)	Acero 0.2%C	Acero inoxidable 19/9
50-100	0.486	0.511
150-200	0.519	0.532
250-300	0.557	0.548
350-400	0.599	0.569
450-500	0.662	0.595
550-600	0.749	0.649
650-700	0.846	0.624
750-800	0.950	0.641
850-900	0.649	0.641
950-1000	0.649	0.649
1050-1100	0.649	0.662
1150-1200	0.666	0.674
1250-1300	0.687	0.682

La entalpía de los aceros también depende de la composición química, especialmente por encima de 750 °C. En la figura siguiente se indica las curvas de entalpía correspondientes a tres tipos de aceros al carbono y un acero inoxidable amagnético. El aumento en los aceros al carbono explica las fuertes diferencias en los calores específicos a temperaturas entre 700 y 800 °C.

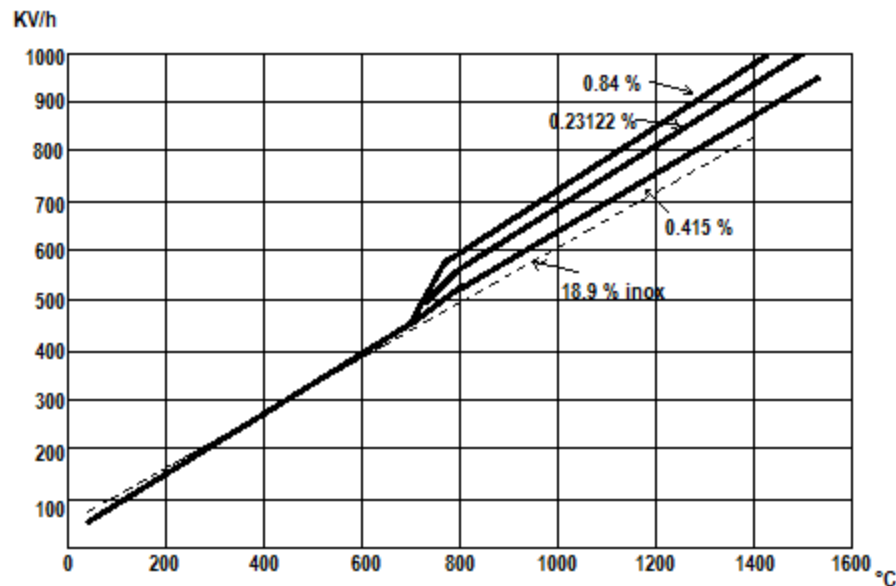


Fig. 3.3 Entalpía de diferentes aceros

3.2.4 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Se utiliza en el cálculo de la transmisión de calor por conducción desde la periferia (profundidad de penetración) hacia el resto de la carga. En el gráfico de la figura 3.4 se muestra la conductividad de aceros al carbono y un inoxidable.

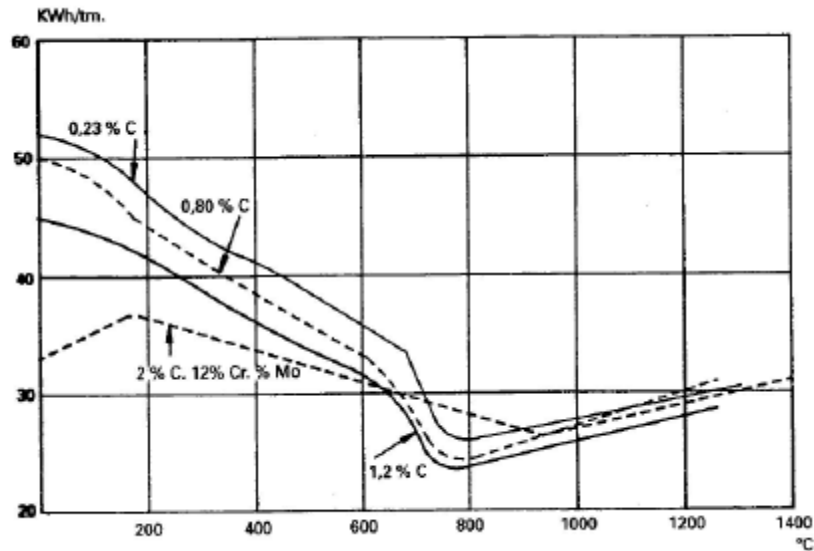


Fig.3.4 Conductividad térmica de aceros

3.2.5 EMISIVIDAD

Interviene en el cálculo de pérdidas por radiación. Esta propiedad depende mucho del estado superficial, pudiendo variar, en el mismo metal, de 0.05 hasta 0.85. A continuación se dan valores típicos para varios metales:

En la tabla 5 se muestran los valores de emisividad de varios metales.

Tabla 5. Emisividad de varios metales

Material	Emisividad
Cobre pulido a 20 °C	0.03
Cobre oxidado	0.73
Cobre negro oxidado	0.75
Aluminio brillante laminado	0.04
Acero brillante a 150 °C	0.13
Acero moldeado a 100 °C	0.80
Acero fuertemente oxidado	0.85
Acero refractario oxidado	0.64

3.3 HORNOS DE INDUCCIÓN DE CRISOL

El esquema del horno de inducción (figura 3.5) consta de una bobina inductora de forma cilíndrica que se reviste interiormente de un material refractario, dejando espacio para el crisol donde se funde la carga. Este conjunto va dispuesto dentro de una estructura metálica de gran rigidez. En hornos de capacidad reducida, como el que está instalado en el laboratorio, la estructura metálica es amagnética (aluminio, latón). En hornos de gran capacidad, la estructura metálica es de acero, lo que implica la instalación de núcleos magnéticos que recojan el flujo magnético desde el exterior para evitar calentamientos en la estructura.

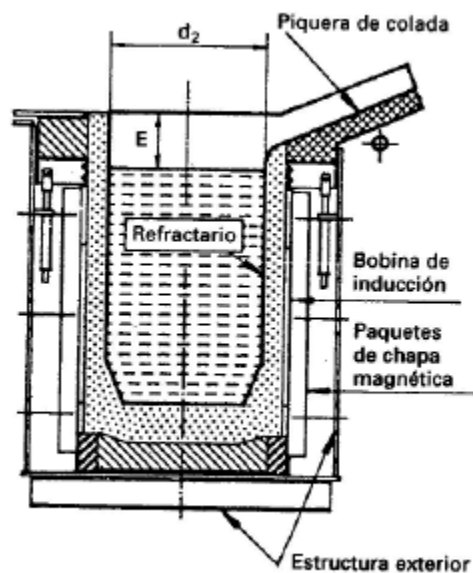


Fig. 3.5 Esquema de horno de inducción

La corriente eléctrica aplicada a la bobina puede ser de frecuencia de red (50 Hz) y de media frecuencia (150 a 3000 Hz). Frecuencias mayores son muy escasas a nivel industrial. La capacidad del horno varía desde 0.2 Kg de aluminio hasta 50-60 Ton de acero o bronce, pudiéndose llegar a las 100 Ton.

3.3.1 CAPACIDAD Y FRECUENCIA

Se aplica el concepto de profundidad de penetración, por lo que se supone que el diámetro de la carga fundida debe ser varias veces superior el valor de dicha profundidad. El factor de multiplicación está en relación directa con el rendimiento eléctrico que se quiera conseguir. En equipos de media frecuencia, el transformador principal se conecta a través de un convertidor cuyo rendimiento es de 94 a 97%, por lo que el factor de multiplicación es del orden de 5 a 10. El material de la carga también influye en este factor, debido a los valores de resistividad, y si ésta es baja (Cu o Al) el factor se eleva.

Para llegar a la fusión, es necesario que las piezas individuales de la carga tengan un tamaño suficiente, de acuerdo a las anteriores consideraciones, aunque el espesor puede bajar hasta 3 veces la profundidad de penetración.

Basta con medidas en dos dimensiones. Para una frecuencia de 1000 Hz se recomienda 10 mm para aceros y fundiciones, 4 mm para Cu, 7 mm para latones y 5 mm para Al. Esto demuestra que se puede fundir virutas pero se recomienda (dada por el fabricante) que el pie de colada no debe ser inferior al 30% de la capacidad del crisol. Además queda definida que la relación altura/colada es de 1.5, se define la capacidad mínima del horno en función de la frecuencia, lo que implica también la potencia transmitida a la carga.

3.3.2 AGITACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La corriente eléctrica inducida en la carga es paralela y de sentido inverso a la corriente de la bobina inductora, por lo que se produce una fuerza de repulsión entre ambas. Esta fuerza se ejerce sobre el metal fundido dando lugar a la formación de un menisco y la aparición de una fuerza metalostática para compensar la fuerza electromagnética. Este mecanismo se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$h = 3.22 \cdot 10^{-5} \frac{P_S}{\delta} \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot f}} \quad (m)$$

donde:

- P_s = potencia específica (W/m^2)
- δ = densidad (Kg/m^3)
- ρ = resistividad ($\Omega \cdot m$)
- f = frecuencia (Hz)

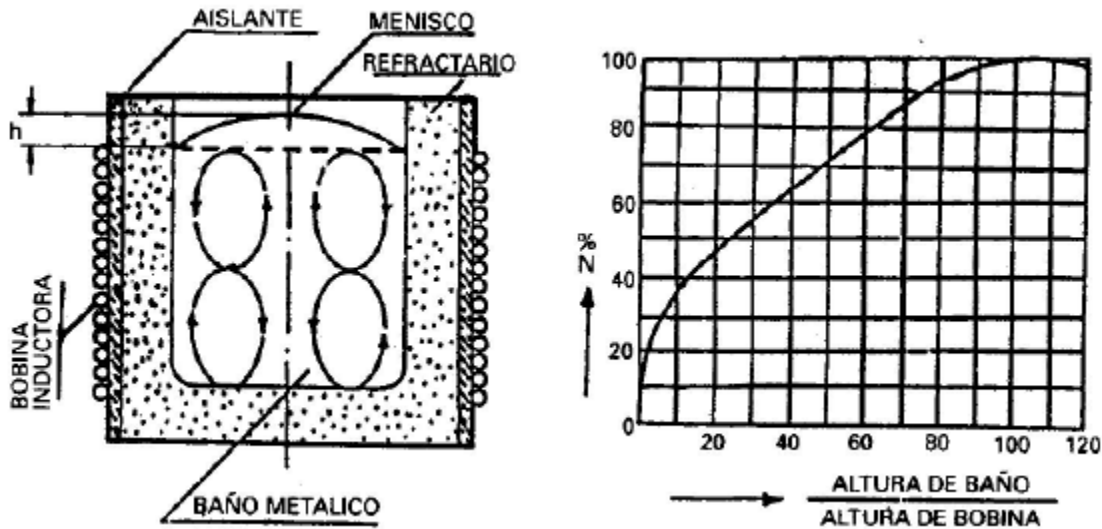


Fig. 3.6 Esquema y utilización de la potencia del horno en función del nivel de llenado con hierro fundido.

La agitación puede interesar para introducir carga ligera o adiciones de baja densidad como grafito o carburo. Es necesaria poca agitación cuando hay oxidación de la colada como en los aceros inoxidables. En los hornos de media frecuencia el circuito resonante del horno se adapta a las condiciones variables de la carga, por lo que es posible aplicar potencia nominal durante todo el periodo de fusión (figura 3.6).

3.3.3 RELACIÓN ENTRE CAPACIDAD, POTENCIA Y FRECUENCIA

Capacidad y frecuencia relacionadas con profundidad de penetración y agitación electromagnética llevan a definir valores de potencia específica en función de la capacidad para diferentes frecuencias. Para aceros y fundiciones, para una frecuencia de 1000 Hz, una capacidad

de 0.2 a 2 Ton se emplea 1300 KWh/Ton. La potencia del horno viene determinada por la producción requerida en Ton/h, el consumo específico medio en KWh/Ton, y el factor de utilización de la potencia que depende del tipo de chatarra, tiempos muertos de carga y descarga, adiciones, mediciones y análisis, colada, limpieza. Con la potencia requerida y la potencia específica máxima se determina para cada frecuencia la capacidad mínima del crisol. Se introduce el concepto de agitación de la colada para conseguir una uniformidad de temperatura y composición y facilitar la absorción de material menudo como virutas. El factor de agitación es función de la potencia, la capacidad mínima y máxima se determina a partir de los coeficientes de agitación correspondientes a cada metal y tipo de chatarra (figura 3.7).

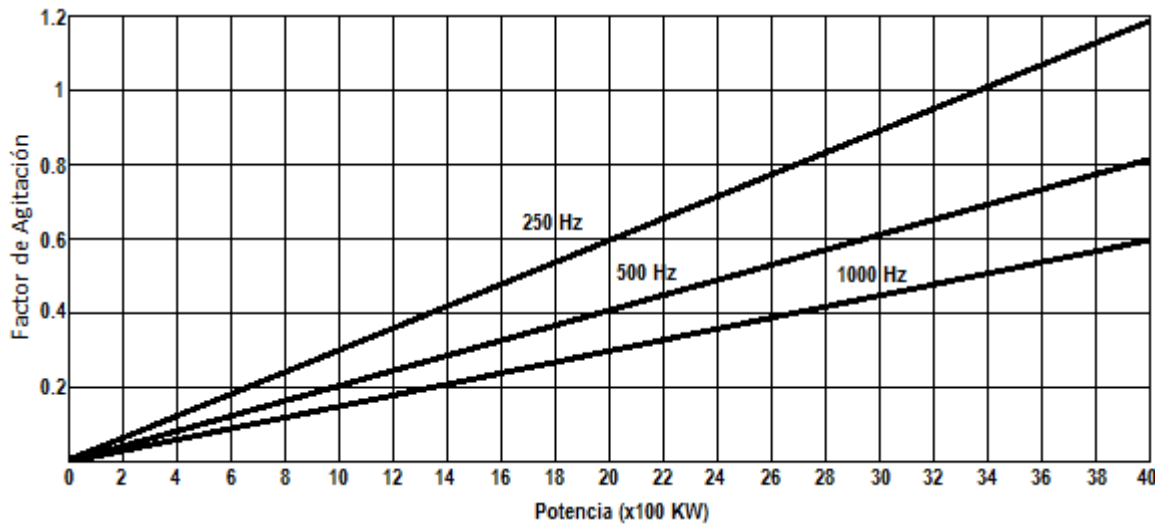


Fig.3.7 Potencia y factor de agitación en media frecuencia

Para calcular las capacidades máxima y mínima se divide el factor de agitación correspondiente a la potencia en una frecuencia dada, para la gama recomendada por el fabricante. A continuación se muestra en la tabla 6 los valores sugeridos por fabricantes:

Tabla 6. Coeficientes de agitación y tipos de chatarra

Metal	Gama recomendada
Acero	0.06-0.125
Fundición gris	0.125-0.2
Fundiciones aleadas	0.1-0.15
Bronce	0.07-0.125
Aluminio y aleaciones	0.05-0.2

3.4 MODELO APLICADO PARA LA SIMULACIÓN

Para la simulación del esquema de fundición se utilizó un equipo con capacidad igual o mayor a 100 kg de carga metálica, esto con fines exclusivamente de cálculo que se desarrolla a continuación.

Cálculo de la Resistencia

Para calcular la resistencia de la carga metálica se propuso partir de la fórmula de la densidad:

$$D = \frac{m}{v} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Despejando a v para obtener el volumen tenemos:

$$v = \frac{m}{D} \quad (3.1)$$

donde:

D = Densidad [kg/m^3]

m = masa [kg]

v = volumen [m^3]

A su vez, por la forma geométrica del crisol refractario sabemos que su volumen corresponde a la siguiente expresión:

$$v_{crisol} = A \times h \quad [m^3] \quad (3.2)$$

donde:

v_{crisol} = volumen del crisol [m^3]

A = sección transversal de la cara del crisol [m^2]

h = altura del crisol [m]

si sabemos que la resistencia de un material eléctrico está dada por:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3.3)$$

R = resistencia total del material [Ω]

ρ =resistividad del material a 20°C [$\Omega \cdot m^2/m$]

l = longitud del material [m]

A = sección transversal [m^2]

Haciendo la analogía aplicada al sistema sustituimos la longitud en la ecuación (3.3), por la altura del material dentro del contenedor (figura 3.8):

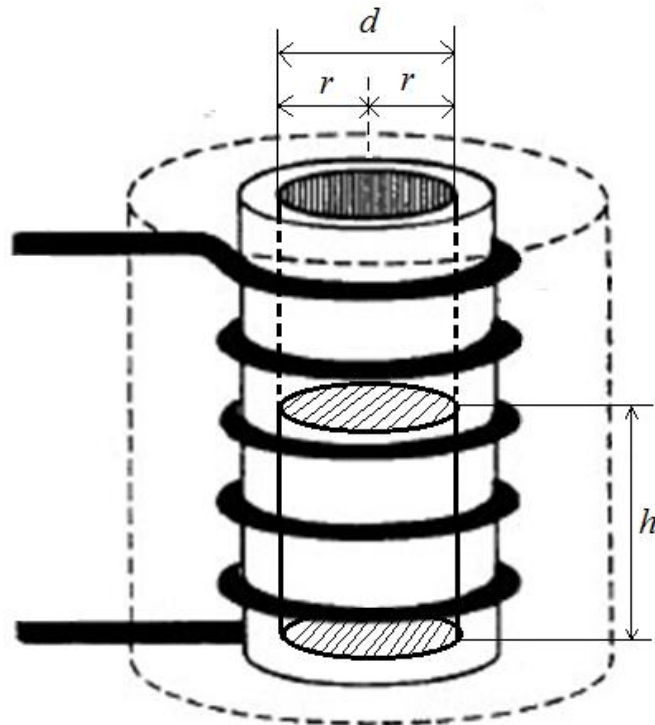


Fig.3.8 Esquema representativo del material dentro del crisol refractario.

$$R = \rho \frac{h}{A} \quad (3.4)$$

R = resistencia total del material [Ω]

ρ =resistividad del material [$\Omega \cdot mm^2/m$]

h =altura del material alojado dentro del refractario [m]

A = sección transversal [m^2]

De acuerdo a la forma del material refractario la sección transversal, sustituyendo en (3.4) se tiene:

$$R = \rho \frac{h}{\pi \cdot r^2} \quad (3.5)$$

donde:

$r = \text{radio de referencia [m]}$

Sustituyendo en la ecuación (3.1), el equivalente al volumen del crisol que hace referencia a la ecuación (3.2), tenemos:

$$(\pi \cdot r^2) \times h = \frac{m}{D} \quad (3.6)$$

Despejando, se define la fórmula (3.6) en función de la altura del material alojado dentro del refractario, de la siguiente manera:

$$h = \frac{m}{D(\pi \cdot r^2)} \quad (3.7)$$

Sustituyendo en la ecuación (3.7) en la ecuación (3.5), se obtuvo que:

$$R = \rho \frac{\frac{m}{D(\pi \cdot r^2)}}{(\pi \cdot r^2)}$$
$$R = \rho \frac{m}{Pe(\pi^2 \cdot r^4)} \quad (3.8)$$

A su vez se debe de considerar la temperatura de fundición para el valor de ρ que está definida a para 20°C, para cualquier temperatura, que está en función de la siguiente fórmula:

$$\rho_{\text{corregida}} = \rho \cdot [1 + b(T - 20)] \quad (3.9)$$

donde

$\rho = \text{resistividad del metal puro estándar medido a } 20^\circ\text{C } (\Omega \cdot \text{m})$

$b = \text{coeficiente de resistividad } (^\circ\text{C}^{-1})$

$T = \text{temperatura de trabajo } (^\circ\text{C})$

Finalmente tenemos que la resistencia del material a fundir se define a partir de la siguiente ecuación:

$$R = \rho \cdot [1 + b(T - 20)] \cdot \left[\frac{m}{D(\pi^2 \cdot r^4)} \right] \quad (3.10)$$

Donde la resistencia del material a fundir, está en función de sus características, como es la resistividad eléctrica, su peso específico y su masa, y por las dimensiones de la entrada del crisol refractario que es constante, dependiendo de la capacidad del equipo y la temperatura de operación.

3.5 SIMULACIÓN DEL ESQUEMA DE FUNDICIÓN

Los materiales empleados para la simulación fueron hierro fundido, acero fundido y níquel.

Para ello se tomaron en cuenta las características más importantes para el proceso de fundición, como la resistencia y la inductancia propia del material, derivadas de variables como son temperaturas de fundición, permeabilidad magnética, peso específico y masa del material.

Para llevar a cabo la simulación se tomaron datos extraídos de tablas y gráficas cuyas fuentes más adelante son especificadas, para calcular los parámetros de resistencia y curvas de saturación características. En la tabla 7 se muestran las resistividades y coeficientes de resistividad y en la figura 3.9 las curvas de saturación de algunos materiales metálicos.

Tabla 7. Resistividades y coeficientes de resistividad

Material	Resistividad ($\Omega \cdot m$) $\cdot 10^{-9}$	Coefficiente de resistividad ($^{\circ}C^{-1}$)
Aluminio (recocido)	28.28	0.0039
Cobre (recocido)	17.24	0.00393
Oro	24.4	0.0034
Hierro (99.99+%)	97.1	0.00651
Plomo (99.73+%)	206.48	0.00336
Magnesio (99.8%)	44.6	0.01784
Mercurio	958	0.00089
Níquel	68.4	0.0069
Nicrom (66%Ni+Cr y Fe)	1000	0.0004
Platino (99.99%)	106	0.003923
Plata (99.78%)	15.9	0.0041
Acero	175	0.0036
Wolframio	55.1	0.0045
Zinc	59.16	0.00419

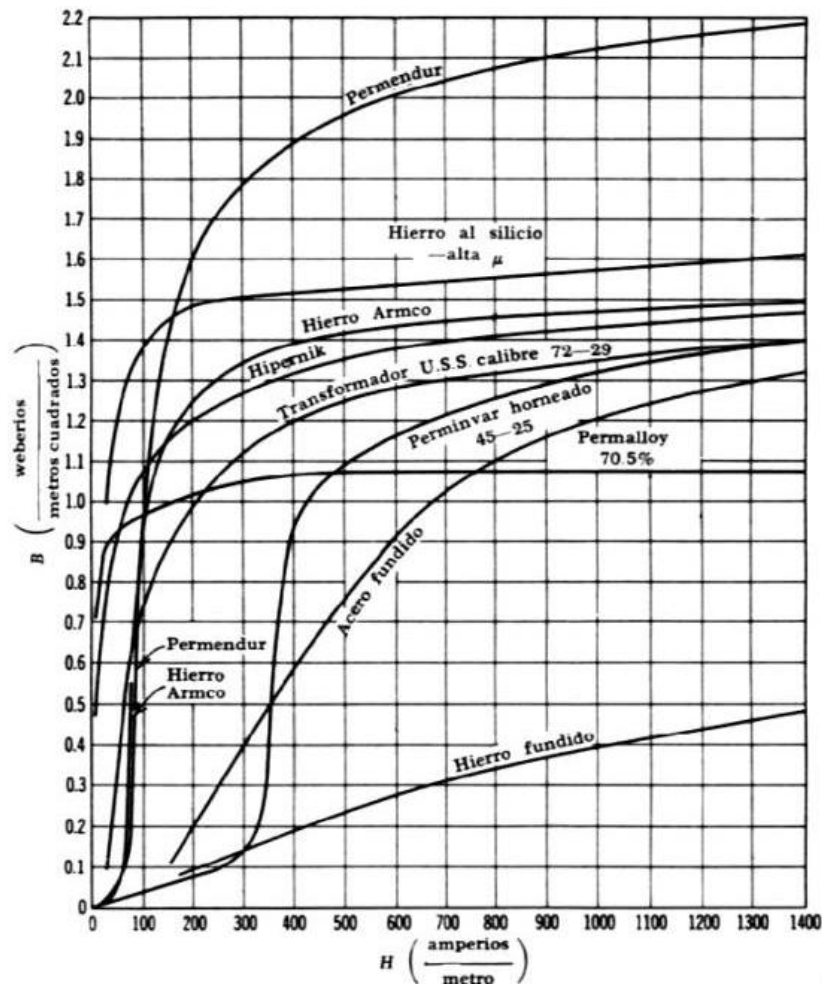


Fig.3.9 Curvas de saturación de algunos materiales metálicos [4].



ACERO.

Datos:

$$\rho = 107 \times 10^{-9} [\Omega \cdot m]$$

$$b = 0.0036 [^{\circ}C^{-1}]$$

$$\text{Temperatura de fusión} = 1650^{\circ}C$$

$$m = 50 \text{ kg}$$

$$D = 7850 \text{ kg}/m^3$$

$$r = 210 \text{ mm}/2 = 105 \text{ mm} = 0.105 \text{ m}$$

Cálculo de la resistencia.

$$R = \rho \cdot [1 + b(T - 20)] \cdot \left[\frac{m}{Pe(\pi^2 \cdot r^4)} \right]$$

$$\begin{aligned} R &= (107 \times 10^{-9}) \cdot [1 + (0.0036)(1650 - 20)] \cdot \left[\frac{50}{7850(3.1416^2 \times 0.105^4)} \right] \\ &= 3.90 \times 10^{-6} [\Omega] \end{aligned}$$

HIERRO.

Datos:

$$\rho = 97.1 \times 10^{-9} [\Omega \cdot m]$$

$$\alpha = 0.00651 [^{\circ}C^{-1}]$$

$$\text{Temperatura de fusión} = 1480^{\circ}C$$

$$m = 50 \text{ kg}$$

$$D = 7800 \text{ kg}/m^3$$

$$r = 210 \text{ mm}/2 = 105 \text{ mm} = 0.105 \text{ m}$$

Cálculo de la resistencia.

$$R = \rho \cdot [1 + b(T - 20)] \cdot \left[\frac{m}{Pe(\pi^2 \cdot r^4)} \right]$$

$$\begin{aligned} R &= (97.1 \times 10^{-9})(1 + (0.00651)(1480 - 20)) \cdot \left[\frac{50}{7800(3.1416^2 \times 0.105^4)} \right] \\ &= 5.45 \times 10^{-6} [\Omega] \end{aligned}$$



NIQUEL.

Datos:

$$\rho = 68.4 \times 10^{-9} \text{ } [\Omega \text{m}^2 \cdot \text{m}]$$

$$b = 0.0069 \text{ } [^{\circ}\text{C}^{-1}]$$

$$\text{Temperatura de fusión} = 1455^{\circ}\text{C}$$

$$m = 50 \text{ kg}$$

$$D = 8900 \text{ kg/m}^3$$

$$r = 210\text{mm}/2 = 105\text{mm} = 0.105\text{m}$$

Fuente: www.uam.es.mx

Cálculo de la resistencia.

$$R = \rho \cdot [1 + b(T - 20)] \cdot \left[\frac{m}{\rho_e(\pi^2 \cdot r^4)} \right]$$

$$\begin{aligned} R &= (68.4 \times 10^{-9}) \cdot [1 + (0.0069)(1455 - 20)] \cdot \left[\frac{50}{8900(3.1416^2 \times 0.381^4)} \right] \\ &= 2.01 \times 10^{-8} [\Omega] \end{aligned}$$

Cálculo de Reluctancias

La reluctancia de un material ferromagnético, se obtiene a partir de sus características geométricas del material, es decir la longitud media ℓ y la sección S . Si μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío, la permeabilidad magnética del material ferromagnético μ será:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}; \quad \mu = \mu_r * \mu_0$$

Para el caso del acero fundido, la reluctancia del material \mathfrak{R}_{AC} se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\mathfrak{R}_{AC} = \frac{\ell_{ac}}{\mu_{ac} * S_{ac}}$$



dónde:

ℓ_{ac} = Longitud media, para este caso se considera igual a la altura h_{ac} del material a fundir dentro del crisol calculada con la fórmula:

$$\ell_{ac} = h_{ac} = \frac{m}{pe_{ac}(\pi * r^2)}$$

dónde:

m = masa del material [kg]

pe_{ac} = Peso específico del acero [kg/m^3]

r = radio del crisol [m]

Sustituyendo:

$$\ell_{ac} = h_{ac} = \frac{50}{7850(\pi * 0.105^2)}$$

$$\ell_{ac} = 0.18 \text{ m}$$

μ_{ac} = Permeabilidad magnética del acero, calculada con la fórmula:

$$\mu_{ac} = \mu_r * \mu_0$$

dónde:

μ_0 = Permeabilidad magnética del vacío ($4\pi \times 10^{-7} \text{ N}/\text{A}^2$)

μ_r = Permeabilidad relativa máxima para el acero fundido (600) [5]

Sustituyendo:

$$\begin{aligned}\mu_{ac} &= 4\pi \times 10^{-7} * 600 \\ \mu_{ac} &= 7.5396 \times 10^{-4} \text{ N}/\text{A}^2\end{aligned}$$

S_{ac} = Área del acero dentro del crisol calculado por:

$$S_{ac} = \pi * r^2$$

dónde:

r = radio [m]



Sustituyendo:

$$S_{ac} = \pi * 0.105^2$$

$$S_{ac} = 0.0346 \text{ m}^2$$

Sustituyendo todo en la fórmula original

$$\mathfrak{R}_{ac} = \frac{\ell_{ac}}{\mu_{ac} * S_{ac}}$$

$$\mathfrak{R}_{ac} = \frac{0.1838}{7.5396 \times 10^{-4} * 0.0346}$$

$$\mathfrak{R}_{ac} = 7045.65 \text{ Av/Wb}$$

Para el caso del hierro fundido, la reluctancia del material \mathfrak{R}_{Fe} se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\mathfrak{R}_{Fe} = \frac{\ell_{Fe}}{\mu_{Fe} * S_{Fe}}$$

dónde:

- ℓ_{fe} = Longitud media, ocupamos la misma fórmula que anteriormente:

$$\ell_{Fe} = \frac{m}{pe_{Fe}(\pi * r^2)}$$

dónde:

m = masa del material [kg]

pe_{Fe} = Peso específico del hierro fundido [kg/m³]

r = radio del crisol [m]

Sustituyendo:

$$\ell_{Fe} = \frac{50}{7800(\pi * 0.105^2)}$$

$$\ell_{Fe} = 0.185 \text{ m}$$

μ_{Fe} = Permeabilidad magnética del hierro fundido, calculada con la fórmula:

$$\mu_{Fe} = \mu_r * \mu_0$$

dónde:

μ_0 = Permeabilidad magnética del vacío ($4\pi \times 10^{-7} N/A^2$)

μ_r = Permeabilidad relativa máxima para el hierro fundido (100) [5]

Sustituyendo:

$$\begin{aligned}\mu_{Fe} &= 4\pi \times 10^{-7} * 100 \\ \mu_{Fe} &= 1.2566 \times 10^{-4} N/A^2\end{aligned}$$

S_{Fe} = El área dentro del crisol será la misma que para el acero:

$$S_{Fe} = 0.0346 m^2$$

Sustituyendo todo en la fórmula original

$$\begin{aligned}\mathfrak{R}_{Fe} &= \frac{\ell_{Fe}}{\mu_{Fe} * S_{Fe}} \\ \mathfrak{R}_{Fe} &= \frac{0.185}{1.2566 \times 10^{-4} * 0.0346} \\ \mathfrak{R}_{Fe} &= 42549.90 Av/Wb\end{aligned}$$

Para el caso del níquel, la reluctancia del material \mathfrak{R}_{Ni} se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\mathfrak{R}_{Ni} = \frac{\ell_{Ni}}{\mu_{Ni} * S_{Ni}}$$



dónde:

ℓ_{Ni} = Longitud media, ocupamos la misma fórmula que anteriormente:

$$\ell_{Ni} = \frac{m}{pe_{Ni}(\pi * r^2)}$$

dónde:

m = masa del material [kg]

pe_{Ni} = Peso específico del níquel [kg/m^3]

r = radio del crisol [m]

Sustituyendo:

$$\ell_{Ni} = \frac{50}{8650(\pi * 0.105^2)}$$

$$\ell_{Ni} = 0.166 \text{ m}$$

μ_{Ni} = Permeabilidad magnética del hierro fundido, calculada con la fórmula:

$$\mu_{Ni} = \mu_r * \mu_0$$

dónde:

μ_0 = Permeabilidad magnética del vacío ($4\pi \times 10^{-7} \text{ N}/\text{A}^2$)

μ_r = Permeabilidad relativa máxima para el níquel (600) [5]

Sustituyendo:

$$\mu_{Ni} = 4\pi \times 10^{-7} * 100$$

$$\mu_{Ni} = 7.5396 \times 10^{-4} \text{ N}/\text{A}^2$$

S_{Ni} = El área dentro del crisol será la misma que para el acero:

$$S_{Ni} = 0.0346 \text{ m}^2$$

Sustituyendo todo en la fórmula original

$$\mathfrak{R}_{Ni} = \frac{\ell_{Ni}}{\mu_{Ni} * S_{Ni}}$$

$$\mathfrak{R}_{Ni} = \frac{0.166}{7.5396 \times 10^{-4} * 0.0346}$$

$$\mathfrak{R}_{Ni} = 6363.3188 \text{ Av/Wb}$$

3.6 SIMULACIÓN EN EL ATP-DRAW

Para la simulación en el ATP-Draw se utilizó el siguiente modelo (figura 3.10), llevando a cabo un barrido de frecuencia de 0 a 3000 Hz, con un valor nominal por diseño de 100 μF para el capacitor resonante. Se observó el comportamiento del horno para cada material con un valor equivalente de 50 kg para cada carga sometido a diferentes frecuencias de operación dentro del intervalo de frecuencia y se obtuvieron los siguientes resultados:

Para el hierro:

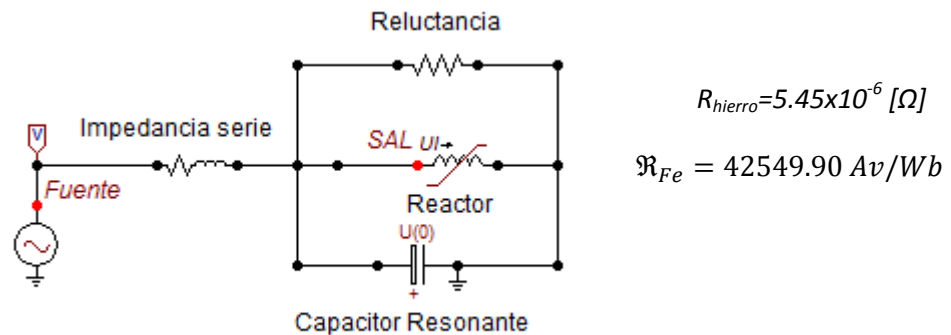


Fig. 3.10 Modelo del horno de inducción resonante paralelo cargado con 50 kg de hierro.

En la figura 3.11 se observa que la resonancia del equipo se logra al variar la frecuencia hasta un valor de 2.8 kHz, alcanzando hasta un valor de 22.4 [kV] diferencia de potencial presente en la carga metálica correspondiente, considerando los valores de resistencia y reluctancia obtenidos en el cálculo para 50 kg de hierro.

Y monitoreando los valores de tensión se obtuvieron 1.25 [kV] (figura 3.12) y una corriente en el equipo de 151.86 [A] nominales (figura 3.13).

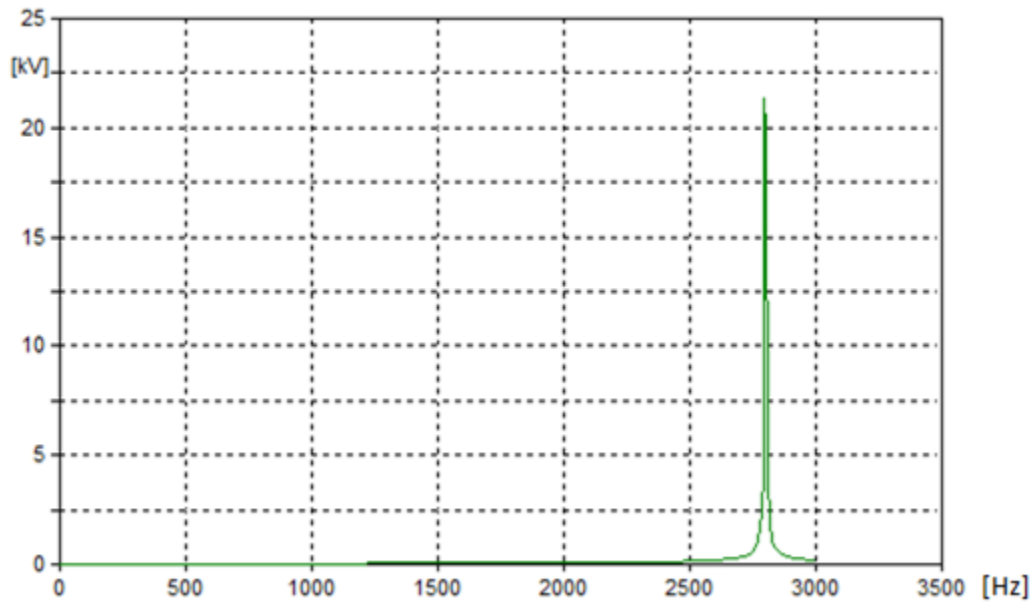


Fig. 3.11 Respuesta a la frecuencia de la carga de hierro cuando entra en resonancia.

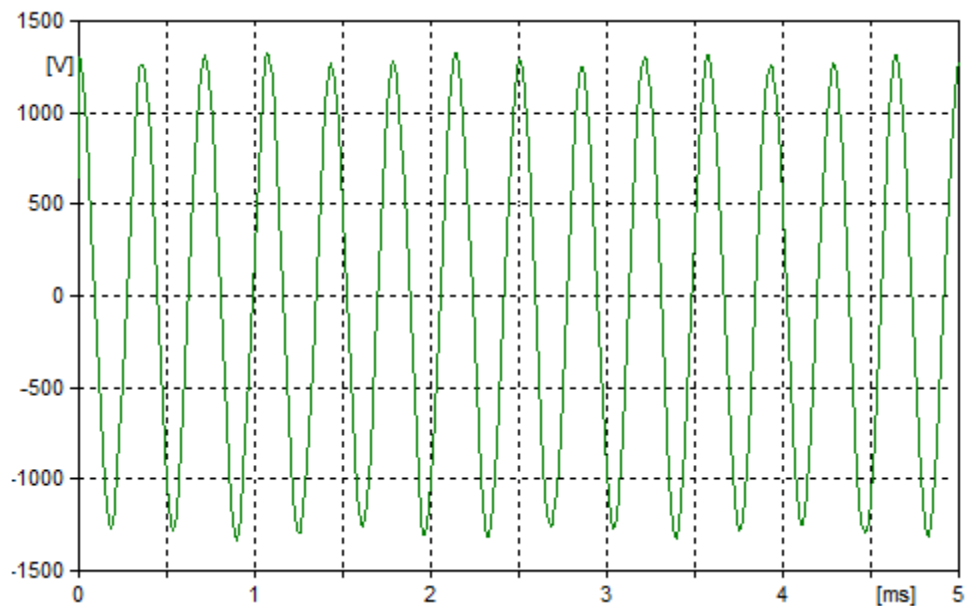


Fig. 3.12 Gráfica de la tensión del sistema con carga de hierro

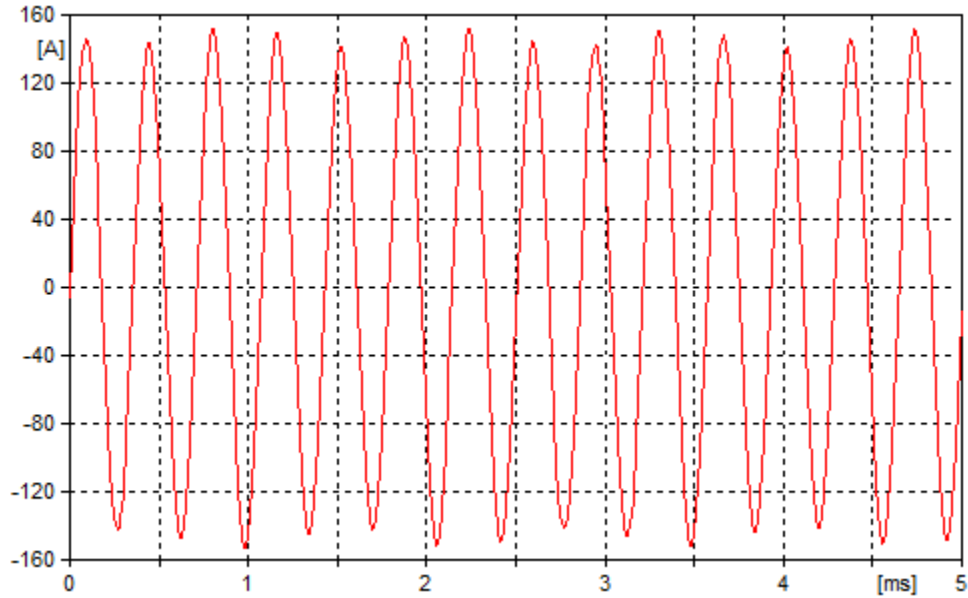


Fig. 3.13 Gráfica de la corriente del sistema con carga de hierro

Para el acero se tiene el modelo ilustrado en la figura 3.14:

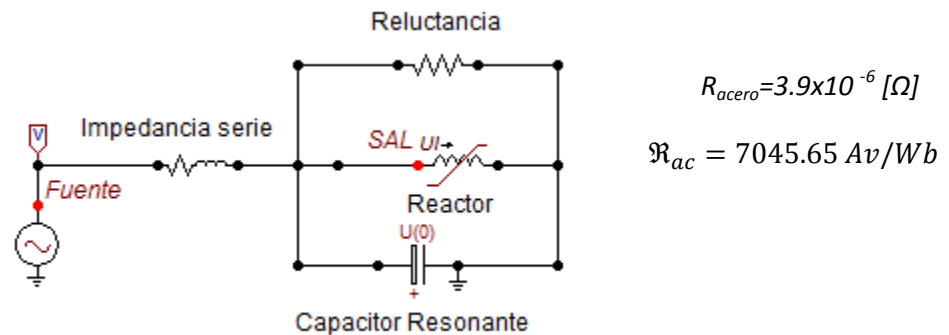


Fig. 3.14 Modelo del horno de inducción resonante paralelo cargado con 50 kg de acero.

En la figura 3.15 se observa que la resonancia del equipo se logra al variar la frecuencia hasta un valor de 2.36 kHz, alcanzando hasta un valor de 12.8 [kV] diferencia de potencial presente en la carga metálica correspondiente, considerando los valores de resistencia y reluctancia obtenidos en el cálculo para 50 kg de acero.

Y monitoreando los valores de tensión se obtuvieron 1.37 [kV] (figura 3.16) y una corriente en el equipo de 124.63 [A] nominales (figura 3.17).

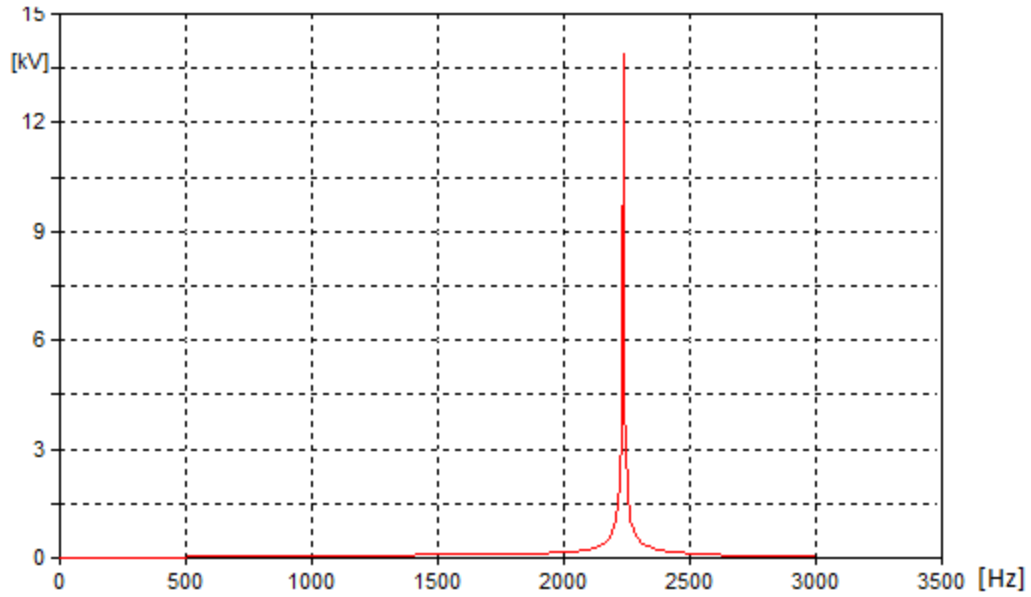


Fig. 3.15 Respuesta a la frecuencia de la carga de acero cuando entra en resonancia.

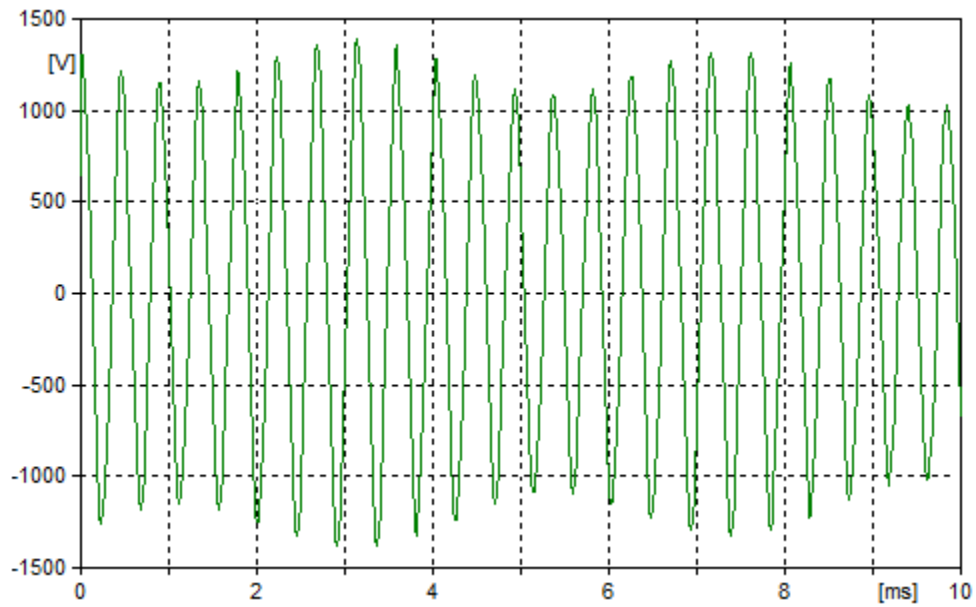


Fig. 3.16 Gráfica de la tensión del sistema con carga de acero.

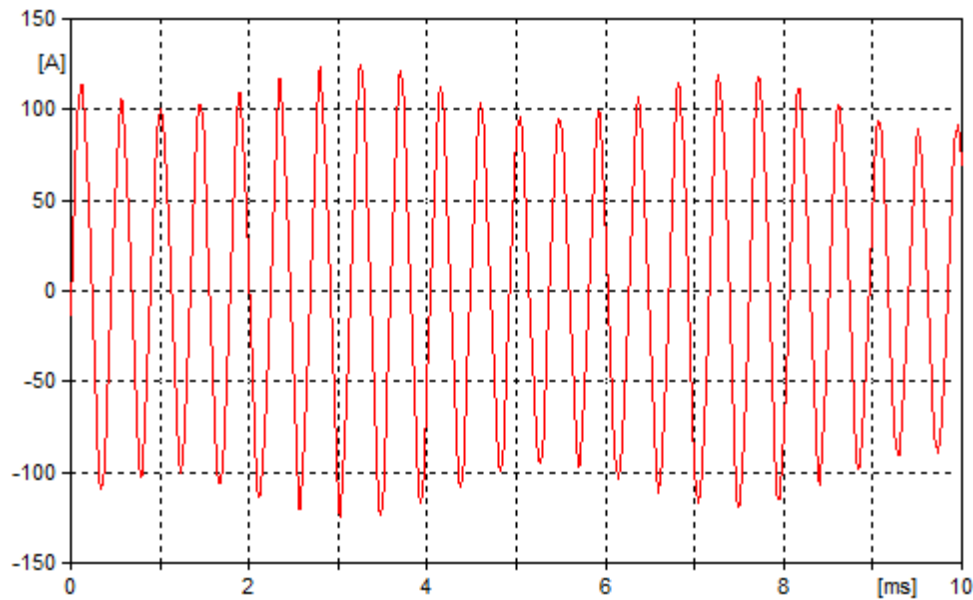


Fig. 3.17 Gráfica de la corriente del sistema con carga de acero.

Para el níquel se ilustra el siguiente modelo (figura 3.18) que es equivalente a los anteriores mostrados pero con las características de dicho material:

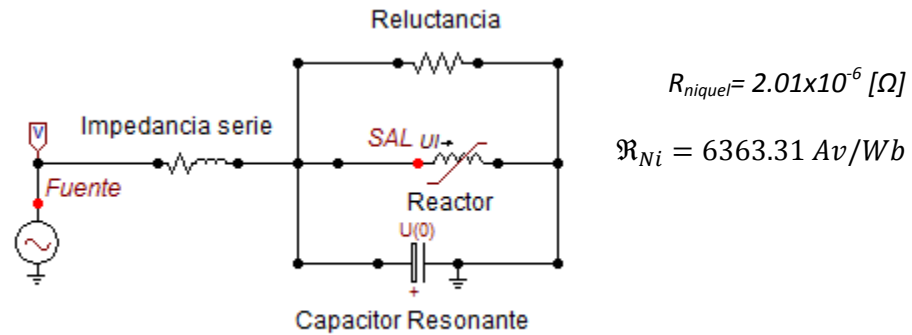


Fig. 3.18 Modelo del horno de inducción resonante paralelo cargado con 50 kg de níquel.

En la figura 3.19 se observa que la resonancia del equipo se logra al variar la frecuencia hasta un valor de 2.5 kHz, alcanzando hasta un valor de 12.0 [kV] diferencia de potencial presente en la carga metálica correspondiente, considerando los valores de resistencia y reluctancia obtenidos en el cálculo para 50 kg de níquel.

Y monitoreando los valores de tensión se obtuvieron 1.38 [kV] (figura 3.20) y una corriente en el equipo de 134.08 [A] nominales (figura 3.21).

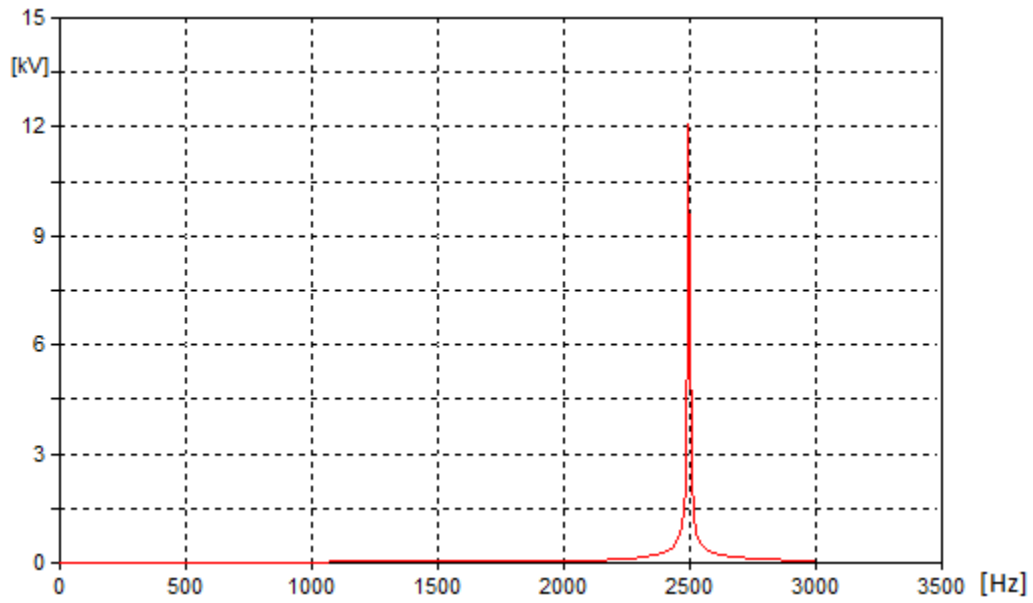


Fig. 3.19 Respuesta a la frecuencia de la carga de níquel cuando entra en resonancia.

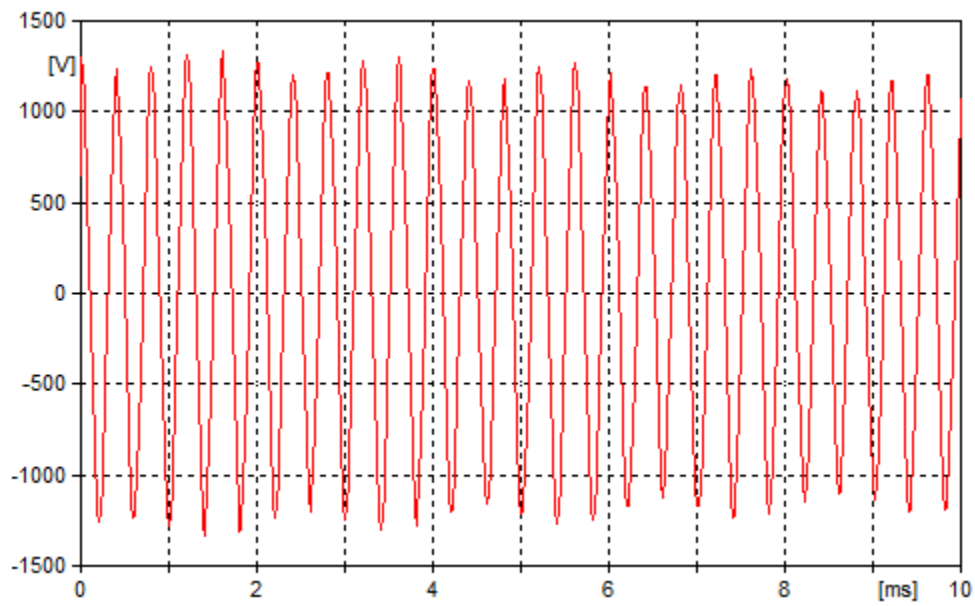


Fig. 3.20 Gráfica de la tensión del sistema con carga de níquel.

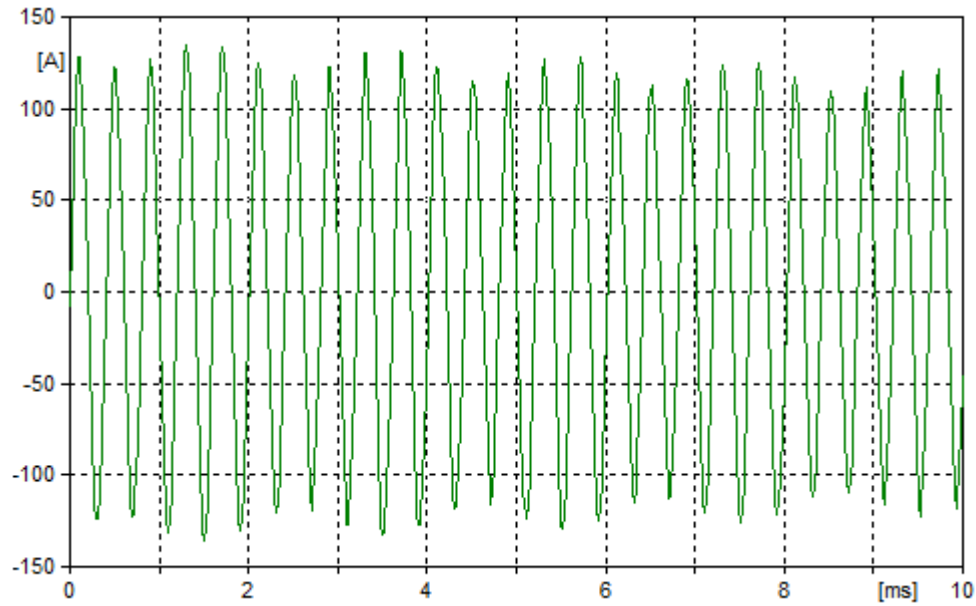


Fig. 3.21 Gráfica de la corriente del sistema con carga de níquel.

3.7 RENDIMIENTO DEL CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN.

El rendimiento eléctrico es la relación entre la potencia transmitida a la carga y la potencia total consumida en los bornes del inductor.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + P_2} = \frac{1}{1 + \frac{P_1}{P_2}}$$

dónde:

P_2 = Potencia transmitida a la carga.

P_1 = Potencia perdida por efecto Joule en el inductor.

Si la resistencia eléctrica del inductor es R_1 , y la intensidad que circula I_1 , entonces $P_1 = I_1^2 \cdot R_1$. Para aumentar el rendimiento hay que reducir P_1 , que implica disminuir R_1 utilizando un buen conductor como el cobre electrolítico y dar a las espiras la máxima área transversal posible.

P_2 se calcula con la fórmula siguiente:

$$P_2 = 6.24 \cdot 10^{-3} \cdot He^2 \cdot D2 \cdot \ell \cdot \sqrt{\rho_c \cdot f \cdot \mu_r}$$

dónde :

He = Campo magnético eficaz [A·vuelta/m]

$D2$ = Diámetro del crisol [m]

ℓ = Altura del material dentro del crisol [m]

ρ_c = Resistividad del material corregida a la temperatura de trabajo [ρ_c]

f = Frecuencia de resonancia [Hz]

μ_r = Permeabilidad relativa [N/A^2]

En materiales no magnéticos (Cu, Al, aceros amagnéticos y aceros magnéticos por encima del punto de Curie) el valor de la permeabilidad relativa es 1, que se aplica con el metal líquido.

El campo magnético eficaz se define como los amperios-vuelta por unidad de longitud:

$$He = \frac{I_1 \cdot n_1}{\ell}$$

dónde:

I_1 = Intensidad de corriente que circula [A]

n_1 = número de espiras del inductor [vueltas]

ℓ = Longitud media, para este caso se considera igual a la altura del material a fundir dentro del crisol [m]



Para el acero

$$I_{1_ac} = 124.63 \text{ A}$$

$$n_1 = 16 \text{ vueltas}$$

$$\ell_{ac} = 0.18 \text{ m}$$

$$He_{ac} = \frac{I_{1_ac} \cdot n_1}{\ell_{ac}}$$

$$He_{ac} = \frac{124.63 \cdot 16}{0.18}$$

$$He_{ac} = 11078.22 \text{ A} \cdot \text{vueltas/m}$$

Para el hierro fundido

$$I_{1_fe} = 151.86 \text{ A}$$

$$n_1 = 16 \text{ vueltas}$$

$$\ell_{fe} = 0.185 \text{ m}$$

$$He_{fe} = \frac{I_{1_fe} \cdot n_1}{\ell_{fe}}$$

$$He_{fe} = \frac{151.86 \cdot 16}{0.185}$$

$$He_{fe} = 13133.83 \text{ A} \cdot \text{vueltas/m}$$

Para el níquel

$$I_{1_Ni} = 134.08 \text{ A}$$

$$n_1 = 16 \text{ vueltas}$$

$$\ell_{Ni} = 0.166 \text{ m}$$

$$He_{Ni} = \frac{I_{1_Ni} \cdot n_1}{\ell_{Ni}}$$

$$He_{Ni} = \frac{134.08 \cdot 16}{0.166}$$

$$He_{Ni} = 12923.37 \text{ A} \cdot \text{vueltas/m}$$

También es necesario corregir la resistividad ρ del material a su temperatura de trabajo, lo cual se logra mediante la siguiente fórmula.

$$\rho_c = \rho_0[1 + \alpha(T_s - 20)]$$

dónde:

ρ_c =Resistividad corregida a la temperatura de trabajo [$\Omega \cdot m$]

ρ_0 = Resistividad del material a 20°C [$\Omega \cdot m$]

α = Coeficiente de Resistividad [$^{\circ}C^{-1}$]

T_s = Temperatura de trabajo del metal [$^{\circ}C$]

Para el acero

$$\rho_0 = 107 \times 10^{-9} \Omega \cdot m$$

$$T_s = 1650^{\circ}C$$

$$\alpha_{ac} = 0.0036 \text{ } ^{\circ}C^{-1}$$

$$\rho_{ac_c} = \rho_{0_ac}[1 + \alpha_{ac}(T_s - 20)]$$

$$\rho_{ac_c} = 107 \times 10^{-9}[1 + 0.0036(1650 - 20)]$$

$$\rho_{ac_c} = 7.34 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$$

Para el hierro

$$\rho_0 = 97.1 \times 10^{-9} \Omega \cdot m$$

$$T_s = 1480^{\circ}C$$

$$\alpha_{fe} = 0.00651 \text{ } ^{\circ}C^{-1}$$

$$\rho_{fe_c} = \rho_{0_fe}[1 + \alpha_{fe}(T_s - 20)]$$

$$\rho_{fe_c} = 97.1 \times 10^{-9}[1 + 0.00651(1480 - 20)]$$

$$\rho_{fe_c} = 1.01 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$$

Para el níquel

$$\rho_0 = 68.4 \times 10^{-9} \Omega \cdot m$$

$$T_s = 1455^{\circ}C$$

$$\alpha_{ni} = 0.0069 \text{ } ^{\circ}C^{-1}$$

$$\rho_{ni_c} = \rho_{0_ni}[1 + \alpha_{ni}(T_s - 20)]$$

$$\rho_{ni_c} = 68.4 \times 10^{-9}[1 + 0.0069(1455 - 20)]$$

$$\rho_{ni_c} = 7.45 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$$

Ya que se tienen todos los parámetros, es posible determinar P_2 para cada material

Para el acero:

$$P_{2_ac} = 6.24 \cdot 10^{-3} \cdot He_{ac}^2 \cdot D2 \cdot \ell_{ac} \cdot \sqrt{p_{ac} \cdot f_{ac} \cdot \mu_{r_ac}}$$
$$P_{2_ac} = 6.24 \cdot 10^{-3} \cdot 11078.22^2 \cdot 0.21 \cdot 0.18 \cdot \sqrt{7.34 \times 10^{-7} \cdot 2236 \cdot 1}$$

$$P_{2_ac} = 1172.73 \text{ w}$$

Para el hierro fundido:

$$P_{2_fe} = 6.24 \cdot 10^{-3} \cdot He_{fe}^2 \cdot D2 \cdot \ell_{fe} \cdot \sqrt{p_{fe} \cdot f_{fe} \cdot \mu_{r_fe}}$$
$$P_{2_fe} = 6.24 \cdot 10^{-3} \cdot 13133.83^2 \cdot 0.21 \cdot 0.185 \cdot \sqrt{1.01 \times 10^{-6} \cdot 2797 \cdot 1}$$

$$P_{2_fe} = 2222.62 \text{ w}$$

Para el níquel:

$$P_{2_Ni} = 6.24 \cdot 10^{-3} \cdot He_{Ni}^2 \cdot D2 \cdot \ell_{Ni} \cdot \sqrt{p_{Ni} \cdot f_{Ni} \cdot \mu_{r_Ni}}$$
$$P_{2_Ni} = 6.24 \cdot 10^{-3} \cdot 12923.37^2 \cdot 0.21 \cdot 0.166 \cdot \sqrt{7.45 \times 10^{-7} \cdot 2493 \cdot 1}$$

$$P_{2_Ni} = 1565.67 \text{ w}$$

Para P_1 , se considera la resistencia interna del horno, en este caso de 0.345Ω

$$R_1 = 0.345 \Omega$$

Por lo tanto:

Para el acero

$$P_{1_ac} = I_{1_ac}^2 \cdot R_1$$
$$P_{1_ac} = 124.63^2 \cdot 0.345$$

$$P_{1_ac} = 5358.75 \text{ A}^2 \cdot \Omega$$



Para el hierro fundido

$$\begin{aligned}P_{1_{fe}} &= I_{1_{fe}}^2 \cdot R_1 \\P_{1_{fe}} &= 151.86^2 \cdot 0.345 \\P_{1_{fe}} &= 7956.2035 \text{ A}^2 \cdot \Omega\end{aligned}$$

Para el níquel

$$\begin{aligned}P_{1_{Ni}} &= I_{1_{Ni}}^2 \cdot R_1 \\P_{1_{Ni}} &= 134.08^2 \cdot 0.345 \\P_{1_{Ni}} &= 6202.21 \text{ A}^2 \cdot \Omega\end{aligned}$$

Aplicando la fórmula de rendimiento por calentamiento por inducción

Para el acero

$$\begin{aligned}\eta_{ac} &= \frac{1}{1 + \frac{P_{1_{ac}}}{P_{2_{ac}}}} \\ \eta_{ac} &= \frac{1}{1 + \frac{5358.75}{1172.73}} \\ \eta_{ac} &= 0.17\end{aligned}$$

Para el hierro fundido

$$\begin{aligned}\eta_{fe} &= \frac{1}{1 + \frac{P_{1_{fe}}}{P_{2_{fe}}}} \\ \eta_{fe} &= \frac{1}{1 + \frac{7956.20}{2222.62}} \\ \eta_{fe} &= 0.21\end{aligned}$$

Para el níquel

$$\eta_{Ni} = \frac{1}{1 + \frac{P_{1_fe}}{P_{2_fe}}}$$

$$\eta_{Ni} = \frac{1}{1 + \frac{6202.21}{1565.67}}$$

$$\eta_{Ni} = 0.20$$

Los resultados obtenidos fueron comparados con los experimentos realizados en Santiago de Chile utilizando un horno de inducción auto-resonante con tecnología IGBT, arrojando datos similares. [8]



CAPITULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

4.1 INTRODUCCIÓN

En este apartado se busca enfatizar si se lograron los objetivos propuestos, a través de un análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones, los cuales permitieron llegar a las conclusiones pertinentes de acuerdo a la teoría y a las referencias obtenidas.

4.2 CONCLUSIONES

En un horno de inducción, para aumentar la potencia transmitida a la carga se debe jugar con la frecuencia, sin sobrecargar los tiristores, y con la altura de bobina adecuada. Estos parámetros inciden en la penetración de las corrientes parásitas que sirven para el calentamiento de la carga. Además aumenta el tamaño del campo magnético.

La resistividad de la carga juega un papel importante en la transmisión de potencia a la carga. Una resistividad baja conlleva una baja potencia de arranque. La resistividad aumenta con la temperatura y este mecanismo favorece la fusión.

- En materiales magnéticos se puede jugar con la frecuencia y la permeabilidad magnética, operando a baja frecuencia hasta el llamado punto de Curie (para el acero es 730 °C) y por encima de éste se opera a mayor frecuencia. El punto de Curie es la temperatura a la cual un material se transforma de magnético en amagnético.

- Todo horno de inducción tiene una frecuencia mínima de operación, debido a un factor de tamaño del crisol que incide en la penetración del campo en la carga. Además el horno dispone de una altura de carga mínima de operación.

- Para mejorar el rendimiento del horno se toma en cuenta el factor de llenado, esto quiere decir que la carga debe ser lo más compacta posible y evitar una permeabilidad magnética elevada, lo que obliga a elevar la frecuencia y mayor consumo de energía.



· En el horno de inducción existen pérdidas de calor por conducción, convección y por radiación. Estos datos sirven para realizar el balance térmico correspondiente y hallar el rendimiento térmico del horno.

4.3 RECOMENDACIONES

· El operador del horno de inducción debe saber manejar los parámetros físicos de la carga, los cuales sirven para regular el consumo de energía, la potencia transmitida y el tiempo de operación. Debe conocer los datos de operación del horno y llevar la bitácora de la operación. Con estos datos se puede realizar el balance energético del horno y planificar el mantenimiento del mismo.

No sobrepasar el límite de potencia establecido. Este límite depende de la masa fundida. Para 80 Kg de acero, el límite es 1700 Hz de frecuencia.

Antes de cada proceso de fundición, se debe revisar los cálculos metalúrgicos correspondientes, y ajustarlos a los cambios que se puedan dar durante el proceso.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] N.O. SADIKU, Mathew, Elementos de electromagnetismo, segunda edición, temple University, Philadelphia, PA., 2005
- [2] KOSOW, Irving L., Máquinas eléctricas y transformadores. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana S.A.. México 1991
- [3] HAYT, William H., KEMMERLY, Jack E., DURBIN, Steven M. Análisis de Circuitos en ingeniería. 7a.ed. McGraw-Hill, pp. 627-631
- [4] COCCO, Julio C. Teoría de Resonancia. Rosario, Argentina: Departamento de Ingeniería Eléctrica, UTN. FRRO, Enero de 2006 [Consulta: 5 Septiembre 2013]. Disponible en: http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/electrica/2_anio/electrotecnica1/trabajos_practicos/Teoria%20de%20Resonancia.pdf
- [5] PROTEUS STEINMETZ, Charles. Theory and calculations of electrical circuits. Volume 5. New York: McGraw-Hill, 2007. p.84, fig.42
- [6] MILITARY HANDBOOK, Grounding, bonding, and shielding for electronic equipments and facilities. Volume II. Department of Defense, USA: 1987, Sec 1-163, 1-164, Table 1-29, Relative Conductivity and Relative Permeability of Common Metales. MIL-HDBK-419A
- [7] ESPINOSA MALEA, José Manuel. BELENGUER Baleguer, Enrique F. Problemas resueltos de circuitos magnéticos y transformadores, Publicación de la Universitat Jaume I, Castellón de la Plana: 2004. pp. 72-74
- [8] FUENTES, Ricardo. LAGOS, Patricio. ESTRADA, Jorge Self-Resonant Induction Furnace with IGBT Technology, A Chilean Experience, Publicado por la IEEEExplore, p. 1374