

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



TEORIA ELECTROMAGNETICA

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA
ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA

PRESENTA

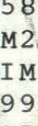
ING. EDUARDO ALONSO CASTILLO MONTEMAYOR

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.

JUNIO DE 1998

E.A.C.M.

TEORRIA BACCOURA
OMMAGNICA



TM
Z5853
.M2
FIME
1998
C37



1020123096

119-29660

TM
25853
•M2
FIME
1998
C37



FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



TEORIA ELECTROMAGNETICA

T E S I S

EN OPCION AL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA
ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA

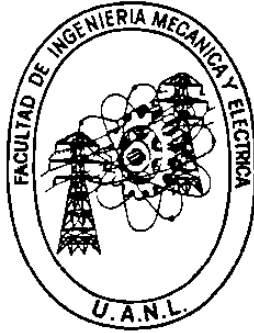
P R E S E N T A

ING. EDUARDO ALONSO CASTILLO MONTEMAYOR

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.

JUNIO DE 1998

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



TEORIA DE ELECTROMAGNETICA

POR

ING. EDUARDO ALONSO CASTILLO MONTEMAYOR

TESIS

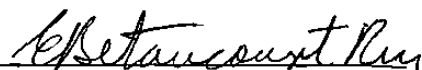
EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERIA ELECTRICA CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L. JUNIO DE 1998

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POS-TGRADO**


Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis **TEORIA ELECTROMAGNETICA**, realizada por el Ing. Eduardo Alonso Castillo Montemayor sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Potencia.

El Comité de Tesis


M.C. Enrique Betancourt Ramírez
Asesor


M.C. Paz Vicente Cantú Gutiérrez
Coasesor


M.C. Evelio Prisciliano González Flores
Coasesor


Vø.Bo.
M.C. Roberto Villarreal Garza
División de Estudios de Pos-tgrado

San Nicolás de los Garza, N.L., Mayo de 1998

ANTECEDENTES

Con el gran desarrollo que ha tenido lugar en los últimos años en las ciencias físicas, es de esperar que dentro de muy poco tiempo, los estudiantes puedan aplicar sus conocimientos sobre teoría electromagnética para realizar inspecciones con mínimo margen de error.

En la actualidad las inspecciones realizadas a los tubos de los intercambiadores de calor, se llevan acabo mediante pruebas llamadas destructivas, las cuales provocan en ellos daños considerables, y por lo tanto reducen su vida dando esto como resultado que los costos por correctivo sean altos, por lo que se llevan acabo nuevas formas de inspección que no dañen los tubos ni eleven los costos durante estas formas de inspección. Una prueba NO DESTRUCTIVA es la inspección por corrientes de Foucault, en la cual no se tiene que someter a ningún tipo de esfuerzo al espécimen para saber el estado físico en que se encuentra.

En este proyecto se busca fomentar la investigación para que el campo de aplicación de las corrientes de Foucault, sea cada vez mas extenso mediante la recopilación y aplicación de dicho tema para aquel que esté interesado en él tenga la oportunidad de utilizar esta información y tomarla como base para un nuevo proyecto que modifique a la presente y la enriquezca. Además de la Teoría Electromagnética, se hace una recopilación de toda la información sobre corrientes de Foucault para que nos permita investigar, sobre la medición de dicha corriente en un patrón de referencia, contra la medición sobre un espécimen, esperando obtener el estado físico en que se encuentra.

PROLOGO

Esta Tesis tiene a la Teoría Electromagnética como tema principal. Se desarrolla desde el punto de las corrientes de Foucault (corrientes parásitas), en el que las leyes experimentales relevantes se introducen y manipulan gradualmente con ayuda de un conocimiento constante y creciente del cálculo vectorial. Las corrientes de Foucault se identifican como se presentan, incluso como se aplican en el campo, y desde cierto sentido de realización, e inclusive, tal vez, de familiaridad, puede notarse cuando finalmente se completa la aplicación. En el último capítulo se describe esta aplicación.

El material es mas que adecuado para el apoyo en futuras investigaciones sobre la relación que existe entre la Teoría Electromagnética y la generación-medición de corrientes de Foucault, y ha sido escrito con la idea de hacer tan fácil como sea posible el aprendizaje autodidáctico, mediante la proporción de ejemplos numéricos.

Se agradece los conocimientos y la ayuda del M.C. Enrique Betancourt Ramírez, asesor de tesis, por su constante orientación y dirección durante todo el desarrollo de este trabajo.

A Carrier de México por las facilidades otorgadas para trabajar en sus instalaciones.

ING. EDUARDO ALONSO CASTILLO MONTEMAYOR

SÍNTESIS

Esta Tesis se realiza con el propósito principal de dar soporte a todo aquel que este interesado en profundizar en la relación que existe entre la teoría Electromagnética y el método no-destructivo que emplea las corrientes de Foucault. Aun y cuando en la actualidad se cuenta con información para la realización de dicha prueba, esta información no detalla la relación que ésta tiene con la Teoría Electromagnética. Considerando que la Teoría Electromagnética es la base para realizar la prueba antes mencionada, el encontrar el enlace sería importante para una mayor comprensión de los fenómenos que se presentan en dicha prueba. Así mismo se agrega información para generar y medir las corrientes de Foucault.

En el capítulo 1. Me permito dar un punto de vista muy personal que me dio la idea de realizar este trabajo y los motivos que tuve.

En el capítulo 2. Vemos los conceptos y leyes que rigen la electrostática como una introducción a la teoría electromagnética .

En el capítulo 3. Vemos las leyes del magnetismo y las ecuaciones de Maxwell para campos variables en el tiempo.

En el capítulo 4. Se introduce el tema de campos magnéticos que rodean una bobina portadora de corriente conjuntamente con el mecanismo por el cual las corrientes de Foucault se inducen y se miden.

En el capítulo 5. Se describen los métodos para obtener información relativa a una pieza en inspección, así como los efectos que intervinieron para utilizar eficazmente un instrumento por corrientes de Foucault.

En el capítulo 6. Se describe un método práctico de efectuar la inspección por corrientes de Foucault por medio de una sonda diferencial.

En el capítulo 7. El ultimo capítulo, se desarrolla el caso practico, utilizando el equipo de corrientes de Foucault. (MIZ 19) para interpretar la inspección de una muestra (tubo).

Con lo que se busca dar soporte a la industria en este ramo y en particular a Carrier México propietario del equipo de medición (MIZ 19). Así como apoyar a la U.A.N.L. , F.I.M.E., en la elaboración de un laboratorio para la clase de teoría electromagnética en el que se logre que el estudiante vea la aplicación del electromagnetismo, logrando una mayor preparación profesional en éste.

INDICE

	PAGINA
Prólogo	i
Síntesis	ii
Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2. Introducción a la Teoría Electromagnética	
2.1 Teorema de la Divergencia	3
2.2 Gradiente	4
2.3 Rotacional	6
2.4 Coordenadas Cilíndricas	6
2.5 Coordenadas Esféricas	10
2.6 Ley de Coulomb	13
2.7 Intensidad del Campo Eléctrico	15
2.8 Densidad de Flujo Eléctrico	17
2.9 Ley de Gauss	17
Capítulo 3. Inducción y Fuerzas Electromagnéticas	
3.1 Conceptos Básicos	20
3.2 Ondas Electromagnéticas	23
3.3 Corrientes de Foucault	32
Capítulo 4. Principios Fundamentales de las Corrientes de Foucault	
4.1 Equipo Básico	35
4.2 Propiedades Fundamentales Del Flujo De Las Corrientes de Foucault	37
4.3 Efecto Pelicular	38
4.4 Profundidad de Penetración	42
4.5 Ecuaciones de Impedancia y Definiciones	42

4.6 Diagramas de Impedancia Simplificados	45
4.7 Correlación entre la Impedancia de la Bobina y las Propiedades de la Muestra	49
4.8 Ejemplos Resueltos	49
4.8.1 Impedancia de la Sonda en el Aire	49
4.8.2 Impedancia de la Sonda Adyacente a la Muestra	50
4.8.3 Relación entre Voltaje y Corriente	51

Capítulo 5. Instrumentación

5.1 Sistema de Emisión-Recepción en las Corrientes de Foucault	52
5.2 Detector de Efecto Hall	53
5.3 Bobina Para Emisión-Recepción y Compensación de Lift-Off	54
5.4 Equipo de Frecuencia Múltiples	56
5.5 Inspección con Sonda de Superficie	56
5.6 Características Direccionales	57
5.7 Inductancia de la Sonda	57
5.8 Sensibilidad en Función del Lift-Off y de la Profundidad de los Defectos	58
5.9 Efecto de la Longitud del Defecto	60
5.10 Efecto de la Resistividad	63
5.11 Efecto de la Permeabilidad	64
5.12 Efecto del Espesor	64
5.13 Efecto de Frecuencia	64
5.14 Efecto del Diámetro de la Sonda	65
5.15 Resonancia del Conjunto Sonda-Cable	66

Capítulo 6. Inspección de Tubo y Pieza Cilíndricas

6.1 Tipo de Sondas	67
--------------------	----

6.2 Tamaños de las Bobinas	69
6.3 Comparación entre Sondas Diferenciales y Absolutas	70
6.4 Características Direccionales	72
6.5 Inductancia de la Sonda	73
6.6 Tubos	74
6.7 Frecuencia Características de Inspección	76
6.8 Selección de la Frecuencia de Inspección	77
6.9 Frecuencia en la Inspección de Tubos	78
6.10 Sonda para la Detección de Fisuras Circunferenciales	78
6.11 Casos Teóricos	79
Capítulo 7 Caso Práctico	81
Conclusiones y Recomendaciones	84
Bibliografía	85
Glosario	86
Listado de Gráficas	87
Listado de Tablas	89
Autobiografía	90

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

Actualmente las pruebas en campo a los intercambiadores de calor son mediante pruebas hidrostática conocidas como pruebas destructivas para determinar el estado en el que se encuentran los tubos en dichos intercambiadores, procedimiento que implica el dañar los tubos que todavía podrían funcionar, lo cual repercute en elevados costos de las reparaciones a estos intercambiadores de calor.

Hoy en día es posible hacer dichas pruebas evitando dañar el equipo a inspeccionar, de una manera confiable que le permita al usuario de dicho equipo el saber las condiciones en que se encuentran los tubos del intercambiador para poder llegar a programar el mantenimiento preventivo o correctivo en el momento más adecuado para ello, evitando así pérdidas de tiempo y altos costos operativos. Esto mediante el método de corrientes de Foucault por lo que me he dedicado a analizar la relación entre la Teoría Electromagnética y el concepto de corrientes de Foucault.

Así mismo en este trabajo me aboqué a investigar la posibilidad de realizar dichas pruebas, encontrando información que me permitió seguir adelante en mi idea de realizar estas pruebas, después de haber encontrado bases que reforzaran dicha posibilidad, me dediqué a buscar los aparatos mas adecuados para la realización de la prueba ya en forma práctica, dado que mis resultados obtenidos en las prácticas que llevé acabo me brindaron unas respuestas coherentes y verdaderas pude comprobar que estas pruebas se realizan actualmente en la forma en que las planteo en esta tesis.

La tesis consta de 7 capítulos que le permitirán al lector comprender los cálculos y prácticas que se realizaron para obtener esta conclusión.

El último capítulo lo dedicó exclusivamente a los pasos que realice para el caso práctico que me permitió llegar a mi conclusión final.

Espero que el presente trabajo le sirva a otras personas como una introducción para que desarrollen en forma más completa las capacidades que tiene este método en su desarrollo de las pruebas no destructivas.

CAPITULO 2

INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA

2.1. EL TEOREMA DE LA DIVERGENCIA

La divergencia de un vector A es el límite de la cantidad de flujo por unidad de volumen que sale de una pequeña superficie cerrada cuando el volumen tiende a cero.

La interpretación física de la divergencia es útil a menudo en la obtención de información cualitativa acerca de la divergencia de un campo vectorial sin recurrir a la investigación matemática. Por ejemplo, considérese la divergencia de la velocidad del agua en una bañera después de que el desagüe ha sido abierto. El flujo neto de agua a través de cualquier superficie que se encuentre enteramente dentro del agua debe ser cero. El agua es esencialmente incompresible, y la cantidad de agua que entra y sale en diferentes regiones de la superficie cerrada debe ser la misma. De aquí que la divergencia de su velocidad sea cero.

Sin embargo, si se considera la velocidad del aire en un tubo perforado por un clavo, se observa que el aire se expande a medida que la presión baja y que consecuentemente hay un flujo neto en cualquier superficie cerrada que se encuentre dentro del interior del tubo. La divergencia de esta velocidad es, por consiguiente, mayor que cero.

Si la divergencia de una cantidad vectorial es positiva indica la existencia de una fuente de la cantidad vectorial en ese punto. Del mismo modo, una divergencia negativa indica un sumidero. La ecuación de la divergencia se define como:

$$\text{Divergencia de } A = \text{div } A = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\oint_S A \cdot ds}{\Delta V}$$

Si consideramos un volumen, V , encerrado por una superficie, S . El teorema de la divergencia dice que la integral de la componente de cualquier campo vectorial sobre una

superficie cerrada es igual a la integral de la divergencia de ese campo vectorial a través del volumen encerrado por la superficie cerrada.

$$\oint_S \mathbf{A} \cdot d\mathbf{s} = \int_{vol} \nabla \cdot \mathbf{A} \, dv$$

Donde: $\nabla = (\partial/\partial x)\mathbf{a}_x + (\partial/\partial y)\mathbf{a}_y + (\partial/\partial z)\mathbf{a}_z$

El Teorema de la divergencia se hace evidente físicamente si se considera un volumen V , mostrando un corte transversal en la figura 2.1, el cual es rodeado por una superficie cerrada S .

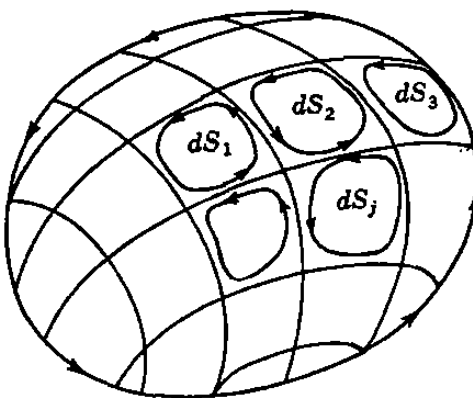


Figura 2.1. Interpretación física del Teorema de la Divergencia.

En resumen, la integral de la divergencia de la densidad de flujo en el interior de un volumen conduce al mismo resultado que la determinación del flujo neto que atraviesa la superficie que la encierra.

2.2. GRADIENTE

Supóngase que se tienen una cantidad escalar, μ , que tiene función de posición, de tal manera que se pueda escribir $\mu = \mu(x,y,z)$. Tal función recibe el nombre de campo escalar. Un ejemplo sería la temperatura en cada punto de una habitación. En un punto dado, separado por

ds de otro punto, el valor del escalar habría variado de μ a $\mu+d\mu$ como se indica en la siguiente figura 2.2.

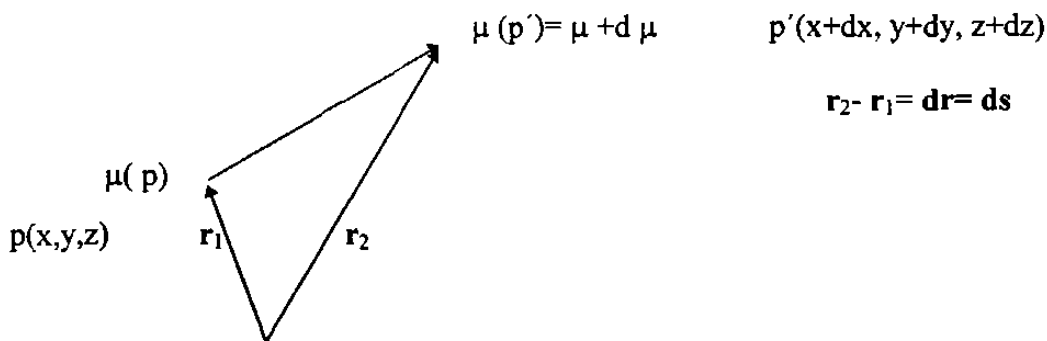


FIGURA 2.2. Variación de un valor escalar.

De hecho,

$$d\mu = (\partial\mu/\partial x)dx + (\partial\mu/\partial y)dy + (\partial\mu/\partial z)dz \quad (1)$$

debiendo tomarse en cuenta que las derivadas se evalúan en el punto original, es decir, $\partial\mu/\partial x = (\partial\mu/\partial x)_p$, y así sucesivamente. Aunque para el desplazamiento se utiliza ds , resulta evidente que en este caso se trata en realidad del cambio dr en el vector de posición del punto, de manera que

$$ds = dx\mathbf{a}_x + dy\mathbf{a}_y + dz\mathbf{a}_z \quad (2)$$

Al comparar (1) y (2), con el producto punto de los vectores se puede ver que $d\mu$ se puede escribir como:

$$\nabla\mu = (\partial\mu/\partial x)\mathbf{a}_x + (\partial\mu/\partial y)\mathbf{a}_y + (\partial\mu/\partial z)\mathbf{a}_z \quad (3)$$

De modo que:

$$d\mu = ds \cdot \nabla\mu \quad (4)$$

La ecuación (3) recibe el nombre de gradiente de μ y se suele escribir como $\text{grad } \mu$.

2.3. ROTACIONAL

El rotacional de cualquier vector es un vector, y cualquier componente del rotacional está dada por el límite del cociente de la integral cerrada de línea del vector alrededor de una pequeña trayectoria en un plano normal a la componente deseada entre el área cerrada, conforme la trayectoria se reduce a cero.

$$(\text{rot } \mathbf{H})_N = \lim_{\Delta S_N \rightarrow 0} \left(\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} \right) / (\Delta S_N) \quad (5)$$

Donde ΔS es el área plana encerrada por la integral de línea. El subíndice N indica que la componente del rotacional es aquella componente normal a la superficie encerrada por la trayectoria cerrada

En términos del operador vectorial:

$$\text{rot. } \mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{H} \quad (6)$$

Si combinamos (5) y (6) en coordenadas cartesianas obtenemos la forma punto de la ley circuital de Ampère.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (7)$$

2.4 COORDENADAS CILÍNDRICAS.

La localización de un punto P, se especifica por medio de tres cantidades, ρ, ϕ, z , cuyas definiciones se ilustran en la figura 2.3, esta figura también muestra el vector de posición, \mathbf{r} , del punto, así como tres nuevos vectores unitarios que se definirán en breve. Se puede observar que cuando \mathbf{r} se proyecta sobre el plano x y, ρ es la longitud de esta proyección, mientras que ϕ es el ángulo que dicha proyección forma con el eje x positivo; z es la misma que su correspondiente coordenada en el sistema rectangular.

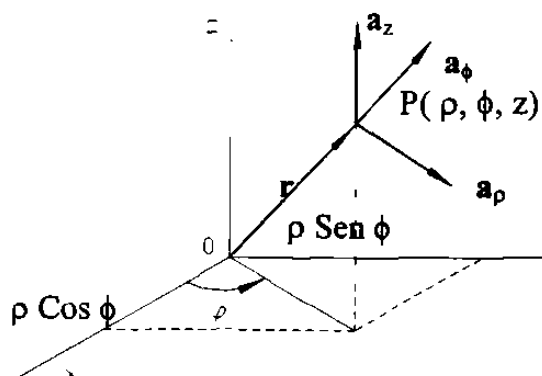


FIGURA 2.3 Sistema de Coordenadas Cilíndricas

Ahora se puede definir un conjunto de tres vectores unitarios mutuamente perpendiculares, como sigue: primero, \mathbf{z} es el mismo que el \mathbf{z} rectangular; segundo ρ , se escoge de manera tal que esté en la dirección en que ρ aumenta y sea perpendicular a \mathbf{z} , de modo que ρ es paralelo al plano xy . Por último, ϕ se define como perpendicular a los dos anteriores y en la dirección indicada. Se puede ver que ϕ es perpendicular al plano seminfinito $\phi = \text{constante}$, y su dirección es, por tanto, la misma en que ϕ crece. Los tres vectores unitarios se muestran en el punto P para enfatizar el hecho de que son función de P ; es decir, si P se desplaza, tanto ρ como ϕ cambian sus direcciones; aunque \mathbf{z} no cambia. Así, se observa que estos tres vectores unitarios no son constantes, en contraste con los de las coordenadas rectangulares $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$.

Las tres superficies de las coordenadas cilíndricas se muestran en la figura (2.4):

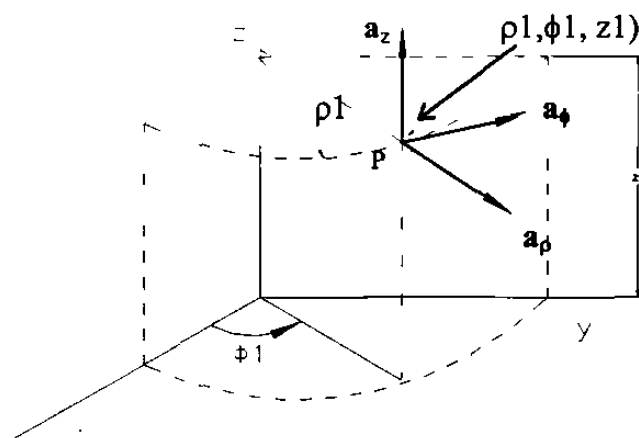


FIGURA 2.4 Superficies en Coordenadas Cilíndricas

Para coordenadas cilíndricas las superficies son:

$$\rho d\rho d\phi; \quad d\rho dz \quad y \quad \rho d\phi dz$$

Y el volumen es:

$$\rho d\rho d\phi dz$$

Las variables de los sistemas de coordenadas cilíndricas y rectangulares se relacionan fácilmente unas con otras. Con respecto a la figura (2.3):

$$\begin{array}{ll} x = \rho \cos \phi & \rho^2 = x^2 + y^2 \quad (\rho \geq 0) \\ (8) \quad y = \rho \operatorname{sen} \phi & (9) \quad \phi = \operatorname{tag}^{-1} y/x \\ z = z & z = z \end{array}$$

Una función vectorial en un sistema de coordenadas, requiere dos pasos para ser transformada a otro sistema de coordenadas. Esto es, se puede dar un vector cartesiano;

$$\mathbf{A} = A_x \mathbf{a}_x + A_y \mathbf{a}_y + A_z \mathbf{a}_z$$

y un vector en coordenadas cilíndricas;

$$\mathbf{A} = A_\rho \mathbf{a}_\rho + A_\phi \mathbf{a}_\phi + A_z \mathbf{a}_z$$

para encontrar cualquier componente deseada, de un vector, se obtiene tomando el producto punto del vector con un vector unitario en la dirección deseada.

$$A_\rho = \mathbf{A} \cdot \mathbf{a}_\rho \qquad A_\phi = \mathbf{A} \cdot \mathbf{a}_\phi, \qquad A_z = A_z$$

La transformación de vectores de coordenadas cartesianas a cilíndricas y viceversa se realiza empleando (8) y (9) para cambiar variables, y empleando los productos punto de los vectores unitarios dados en la siguiente tabla;

	\mathbf{a}_ρ	\mathbf{a}_ϕ	\mathbf{a}_z
$\mathbf{a}_x \cdot$	$\cos \phi$	$-\text{sen } \phi$	0
$\mathbf{a}_y \cdot$	$\text{sen } \phi$	$\cos \phi$	0
$\mathbf{a}_z \cdot$	0	0	1

TABLA 2.1 Producto punto de vectores unitarios del sistema de coordenadas cilíndricas y del sistema cartesiano.

Ahora se verá cómo se expresan los operadores diferenciales en este sistema. Si $\mu = \mu(\rho, \phi, z)$, entonces

$$d\mu = (\partial\mu/\partial\rho)d\rho + (\partial\mu/\partial\phi)d\phi + (\partial\mu/\partial z)dz$$

Entonces, la expresión en coordenadas cilíndricas para el gradiente es:

$$\nabla \cdot \mu = (\partial\mu/\partial\rho)\mathbf{a}_\rho + (1/\rho)(\partial\mu/\partial\phi)\mathbf{a}_\phi + (\partial\mu/\partial z)\mathbf{a}_z \quad (10)$$

$$\text{Divergencia, } \nabla \cdot \mathbf{A} = (1/\rho)(\partial/\partial\rho)(\rho A_\rho) + (1/\rho)(\partial A_\phi/\partial\phi) + (\partial A_z/\partial z) \quad (11)$$

Rotacional,

$$\nabla \times \mathbf{A} = [(1/\rho)(\partial A_z / \partial \phi) - (\partial A_\phi / \partial z)] \mathbf{a}_\rho + (\partial A_\rho / \partial z - \partial A_z / \partial \rho) \mathbf{a}_\phi + [(1/\rho)(\partial / \partial \rho)(\rho A_\phi) - ((1/\rho) \partial A_\rho / \partial \phi)] \mathbf{a}_z \quad (12)$$

Laplaciano,
$$\nabla^2 \mu = (1/\rho)(\partial / \partial \rho)(\rho \partial \mu / \partial \rho) + (1/\rho^2)(\partial^2 \mu / \partial \phi^2) + (\partial^2 \mu / \partial z^2) \quad (13)$$

siendo μ una función escalar de la posición.

2.5 COORDENADAS ESFÉRICAS.

En este sistema, la localización de un punto P, está especificada por las tres cantidades r , θ , ϕ que se muestran en la figura 2.5. Se puede observar que r es la distancia desde el origen y, por lo tanto, la magnitud del vector de posición \mathbf{r} ; que θ es el ángulo formado por \mathbf{r} con el eje z positivo, y que ϕ es, otra vez, el ángulo formado entre el eje x positivo y la proyección de \mathbf{r} sobre el plano xy . Las relaciones entre las coordenadas rectangulares y las esféricas son, como se puede observar,

$$x = r \sin \theta \cos \phi \quad y = r \sin \theta \sin \phi \quad z = r \cos \theta \quad (14)$$

de manera que

$$r^2 = (x^2 + y^2 + z^2) \quad \theta = \cos^{-1} [z / (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}] \quad \phi = \tan^{-1} (y/x) \quad (15)$$

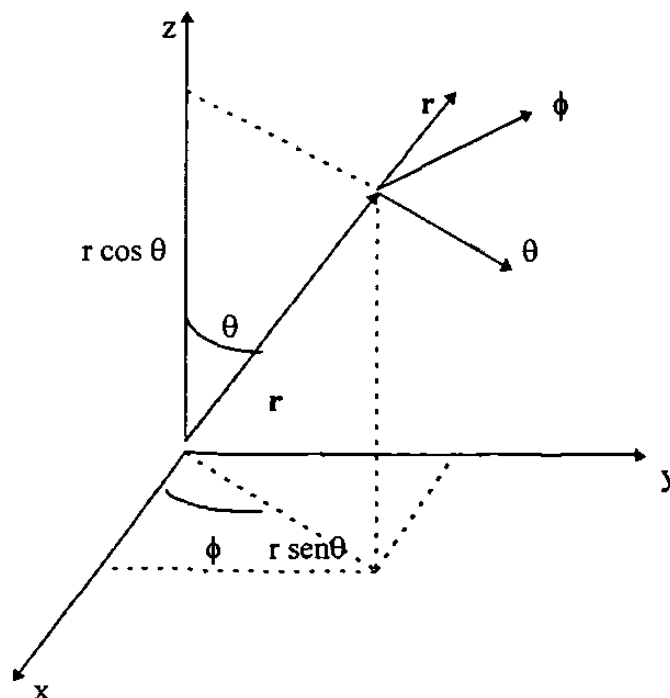


FIGURA 2.5 Sistema de Coordenadas Esféricas

Las superficies de las coordenadas esféricas, las áreas de las superficies y el volumen se muestran en la siguiente figura (2.6).

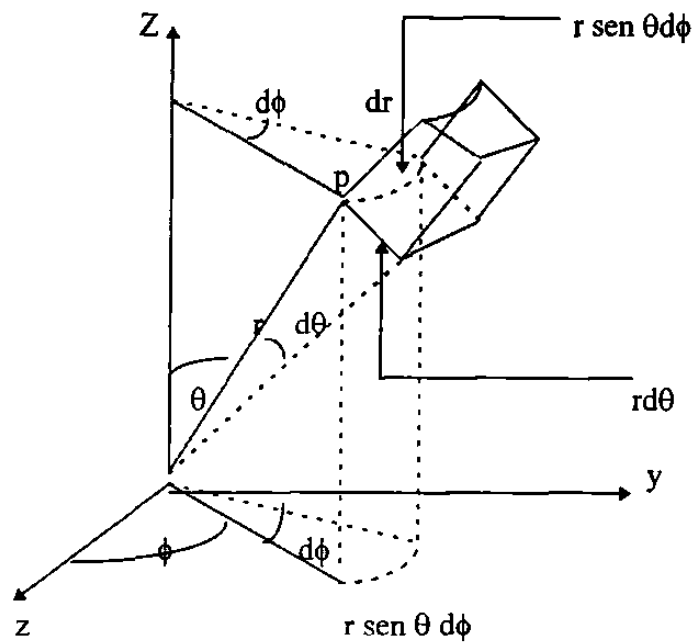


FIGURA 2.6 Superficies en Coordenadas Esféricas

De manera que;

las superficies son $r dr d\theta$, $r \sin \theta dr d\phi$ y $r^2 \sin \theta d\theta d\phi$

el volumen $r^2 \sin \theta dr d\phi d\theta$

la transformación de vectores requiere la determinación de los productos de los vectores unitarios en coordenadas cartesianas y esféricas empleando la tabla;

	a_r	a_θ	a_ϕ
$a_x \bullet$	$\text{sen}\theta \cos\phi$	$\cos\theta \cos\phi$	$-\text{sen}\phi$
$a_y \bullet$	$\text{sen}\theta \text{sen}\phi$	$\cos\theta \text{sen}\phi$	$\cos\phi$
$a_z \bullet$	$\cos\theta$	$-\text{sen}\theta$	0

TABLA 2.2. Productos punto de vectores unitarios en sistemas de coordenadas esféricas y cartesianas

Si $\mu = \mu(r, \theta, \phi)$, entonces

$$d\mu = (\partial\mu/\partial r)dr + (\partial\mu/\partial\theta)d\theta + (\partial\mu/\partial\phi)d\phi \quad (16)$$

de manera que el gradiente,

$$\nabla\mu = (\partial\mu/\partial r)a_r + [(1/r) (\partial\mu/\partial\theta)] a_\theta + [(1/r\text{sen}\theta) (\partial\mu/\partial\phi)]a_\phi \quad (17)$$

Divergencia,

$$\nabla \bullet A = (1/r^2)(\partial/\partial r)(r^2 A_r) + (1/r\text{sen}\theta)(\partial/\partial\theta)(A_\theta \text{sen}\theta) + (1/r\text{sen}\theta)(\partial A_\phi/\partial\phi) \quad (18)$$

Rotacional,

$$\nabla \times A = (1/r\text{sen}\theta)[(\partial/\partial\theta)(\text{sen}\theta A_\phi) - (\partial A_\theta/\partial\phi)]a_r + (1/r)[(1/\text{sen}\theta)(\partial A_r/\partial\phi) - (\partial/\partial r)(r A_\phi)]a_\theta + (1/r)[(\partial/\partial r)r A_\theta - (\partial A_r/\partial\theta)]a_\phi \quad (19)$$

Laplaciano,

$$\nabla^2 \mu = (1/r^2)(\partial/\partial r)(r^2)(\partial\mu/\partial r) + (1/r^2 \text{sen}\theta)(\partial/\partial\theta)(\text{sen}\theta)(\partial\mu/\partial\theta) + (1/r^2 \text{sen}^2\theta)(\partial^2 \mu/\partial\phi^2) \quad (20)$$

2.6. LEY DE COULOMB

Coulomb afirmó que la fuerza entre dos objetos muy pequeños separados en el vacío o en el espacio libre por una distancia comparativamente grande en relación con el tamaño de los objetos, es proporcional a la carga en cada uno e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa o sea,

$$F = (K Q_1 Q_2) / R^2 \quad (21)$$

donde Q_1 y Q_2 son las cantidades de carga positiva o negativa, R es la separación, y K es una constante de proporcionalidad. Si se utiliza el sistema internacional de Unidades (SI), Q se mide en coulombios (Coulombs) (C), R en metros y la fuerza en Newton (N). Esto se cumple si la constante K se escribe como

$$K = (1) / (4\pi\epsilon_0) \quad (22)$$

donde la constante ϵ_0 es llamada capacidad inductiva específica del espacio libre y tiene una magnitud medida en Faradios por cada metro (F/m),

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} = (1 \times 10^{-9}) / (36\pi) \quad \text{F/m}$$

La Ley de Coulomb resulta ahora

$$F = (Q_1 Q_2) / (4\pi\epsilon_0 R^2) \quad (23)$$

El Coulomb es una unidad de carga extremadamente grande, pues la cantidad más pequeña de carga conocida, es el electrón (negativo) o la del protón (positivo), que en unidades mks tiene un valor de 1.60218×10^{-19} C, y de aquí que una carga negativa de un coulomb representa alrededor de 6×10^{18} electrones.

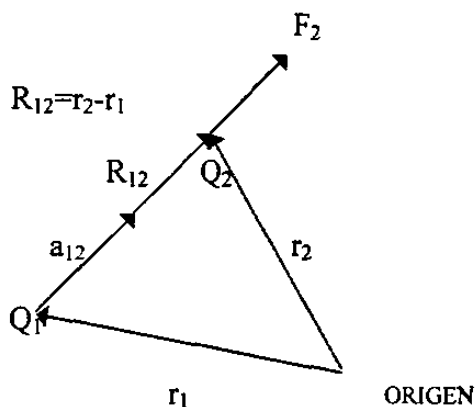


FIGURA 2.7 Representación de la distancia entre dos cargas (Ley de Coulomb)

Para escribir la forma vectorial de (23), se necesita el hecho adicional de que la fuerza actúa a lo largo de la línea que une a las dos cargas y es repulsiva si las cargas son similares en signo y atractiva si son de signos opuestos. Sea r_1 el vector que localiza a Q_1 y r_2 el que localiza a Q_2 . Entonces, el vector $R_{12} = r_2 - r_1$ representa al segmento de recta dirigido de Q_1 a Q_2 , como se muestra en la figura 2.7. El vector F_2 es la fuerza sobre Q_2 , y se muestra para el caso en el que Q_1 y Q_2 tienen el mismo signo. La ley de Coulomb en forma vectorial es:

$$F_2 = (Q_1 Q_2 / 4\pi\epsilon_0 R_{12}^2) a_{12} \quad (24)$$

donde $a_{12} = a$ un vector unitario en la dirección de R_{12} , o sea

$$a_{12} = (R_{12} / |R_{12}|) = (r_2 - r_1) / (|r_2 - r_1|)$$

2.7. INTENSIDAD DEL CAMPO ELÉCTRICO

Si ahora se considera una carga en posición fija, por ejemplo Q_1 y se mueve lentamente una segunda carga a su alrededor, se nota que en todas partes existe una fuerza sobre esta segunda carga. En otras palabras, esta segunda carga pone de manifiesto la existencia de un campo de fuerza. A esta segunda carga se le llama carga de prueba Q_t . La fuerza sobre ella está dada por la ley de Coulomb,

$$\mathbf{F}_t = (Q_1 Q_t \mathbf{a}_{r1t}) / (4\pi\epsilon_0 R_{1t}^2) \quad (25)$$

Si se escribe esta fuerza como una fuerza por unidad de carga; se obtiene

$$(\mathbf{F}_t) / (Q_t) = (Q_1 \mathbf{a}_{r1t}) / (4\pi\epsilon_0 R_{1t}^2) \quad (26)$$

La cantidad en el lado derecho de esta expresión es una función únicamente de Q_1 y del segmento de línea dirigido desde Q_1 a la posición de la carga prueba. Se trata de un vector campo al cual se le llama intensidad de campo eléctrico.

Si se utiliza una E mayúscula para designar la intensidad de campo eléctrico, se obtiene finalmente.

$$\mathbf{E} = (\mathbf{F}_t / Q_t) \quad (27)$$

$$\mathbf{E} = (Q_1 \mathbf{a}_{r1t}) / (4\pi\epsilon_0 R_{1t}^2) \quad \text{ó} \quad \mathbf{E} = (Q \mathbf{a}_R) / (4\pi\epsilon_0 R^2) \quad (28)$$

Se debe recordar que R es la magnitud del vector \mathbf{R} , el segmento de recta dirigido desde el punto en donde se localiza la carga puntual Q , hasta el punto en el cual se desea conocer \mathbf{E} , y que \mathbf{a}_R es un vector unitario en la dirección de \mathbf{R} . La intensidad de campo eléctrico para la familia de distribuciones de carga es:

$$\text{Puntual} \quad \mathbf{E} = (Q_1 \mathbf{a}_R) / (4\pi\epsilon_0 R^2) \quad (29)$$

Sistema de Cargas:

$$\mathbf{E} = \sum_{m=1}^n (Q_m \mathbf{a}_{Rm}) / (4\pi\epsilon_0 R_m^2) \quad (30)$$

Distribución continua de carga volumétrica

$$\mathbf{E} = \int_{vol} \{ \rho \, dv / (4\pi\epsilon_0 R^2) \} \mathbf{a}_R \quad (31)$$

$$\text{lineal} \quad \mathbf{E} = (\rho_L \mathbf{a}_\rho) / (2\pi\epsilon_0 \rho) \quad (32)$$

$$\text{superficial} \quad \mathbf{E} = (\rho_S \mathbf{a}_n) / (2\epsilon_0) \quad (33)$$

2.8 DENSIDAD DE FLUJO ELECTRICO

A la densidad de flujo eléctrico medida en Coulombs por metro cuadrado, se le asigna la letra D, la cual se eligió originalmente a causa de los nombres alternativos de densidad de flujo de desplazamiento o densidad de desplazamiento.

$$\mathbf{D} = (Q \mathbf{a}_r) / (4\pi\epsilon_0 r^2) \quad (34)$$

en el espacio libre

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} \quad (35)$$

2.9. LEY DE GAUSS

El flujo eléctrico que pasa a través de cualquier superficie cerrada es igual a la carga total encerrada por esa superficie.

$$\psi = \int_s \mathbf{D}_s \cdot d\mathbf{s} = \text{carga encerrada} = Q \quad (36)$$

entonces,

$$\oint_s \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = (1 / \epsilon_0) \sum_{\text{Dentro}} q_i = (Q_{\text{en}} / \epsilon_0) \quad (37)$$

donde Q_{en} es la carga neta contenida dentro del volumen limitado por la superficie arbitraria, S. Dado que

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^N [(q_i \mathbf{a}_{R_i}) / (4\pi\epsilon_0 R_i^2)] \quad (38)$$

tenemos,

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = 1 / (4\pi\epsilon_0) [\sum_i q_i \oint_S (\mathbf{a}_{R_i} \cdot d\mathbf{s}) / (R_i^2)] \quad (39)$$

Hay dos casos que merecen consideración especial.

1. Si se encuentra dentro de S, tenemos la ecuación

$$\oint_S [(\mathbf{a}_r \cdot d\mathbf{s}) / (R_i^2)] = 4\pi \quad (40)$$

2. Si está fuera S, tenemos la ecuación (41)

$$\oint_S (\mathbf{a}_r \cdot d\mathbf{s}) / (R_i^2) = 0$$

NOTA: Ver derivación de la ley de Gauss; Teoría Electromagnética, pag. 61, Roald K Wangsness edición 1992

Se puede exponer ahora algunas implicaciones importantes de este resultado. Cualesquiera cargas que se encuentran fuera de una superficie cerrada no afectan el valor de la integral, aunque sus valores y localizaciones si afectan el valor particular de E en cada punto de la superficie. De manera similar, la integral es función únicamente del valor total de las cargas que se encuentran dentro de la superficie y, por lo tanto, es independiente de sus localizaciones específicas dentro de dicha superficie; si las cargas cambian de posición, cabe esperar que el valor de E en un punto particular de la superficie cambie también, aun cuando el valor de la integral completa no se afecte. Dado que el resultado obtenido en (39) es una simple suma, se puede observar que cada una de las cargas contribuye independientemente al flujo total de E a

través de S; por lo tanto, una carga puntual dada, que, posee un flujo total de \mathbf{E} igual a (q/ϵ_0) a través de cualquier superficie cerrada que la rodee.

Si ahora se asume que las cargas dentro de S están distribuidas en forma continua con densidad ρ , se puede escribir

$$Q_{en} = \int_v \rho \, d\tau \quad (42)$$

dado V es el volumen total encerrado por S. Si también se aplica el teorema de la divergencia, se tiene

$$\int_v \nabla \cdot \mathbf{E} \, d\tau = (1/\epsilon_0) \int_v \rho \, d\tau \quad (43)$$

Dado que este resultado se aplica para cualquier volumen V arbitrario, será también válida para una infinitamente pequeña, por lo que se pueden igualar los integrandos para obtener

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = (\rho / \epsilon_0)$$

Este importante resultado es una de las ecuaciones de Maxwell y es completamente equivalente a la ley de Coulomb para la fuerza entre partículas cargadas.

CAPITULO 3

INDUCCIÓN Y FUERZAS ELECTROMAGNÉTICAS

3.1 CONCEPTOS BÁSICOS

3.1.1) Materiales conductores en campos electrostáticos.

En el contexto presente, un material conductor es aquel que permite el movimiento libre de cargas eléctricas durante el intervalo de observación. En problemas electrostáticos se les puede considerar como materiales conductores si dicho intervalo de observación es mayor que el tiempo de equilibrio.

Cuando un cuerpo conductor sin carga se coloca en un campo eléctrico, las cargas libres en él se deben redistribuir para producir un campo neto igual a cero en el interior del cuerpo. Considerese, por ejemplo, una esfera de cobre colocada en un campo eléctrico uniforme. El cobre contiene aproximadamente 10^{29} electrones conductores por metro cúbico, y su carga está balanceada por las cargas iguales y opuestas de los núcleos iónicos fijadas en la celosía cristalina. La carga de conducción disponible es del orden de 10^{10} cm^{-3} , y sólo es necesario redistribuir una pequeña cantidad de esta carga para cancelar cualquier campo eléctrico factible. Esta redistribución da pie a una carga superficial, semejante a la mostrada en la figura 3.1, cuyo campo en la esfera es igual y opuesto al campo en el cual se colocó la esfera. Esta carga superficial se conoce como carga inducida.

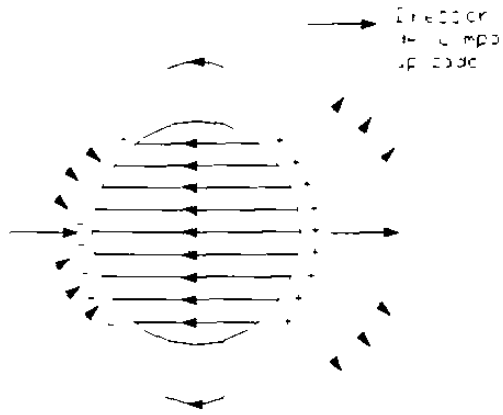


FIGURA 3.1 Patrón de campo de la carga inducida en una esfera conductora colocada en un campo eléctrico uniforme.

El patrón de campo que se obtiene al sobre poner el campo de las cargas inducidas al campo uniforme se muestra en la figura 3.2

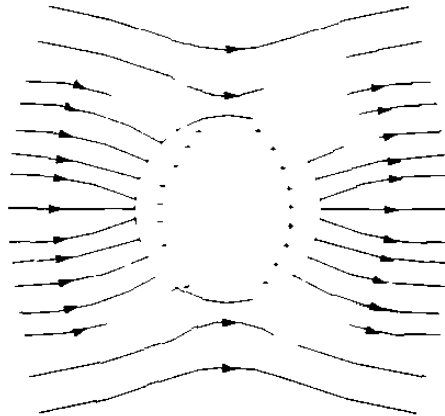


FIGURA 3.2 Patrón de campo de una esfera conductora en un campo eléctrico uniforme.

3.1.2) Ley de Faraday (acción transformadora)

Cuando se altera el flujo que enlaza un circuito eléctrico de N vueltas, se induce en este último una fuerza electromotriz, que es, en cualquier instante de tiempo, igual al negativo de la velocidad de cambio del enlace de flujo:

$$\text{f.e.m.} = - N (d\phi / dt) V \quad (1)$$

El signo negativo indica que la fuerza electromotriz (f.e.m.) se encuentra en dirección tal que produce una corriente cuyo flujo, si se agregara al flujo original, reduciría la magnitud de esa f.e.m.

Si sólo se requiere la magnitud de la fuerza electromotriz sin la dirección instantánea, el signo negativo se puede omitir y la fem es relativa a la variación de flujo.

Este enunciado de que el voltaje inducido actúa para producir un flujo opuesto se conoce como ley de Lenz.

Esta ecuación (1) se puede aplicar a conductores que llevan corriente, pero también a cualquier trayecto de circuito que haya en el espacio, y a través del cual pudiera modificarse el flujo.

Se sabe también que la fuerza electromotriz en todo circuito cerrado en cualquier sitio se define como la integral de línea del campo eléctrico que rodea a este circuito:

$$\text{f.e.m.} = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (2)$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - N (d\phi / dt) \quad (3)$$

Ya que

$$\phi = \int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \quad (4)$$

luego

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -d/dt \int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \quad (5)$$

para un campo constante y un circuito que se mueve, y

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_s (\partial \mathbf{B} / \partial t) \cdot d\mathbf{s} \quad (6)$$

para un circuito estacionario y un campo cambiante.

Ahora, la fuerza electromotriz que rodea al trayecto cerrado ($\mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$) es, desde luego, el voltaje inducido. También $\mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$ proporciona el flujo total a través de la superficie s , limitado por el circuito cerrado que se mueve con respecto al campo. O bien, si el circuito es estacionario, éste es el campo cambiante que se está enlazando con el circuito.

3.2 ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

3.2.1) Ecuaciones de Maxwell

Agrupamos aquí algunas relaciones desarrolladas en las secciones precedentes. Estas relaciones, que se refieren a los principales vectores de campo y consisten en cuatro expresiones, reciben el nombre de ecuaciones de Maxwell.

La ley de Ampere sobre el trabajo, que relaciona la **integral** de línea \mathbf{H} alrededor de un trayecto cerrado con la corriente I contenida, está dada como

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I \quad (7)$$

Si reemplazamos la corriente por la **integral de superficie** de la densidad de corriente de conducción \mathbf{J}_{cond} sobre un área circundada por el trayecto de **integración** de \mathbf{H} , entonces

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J}_{\text{cond}} \cdot d\mathbf{s} \quad (8)$$

En términos más generales, se necesita incluir la densidad de corriente de desplazamiento; por tanto,

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S [\mathbf{J}_{\text{cond}} + (\partial \mathbf{D} / \partial t)] \cdot d\mathbf{s} \quad (9)$$

Esta es la primera ecuación de Maxwell en forma **integral**. Si se aplica el teorema de Stokes¹ a esta expresión, se obtiene la forma diferencial de la **primera** ecuación de Maxwell:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + (\partial \mathbf{D} / \partial t) \quad (10)$$

¹ Principles and applications of Electromagnetic Fields, Plosey/Collin, **Primera** edición

La segunda ecuación de Maxwell se obtiene a partir de la ley de Faraday que relaciona la fuerza electromotriz inducida (\mathcal{E}) en un circuito con la rapidez de decrecimiento del flujo magnético total de enlace del circuito:

$$\mathcal{E} = - (d\phi / dt) \quad (11)$$

Reemplazando el flujo de enlace ϕ con la integral de superficie de \mathbf{B} sobre el área circundada por el circuito.

$$\mathcal{E} = - (d / dt) \int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \quad (12)$$

y la sustitución de \mathcal{E} por la integral de línea de \mathbf{E} alrededor del circuito produce

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_s - (\partial \mathbf{B} / \partial t) \cdot d\mathbf{s} \quad (13)$$

La forma diferencial correspondiente es

$$\nabla \times \mathbf{E} = - (\partial \mathbf{B} / \partial t) \quad (14)$$

A partir del trabajo anterior, la ley de Gauss que relaciona la integral de superficie de la densidad de flujo eléctrico \mathbf{D} con la carga contenida que está dada como

$$\int_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = q \quad (15)$$

Al reemplazar q por la integral de volumen de la densidad de carga ρ en todo el volumen contenido por la superficie s , esta última expresión se puede escribir como

$$\int_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = \int_v \rho \, dv \quad (16)$$

Esta relación de campo es una generalización de la ley de Gauss y recibe el nombre de campo eléctrico de Maxwell o tercera ecuación. Aparece en forma integral y se aplica a un volumen finito v . Al aplicar esta ecuación a un volumen infinitesimal, la relación diferencial correspondiente es

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (17)$$

En el caso de los campos magnéticos, la integral de superficie de \mathbf{B} sobre una superficie cerrada s es cero. Entonces, la contraparte magnética de la relación de campo eléctrico de Gauss es

$$\int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (18)$$

con la correspondiente forma diferencial

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (19)$$

El flujo magnético que se genera desde cualquier superficie cerrada es siempre cero. Otras relaciones fundamentales que resultan de importancia al tratar con problemas electromagnéticos son:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -(\partial \rho / \partial t) \quad (\text{continuidad de carga}) \quad (20)$$

y las relaciones de fuerza

$$\mathbf{F}_E = q(\mathbf{E}) \quad (21)$$

y

$$\mathbf{F}_m = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (22)$$

de manera que los vectores de campo \mathbf{E} y \mathbf{B} se pueden expresar en la forma

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (23)$$

Las siguientes relaciones son propiedades del medio (materiales): $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$, $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ y $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ donde, ϵ , μ y σ son la permitividad, la permeabilidad y la conductividad.

Para los conductores y dieléctricos, $\sigma/\omega\epsilon$ es la proporción que existe entre la densidad de corriente de conducción y la densidad de corriente de desplazamiento; se puede usar como criterio para conductores y dieléctricos. Para los buenos conductores $\sigma/\omega\epsilon \gg 1$ a 30 000 Mhz; por ejemplo, para el cobre el valor es de 3.5×10^8 . Para los buenos dieléctricos $\sigma/\omega\epsilon \ll 1$; por ejemplo el valor para la mica es de 2×10^{-4} .

b) Ecuaciones de Maxwell en espacio libre. Este es un caso especial en el que la densidad de corriente \mathbf{J} y la densidad de carga ρ son cero; entonces las ecuaciones se reducen a una forma más simple.

En forma integral las ecuaciones son:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s (\partial \mathbf{D} / \partial t) \cdot d\mathbf{s} \quad (24)$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_s (\partial \mathbf{B} / \partial t) \cdot d\mathbf{s} \quad (25)$$

$$\oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (26)$$

$$\oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (27)$$

mientras que en forma diferencial son:

$$\nabla \times \mathbf{H} = (\partial \mathbf{D} / \partial t) \quad (28)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - (\partial \mathbf{B} / \partial t) \quad (29)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \quad (30)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (31)$$

c).Ecuaciones de Maxwell para campos variables en forma armónica

Si se da por supuesto que los campos varían en forma armónica con respecto al tiempo, se puede expresar las ecuaciones de Maxwell de otra manera especial; así, si \mathbf{D} varía con el tiempo, como está dado por

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}_0 e^{j\omega t} \quad (32)$$

Entonces

$$(\partial \mathbf{D} / \partial t) = j\omega \mathbf{D}_0 e^{j\omega t} = j\omega \mathbf{D} \quad (33)$$

Haciendo la misma suposición para \mathbf{B} , las ecuaciones de Maxwell en forma integral se reduce a:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = (\sigma + j\omega\epsilon) \int_s \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} \quad (34)$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -j\omega\mu \int_s \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} \quad (35)$$

$$\oint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = \int_s \rho \, dv \quad (36)$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (37)$$

En forma diferencial, las ecuaciones son

$$\nabla \times \mathbf{H} = (\sigma + j\omega\epsilon)\mathbf{E} \quad (38)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H} \quad (39)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (40)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (41)$$

Utilizando las ecuaciones de Maxwell se puede demostrar que la frecuencia angular (frecuencia de inspección) afecta la profundidad de penetración como se verá en el capítulo 4.

De las ecuaciones de Maxwell en forma diferencial

$$-(\partial H_z / \partial x) = (\epsilon \partial E_y / \partial t) + \sigma E_y \quad \sigma = \text{conductividad} \quad (42)$$

$\epsilon =$ permitividad

$$(\partial H_y / \partial x) = (\epsilon \partial E_y / \partial t) + \sigma E_z \quad \mu = \text{permeabilidad} \quad (43)$$

$$(\partial E_z / \partial x) = (\mu \partial H_y / \partial t) \quad (44)$$

$$(\partial E_y) / (\partial x) = - (\mu \partial H_z) / (\partial t) \quad (45)$$

Entonces: $-(\partial^2 H_z / \partial x \partial t) = [(1 / \mu) (\partial^2 E_y / \partial x^2)]$ (46)

$$-(\partial^2 H_z / \partial x \partial t) = (\epsilon \partial^2 E_y / \partial t^2) + (\sigma \partial E_y / \partial t) \quad (47)$$

Por tanto, $[(1 / \mu)] [(\partial^2 E_y) / (\partial x^2)] = (\partial^2 E_y / \partial t^2) + (\sigma \partial E_y / \partial t)$ (48)

dado que estas cantidades varían en forma sinusoidal con el tiempo, entonces

$$[(1 / \mu)(\partial^2 \mathbf{E} / \partial x^2)] = -\omega^2 \epsilon \mathbf{E} + j\omega \sigma \mathbf{E} \quad (49)$$

$$(\partial^2 \mathbf{E} / \partial x^2) = j\omega(\sigma + j\omega\epsilon) \mu \mathbf{E} = \gamma^2 \mathbf{E} \quad (50)$$

Donde $\gamma^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)$ y γ = coeficiente de propagación y es igual a $(\alpha + j\beta)$

Entonces la solución es:

$$\mathbf{E} = E_0 e^{j\omega t} e^{-\gamma x} \quad (51)$$

$$\mathbf{E} = E_0 e^{j\omega t} e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} = E_0 e^{-\alpha t} e^{-j(\omega t - \beta x)} \quad (52)$$

Esto representa una onda que viaja en la dirección positiva de x con una velocidad ω/β y que está atenuada por el factor $e^{-\alpha x}$.

La profundidad de penetración δ es aquella en la que se ha atenuado a $1/e$ de su valor original la onda que viaja en un conductor. La amplitud de la onda disminuye por un factor de $e^{-\alpha x}$, por lo tanto, cuando $\alpha x = 1$, la amplitud es de $1/e$ de su valor en $x = 0$. Por tanto, cuando $x = \delta$, esto significa que por definición la profundidad de penetración es $\delta = 1/\alpha$. En general,

$$\delta = \frac{1}{\omega \left\{ \mu \epsilon / 2 \left[(1 + \sigma^2 / \omega^2 \epsilon^2)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2}} \quad (53)$$

Para un buen conductor,

$$\alpha = \left[\frac{\omega \mu \sigma}{2} \right]^{1/2} \quad (54)$$

Así,

$$\delta = \left[\frac{2}{\omega \mu \sigma} \right]^{1/2} \quad (55)$$

3.3 CORRIENTES DE FOUCAULT.

El fenómeno de inducción electromagnética no solo se presenta en los alambres conductores, sino en todos los materiales que son expuestos a un flujo magnético variable en el tiempo.

Tomemos una trayectoria cerrada, por ejemplo la marcada con 1 en la figura 3.3. A través del área limitada por esta trayectoria se observa una variación de flujo magnético y en consecuencia se induce una fem. y una corriente, esta última circulara sobre dicha trayectoria.

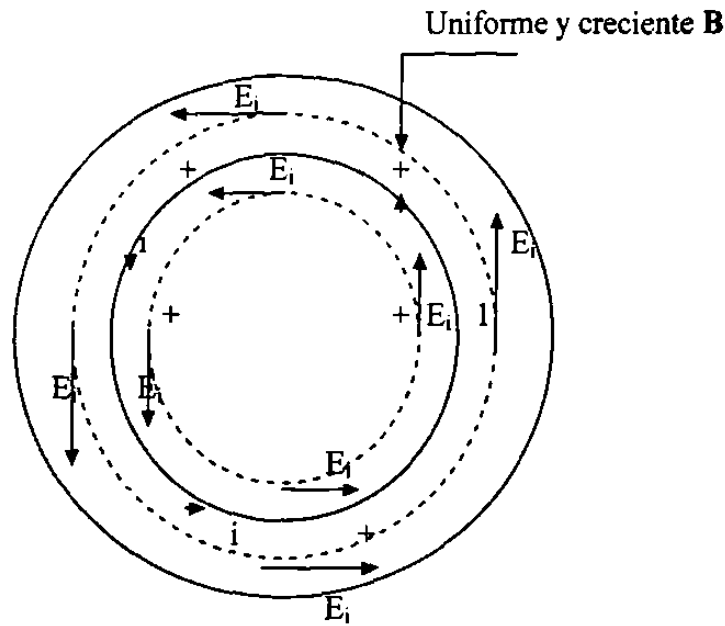


FIGURA 3.3. Relación de los vectores de intensidad del campo magnético y eléctrico en un material inmerso en un flujo magnético variable en el tiempo.

El sentido de la corriente ha sido determinado por medio del principio de Lenz, considerado que el flujo que engloba está aumentando, y la fem Inducida es la circulación del campo eléctrico a lo largo de la trayectoria de la corriente, es decir.

$$V_i = \oint \mathbf{E}_i \cdot d\mathbf{l} = -(\dot{\phi})/dt \quad (56)$$

Donde: V_i es el voltaje inducido en la trayectoria considerada

La magnitud del campo eléctrico inducido en una trayectoria circular concéntrica al núcleo de la figura 3.3, para un radio cualquiera $r < R$, está dada por la expresión

$$E_i = (r/2)(dB/dt) \quad (57)$$

En la práctica de la ingeniería existen diversos equipos que operan con corriente alterna. Si la corriente, en el embobinado que produce el flujo ϕ de la figura, fuera alterna, tendríamos

que la corriente inducida cambiaría de sentido con la misma frecuencia que dicha corriente alterna

Las corriente inducidas encuentran a su paso la resistencia eléctrica del material, que depende de la longitud de la trayectoria seguida por la corriente, de la sección por la cual circula y de la resistividad del material.

En la ingeniería se han encontrado aplicaciones útiles al fenómeno de las corrientes de Foucault; tales son los casos de las maquinas soldadoras que operan bajo este principio y en las cuales se llegan a aplicar corrientes alternas del orden de varios cientos de kilohertz con el objeto de lograr altas temperaturas en algunas zonas de los materiales , el freno magnético , en el cual las fuerzas de origen magnético sobre la corriente de remolino, originan un momento contrario a la rotación del cuerpo en cuestión, lo que redundo en una disminución de su velocidad angular, y por otro lado la inspección por corrientes de Foucault, la cual es un técnica de inspección no destructiva basada en la inducción de corrientes eléctricas en el material que se inspecciona.

CAPITULO 4

PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE LAS CORRIENTES DE FOUCAULT

4.1 ARREGLO BÁSICO EN LA INSPECCIÓN POR CORRIENTES DE FOUCAULT

A fin de mostrar el principio básico de las corrientes de Foucault se utiliza el siguiente arreglo que consiste en una fuente de corriente alterna (oscilador), una sonda que contiene una bobina conectada a la corriente, y un voltímetro que mide el cambio de voltaje que se produce en la bobina según se indica en la figura 4.1.

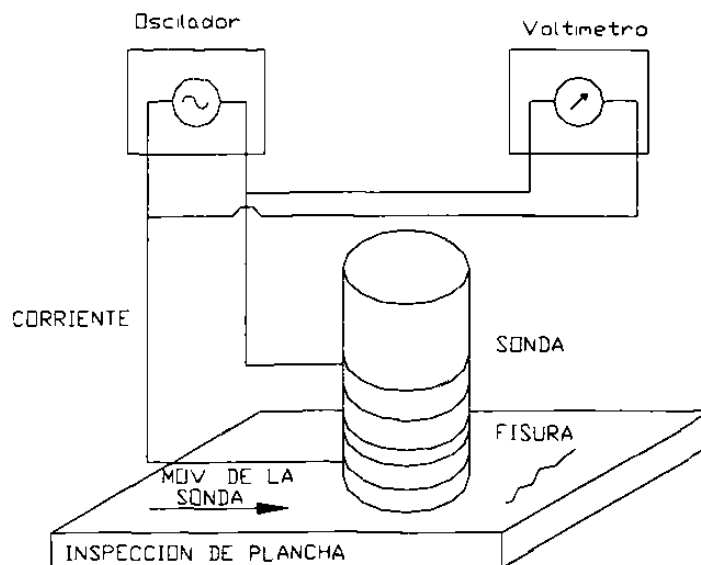


FIGURA 4.1 Arreglo para la inspección por corrientes de Foucault

El oscilador deberá poder generar una corriente variable en el tiempo (generalmente sinusoidal) a frecuencias que varían desde aproximadamente 1kHz a 2 Mhz.

Según sea el tipo de inspección que se practica, una sonda por corrientes de Foucault puede consistir en una bobina de inspección única, una bobina de excitación con una bobina sensora separada, o una bobina de excitación con un detector sensor del efecto Hall, según se muestra en la figura 4.2.

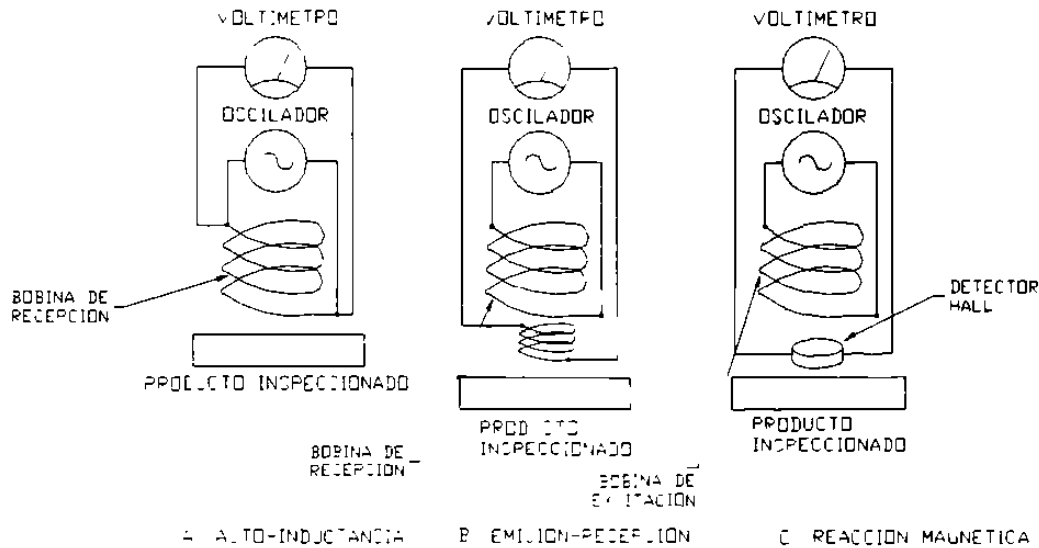


FIGURA 4.2 Sistemas de inspección por corrientes de Foucault

El flujo se crea haciendo circular una corriente alterna por la bobina de inspección. Cuando esta bobina se aproxima a la muestra conductora, se inducen corrientes de Foucault. Por otra parte, el flujo magnético asociado con las corrientes de Foucault se oponen al flujo magnético de la bobina reduciendo con ello el flujo neto. Esto resulta en un cambio en la impedancia de la bobina y en un descenso en el voltaje. Es la oposición entre los campos primario (de la bobina) y secundario (de las corrientes de Foucault) lo que crea la base para la obtención de la información durante la inspección por corrientes de Foucault. Es preciso señalar que si la muestra es de un material magnético, la alta permeabilidad magnética de los materiales ferromagnéticos la distingue de los no-ferromagnéticos e influye potentemente sobre los parámetros de la inspección por corrientes de Foucault.

4.2 PROPIEDADES FUNDAMENTALES DEL FLUJO DE LAS CORRIENTES DE FOUCAULT

La frecuencia de inspección determina la profundidad de penetración en la muestra; a medida que aumenta la frecuencia disminuye la penetración y la distribución de corrientes de Foucault se hace más densa cerca de la superficie del espécimen.

Tanto las corrientes de Foucault como el flujo magnético se debilitan con la profundidad debido al efecto pelicular. Además de esta atenuación, las corrientes de Foucault experimentan un retraso de fase o defasaje con la profundidad. Este retraso de fase de las corrientes de Foucault es el parámetro clave que hace que la inspección con estas corrientes sea un método de inspección no destructivo útil.

Las relaciones algebraicas y la representación en el osciloscopio de las corrientes de Foucault así como la distribución del campo magnético en función de la profundidad en el espécimen se representan en la figura 4.3.

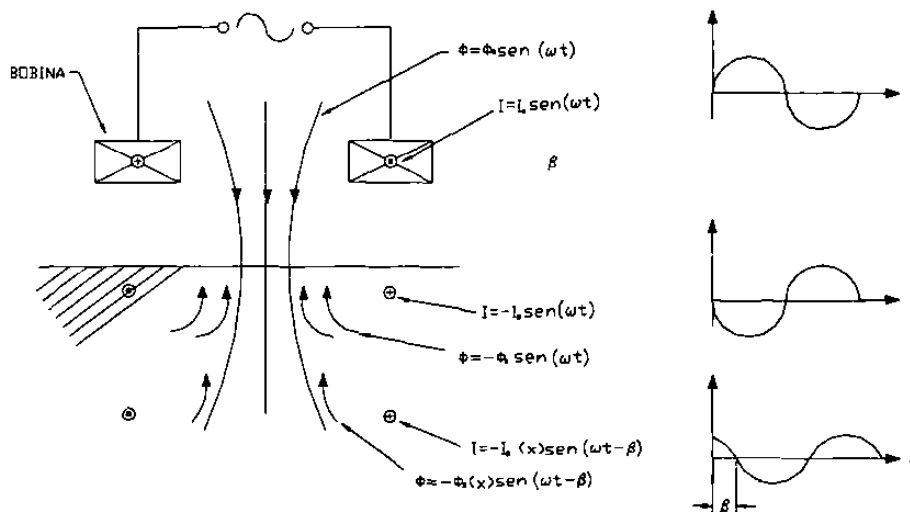


FIGURA 4.3 distribución de las corrientes de Foucault y del flujo magnético en un conductor en función de la profundidad.

4.3 EFECTO PELICULAR

Las corrientes de Foucault que fluyen en el objeto que se examina a cualquier profundidad producen campos magnéticos que se oponen al campo primario, reduciendo así el flujo magnético neto y causando una disminución en el flujo de corriente a medida que aumenta la profundidad.

Analicemos el cuadro físico donde se presenta la teoría elemental del efecto pelicular y sus consecuencias, esencia del fenómeno: La corriente constante se distribuye uniformemente por la sección transversal del conductor. Para la corriente alterna debido a la interacción magnética de los diversos elementos de corriente entre sí ocurre la redistribución de la densidad de la corriente por la sección transversal del conductor debido a lo cual la corriente se concentra principalmente en la capa superficial del conductor. La concentración de la corriente alterna en las inmediaciones de la superficie del conductor se denomina efecto pelicular.

Examinemos un conductor cilíndrico por el que circula una I_t y alrededor del conductor en un $B(t)$.

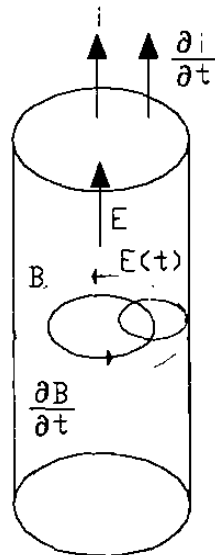


FIGURA 4.4 Cuadro físico donde se presenta la teoría elemental del efecto pelicular.

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{J}_c + \mathbf{J}_D) \quad (1)$$

Si J_c varia con respecto al tiempo y además

$$\nabla \times \mathbf{E} = -(\partial \mathbf{B} / \partial t) \quad (2)$$

Entonces se produce un reforzamiento de los mismos en las zonas cercanas a la superficie; surge entonces el efecto pelicular:

Si partimos de la ecuación de Maxwell

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}_c \quad \text{ya que en un conductor } J_c \gg J_D$$

$$\mathbf{J}_c = \sigma \mathbf{E} \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \sigma \mathbf{E} \quad (4)$$

$$\nabla \times (\partial \mathbf{B} / \partial t) = \mu_0 \sigma (\partial \mathbf{E} / \partial t) \quad (5)$$

y como $\nabla \times \mathbf{E} = -(\partial \mathbf{B} / \partial t) \quad (6)$

$$-\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \mu_0 \sigma (\partial \mathbf{E} / \partial t) \quad (7)$$

$$-\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} = -\nabla^2 \mathbf{E} \quad (8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (9)$$

Ya que no hay carga neta y la carga no se acumula, sino que fluye.

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \sigma (\partial \mathbf{E} / \partial t) \quad (10)$$

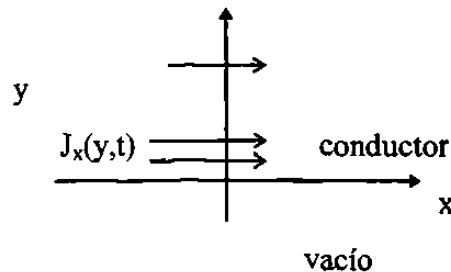
Para simplificar la solución de esta ecuación supongamos que la corriente circula por un conductor homogéneo infinito que ocupa el semi-espacio $y > 0$ a lo largo del eje x , la superficie del conductor es el plano $y=0$.

De esta forma la corriente debe variar en y y t y de la misma forma \mathbf{E} .

Donde

$$J_x = J_x(y,t) \quad J_y = J_z = 0$$

$$E_x = E_x(y,t) \quad E_y = E_z = 0$$



Entonces:

$$[\partial^2 E_x(y,t)] / (\partial y^2) = (\mu_0 \sigma) [\partial E_x(y,t)] / (\partial t) \quad (11)$$

Si las magnitudes dependen armónicamente de t ; $E_x(y,t) = E_x(y) \cos \omega t$.

Donde se ve que la amplitud de este campo varía al moverse sobre y . Es conveniente introducir una notación que represente al campo como un fasor complejo en el entendido que solo la parte real tiene significado físico:

$$E_x(y,t) = \text{Re} E_x(y) e^{i\omega t} \quad (12)$$

Sustituyendo en (11)

$$(\partial^2 E_x(y) / \partial y^2) e^{i\omega t} = \mu_0 \sigma i \omega E_x(y) e^{i\omega t} \quad (13)$$

$$(\partial^2 E_x(y) / \partial y^2) = \mu_0 \sigma \omega E_x(y) \quad (14)$$

Por el método de operadores

$$E_x(y) = A_1 e^{-iyp} + A_2 e^{iyp} \quad (15)$$

Donde A_1 y A_2 son constantes de amplitud y $p = \sqrt{\mu_0 \sigma \omega}$

Al alejarse de la superficie (y tiende a infinito) el segundo sumando crece ilimitadamente, lo que es inadmisibles desde el punto de vista físico $A_2 = 0$

$$E_x(y,t) = A_1 e^{-iyp} \quad (16)$$

$$E_x(y,t) = A_1 \cos(\omega t - yp) = E_x e^{-iyp} \cos(\omega t - yp) \quad (17)$$

Si además utilizamos la ley de Ohm en forma diferencial

$$J_x(y,t) = \sigma E_x(y,t) = \sigma E_x e^{-iyp} \cos(\omega t - yp) \quad (18)$$

El término exponencial negativo habla de un decrecimiento exponencial en la densidad de corriente de conducción y en la intensidad del campo eléctrico, con penetración hacia el conductor. El factor exponencial es unitario en $y=0$ y decrece hasta $1/e = 0.368$ cuando

$$y = (1/p) \quad (19)$$

Se denota esta distancia por δ y se llama profundidad de penetración

$$\delta = (1/p) = 1/\alpha = 1/\beta = 1 / \sqrt{f\pi\mu_0\sigma} \quad (20)$$

Por lo tanto,

$$\delta = (1 / \sqrt{f\pi\mu_0\sigma}) \quad (21)$$

Conclusiones: La densidad de corriente es máxima cerca de la superficie del conductor. Al alejarse de la superficie disminuye y a una distancia $\delta=1/\alpha$ se hace 1/e veces menor o sea 37% del valor en la superficie, figura 4.5.

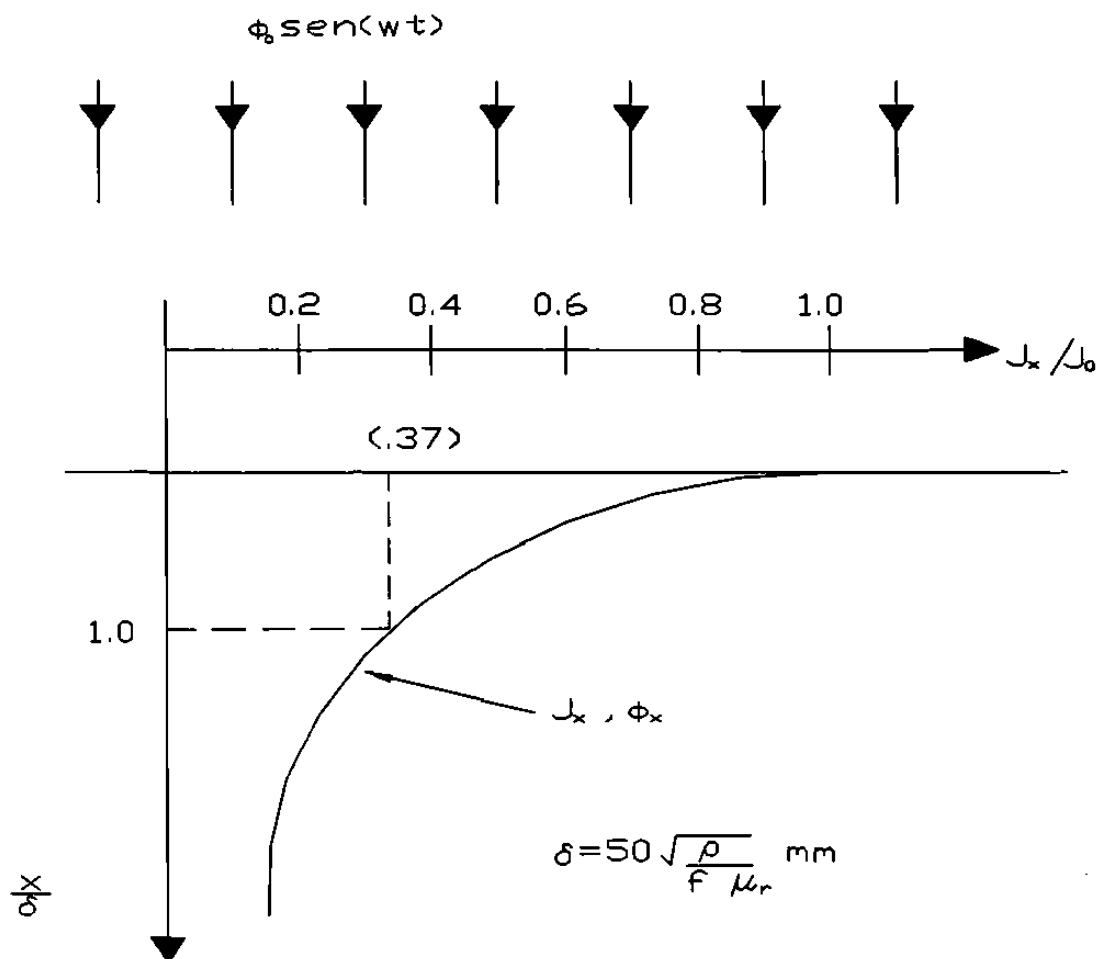


FIGURA 4.5 Distribución de las corrientes de Foucault y del flujo magnético en función de la profundidad en una placa gruesa.

4.4 PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN

La profundidad de penetración en un material depende de su resistividad eléctrica, permeabilidad magnética y de la frecuencia de la inspección. La ecuación básica de la inspección por corrientes de Foucault es la de la profundidad de penetración estándar, dada por:

$$\delta = 50 \sqrt{\rho / f \mu_r} , \text{ mm} \quad (22)$$

donde ρ es la resistividad eléctrica, en microohmios - centímetros;

f es la frecuencia de inspección, en hertzios;

y μ_r es la permeabilidad magnética relativa, que no tiene dimensiones.

4.5 ECUACIONES DE IMPEDANCIA Y DEFINICIONES

Toda la información acerca de una muestra se obtiene mediante cambios en la impedancia de la combinación bobina/muestra. Por lo tanto, en la inspección por corrientes de Foucault se impone un entendimiento fundamental de las magnitudes eléctricas.

RESISTENCIA: (símbolo: R , unidades: ohm, Ω)

La oposición al flujo de corriente eléctrica se denomina resistencia. Es constante tanto en corriente alterna como continua. El componente eléctrico se denomina resistor.

$$V = IR \quad \text{Ley de Ohm} \quad (23)$$

donde, V es la caída de voltaje a través del resistor (voltio), e I es la corriente que pasa por el resistor (amperio)

INDUCTANCIA: (símbolo: L, unidades: Henrio, H)

La propiedad de un circuito eléctrico por la que una corriente variable induce una fuerza electromotriz en el circuito mismo o en un circuito vecino (mutuo) se denomina inductancia. El componente eléctrico correspondiente se denomina inductor.

$$L = \frac{\text{número total de enlaces de flujo}}{\text{corriente que pasa por la bobina}}$$

$$L = (N\phi / I) \quad (24)$$

$$L = k_1 (N^2 A / \ell) \quad (25)$$

donde, N es el número de espiras en la bobina

ϕ es el flujo magnético (weber)

I es la corriente (amperios)

k_1 es el factor geométrico

A es el área de la superficie plana de la bobina (mm^2)

ℓ es la longitud axial de la bobina (mm)

La auto - inductancia de una bobina es proporcional al cuadrado de espiras (N^2) y al área de su superficie plana (A), e inversamente proporcional a la longitud de la bobina (ℓ)

REACTANCIA INDUCTIVA: (símbolo: X_L , unidades ohmio, Ω)

la oposición a cambios en la corriente alterna que fluye por la bobina se denomina Reactancia inductiva.

$$X_L = \omega L \quad (26)$$

ó

$$X_L = 2\pi fL \quad (27)$$

donde, f es la frecuencia de la corriente alterna (hertzios), y ω la frecuencia angular (radianes/segundo)

REACTANCIA CAPACITIVA (símbolo: X_c , unidades: ohmio, Ω)

La oposición a cambio en el voltaje alterno que pasa por un capacitor se denomina Reactancia capacitiva.

Por lo general la reactancia capacitiva de una bobina para inspección por corrientes de Foucault es prácticamente inapreciable. no obstante, la capacitancia puede ser importante al considerar la impedancia de los cables de la sonda

$$X_c = (1) / (2\pi f C) \quad (28)$$

donde, C es la capacitancia (en faradios)

IMPEDANCIA: (símbolo: z , unidades: ohmio, Ω)

la oposición total del flujo de corriente alterna se denomina IMPEDANCIA. En una bobina,

$$|Z|^2 = R^2 + X_L^2 \quad (29)$$

$$\theta = \text{tg}^{-1} (X_L / R) \quad (30)$$

por lo tanto $|Z|$ es la magnitud de z y θ es la fase de z .

4.6 DIAGRAMAS DE IMPEDANCIA SIMPLIFICADOS

CALCULO DE LA IMPEDANCIA DE LA SONDA EN UN CONJUNTO SONDA/MUESTRA

Ahora se considera la forma en que los cambios en la muestra que se inspecciona influyen sobre la impedancia de la bobina en la representación gráfica de impedancia.

La sonda y muestra que se inspecciona se pueden configurar como un transformador que tiene un primario de espiras múltiples (bobina) y un secundario de espira única (muestra) como se indica en la figura 4.6 (a). Este circuito puede simplificarse en un circuito equivalente donde la carga del circuito secundario se refleja como carga resistiva en paralelo con la reactancia inductiva de la bobina, figura 4.6 (b). Este circuito es un modelo aproximado de la bobina verdadera adyacente al conductor. Se supone que todo el flujo magnético de la bobina primaria está conectado a la muestra que se inspecciona; el acoplamiento es perfecto (100%). Así mismo se supone que no existe o no se produce atenuación por efecto del espesor pelicular o defasaje en la muestra.

El concepto circuito equivalente puede emplearse para la obtención de diagramas de impedancia simplificados aplicables a la inspección por corrientes de Foucault. Estos diagramas sirven como introducción a los diagramas más detallados que comprenden variaciones causadas por el efecto pelicular. El modelo del circuito bobina/muestra puede transformarse en un circuito serie más simple por medio de las manipulaciones matemáticas siguientes. La resistencia de carga R_s puede transferirse del bobinado secundario al primario multiplicándolo por el cuadrado de la relación de las espiras, $(N_p/N_s)^2$, figura 4.6.(b)

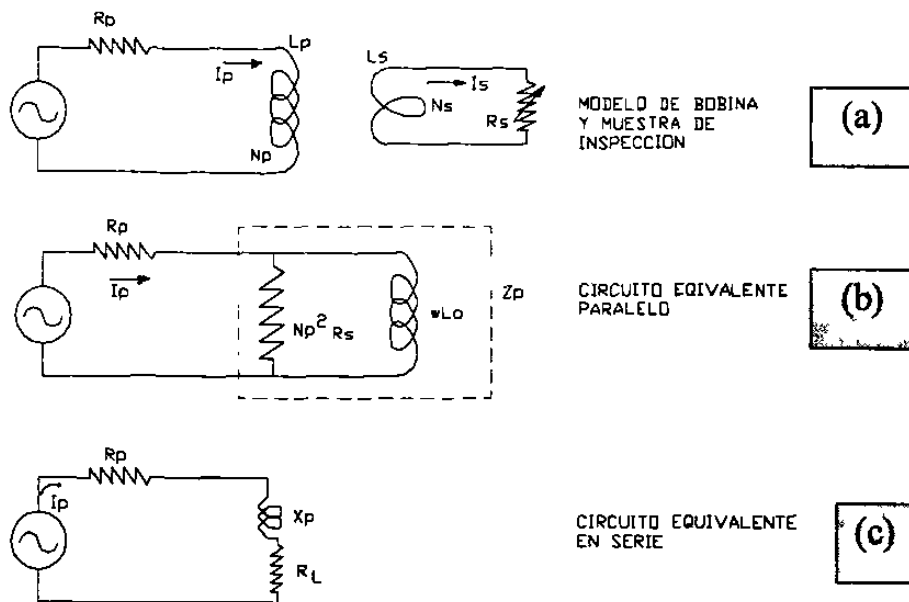


FIGURA 4.6 Circuitos equivalentes

La impedancia total de este circuito en paralelo puede evaluarse y transformarse en un circuito equivalente en serie de la forma siguiente:

$$z_p = \frac{(z_1 z_2)}{(z_1 + z_2)} \quad (31)$$

donde

$$z_1 = N_p^2 R_s \quad (32)$$

y

$$z_2 = jx_0, \quad (33)$$

donde $x_0 = \omega L_0$, reactancia inductiva de la bobina en el aire.

por lo tanto

$$z_p = \frac{(jN_p^2 R_s x_0)}{(N_p^2 R_s + jx_0)} \quad (34)$$

que se convierte en

$$z_p = (N_p^2 R_s x_o^2) / [(N_p^2 R_s)^2 + (x_o)^2] + j [(N_p^2 R_s)^2 x_o] / [(N_p^2 R_s)^2 + (x_o)^2] \quad (35)$$

Esto puede considerarse como combinación en serie en el circuito primario, de la resistencia R_L y de la reactancia inductiva x_p ó

$$z_p = (R_L + jx_p) \quad (36)$$

El circuito en serie de la figura 4.6 (c) es por lo tanto totalmente equivalente al paralelo de la figura 4.6 (b). R_p puede considerarse como la resistencia del cable y del hilo de la bobina mientras que $z_p = R_L + jx_p$ es el total de la impedancia de la combinación sonda muestra.

Cuando la sonda se halla alejada de la muestra (sonda en el aire) R_s es muy grande y sustituyendo $R_s = \infty$ en la ecuación 35 se obtiene

$$R_L = 0, x_p = x_o \text{ y } z_p = x_o$$

Los resultados anteriores pueden obtenerse retirando el componente $N_p^2 R_s$ de la figura 4.6 (b), ya que $R_s = \infty$ quiere decir que el circuito está abierto.

En la ecuación 10 se requiere una última transformación antes de poder obtener las gráficas de impedancia. la ecuación 35 puede simplificarse así

$$Z_o = x_o G \quad (37)$$

donde $G = (1) / (N_p^2 R_s)$ es la inductancia del circuito equivalente

La sustitución en 35 nos da

$$z_p = \left[\frac{(x_o Z_o)}{(1 + Z_o^2)} \right] + j \left[\frac{(x_o)}{(1 + Z_o^2)} \right] \quad (38)$$

Normalizando con respecto a x_o , la reactancia inductiva de la bobina cuando se halla alejada de la muestra (bobina al aire) resulta en

$$\left(\frac{z_p}{x_o} \right) = \frac{Z_o}{(1 + Z_o^2)} + j \left[\frac{1}{(1 + Z_o^2)} \right] \quad (39)$$

Haciendo variar Z_o , en la ecuación 39, de 0 a infinito se obtiene la curva de impedancia de la figura 4.7. En lugar geométrico de la impedancia es el de un semicírculo con su centro en $x_p/x_o = 1/2$ y $R_L/x_o = 0$; su radio es $1/2$. Con ayuda de la ecuación 39 en la figura 3.7 los cambios en impedancia pueden relacionarse a cambios en las características de la muestra.

Reactancia Normalizada

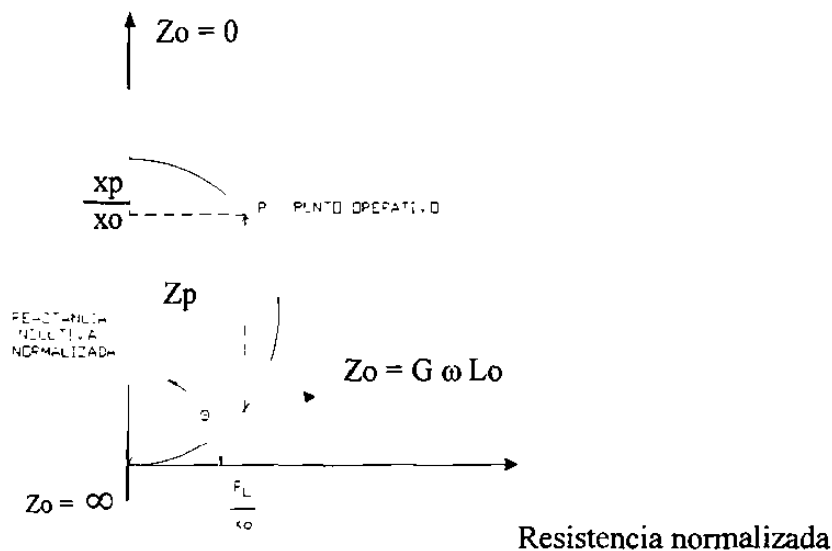


FIGURA 4.7 Representación gráfica de la impedancia

4.7 CORRELACIÓN ENTRE LA IMPEDANCIA DE LA BOBINA Y LAS PROPIEDADES DE LA MUESTRA

El estudio de la ecuación 36 revela lo siguiente:

1. Un aumento en R_s produce una disminución en Z_o .

$$2. R_s = (\rho l) / (A)$$

Un aumento en la resistividad eléctrica hará que el punto operativo de la curva de impedancia ASCIENDA. Lo contrario es aplicable en el caso de un aumento en conductividad eléctrica.

3. Un aumento en la pared del tubo (o espesor de la plancha) hará que el punto operativo de la curva de impedancia DESCienda.

$$Z_o = (\omega L_o) / (N_p^2 R_s) = \text{constante} * \omega$$

Un aumento en la frecuencia de la inspección hará que el punto operativo DESCienda en la curva de impedancia

$$4. L_o = \text{constante} * D_2$$

Un aumento en el diámetro de la sonda o del tubo hará que el punto operativo de la curva de impedancia DESCienda.

4.8 EJEMPLOS RESUELTOS

4.8.1 IMPEDANCIA DE LA SONDA EN EL AIRE

PROBLEMA: Se efectúa una inspección por corriente de Foucault con una frecuencia de inspección de 50 Khz. La resistencia de la bobina es de 15 ohmios mientras que su inductancia es de 60 microhenrios.

- ¿Cuál sería la reactancia inductiva de la bobina de inspección?
- ¿Cuál es la impedancia de la bobina?
- ¿Cuál es el ángulo, θ , entre el vector de impedancia total y el vector de resistencia?

SOLUCIÓN: a) $X_L = 2\pi fL = (2\pi) (50 \times 10^3) (60 \times 10^{-6})$

$X_L = 18.8$ ohmios

b) $|Z|^2 = R^2 + (2\pi fL)^2 = 15^2 + (18.8)^2$

$|Z| = 24.1$ ohmios

c) $\theta = \text{Arctg} (2\pi fL / R) = \text{Arctg} (18.8 / 15) = \text{Arctg} 1.253 = 51.4^\circ$

$\theta = 51.4$ grados

4.8.2 IMPEDANCIA DE LA SONDA ADYACENTE A LA MUESTRA

PROBLEMA: Se efectúa una inspección por corrientes de Foucault sobre una pieza de latón empleando una sonda de superficie a 50 KHz. La resistencia de la bobina en el aire es de 15 ohm y su inductancia es de 60 microhenrios. La impedancia de la sonda cuando esta sobre la muestra de latón se mide como $z_p = 24,5$ ohmios y $\theta = 35^\circ$.

Calcular:

a) x_p , reactancia inductiva

b) R_L carga resistiva

SOLUCIÓN:

a) $x_p = (z_p \text{ sen } \theta) = 24,5 \text{ sen } 35^\circ = 14,1$ ohmios

b) $R_L = (z_p \text{ cons } \theta) - R_{\text{AIRE}}$

$R_L = (24,5 \text{ cos } 35^\circ) - 15,0 = 5,1$ ohmios

4.8.3 Relación entre Voltaje y Corriente

PROBLEMA: Para el problema anterior de impedancia de la sonda calcular la caída de voltaje en la sonda si la corriente de inspección es de 100 miliamperios.

SOLUCIÓN: Impedancia de la sonda $|Z| = 24,5$ ohmios

La ley de Ohm manifiesta que $V = Y |Z|$

en consecuencia, $V = [0,10] (24,5) = 2,45$ voltios.

El voltaje en los bornes de la sonda es de 2,45 voltios.

CAPITULO 5

INSTRUMENTACIÓN

5.1 SISTEMAS DE EMISION-RECEPCION EN LAS CORRIENTES DE FOUCAULT

El método del circuito “emisión - recepción” de las corrientes de Foucault elimina la deriva de temperatura detectada por los instrumentos de uso general. El flujo de las corrientes de Foucault se controla observando el efecto de sus campos electromagnéticos sobre el voltaje inducido en una bobina o bobinas independientes, figura 5.1. La excitación de la bobina primaria se realiza con ayuda de una corriente sinusoidal de amplitud pico a pico constante para obtener una fuerza magnetomotriz constante,

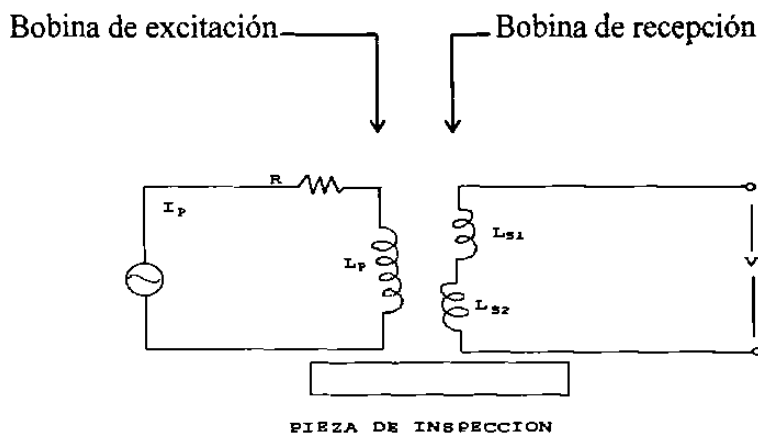


FIGURA 5.1 Circuito de emisión-recepción

$$\phi_p \propto N_p I_p \propto N_p I_0 \sin \omega t \quad (1)$$

La bobina secundaria o receptora va conectada a un amplificador de impedancia de entrada alta, de aquí que el voltaje inducido V_s no resulte afectado por la resistencia de la bobina receptora.

$$V_s \propto N_p \left(\frac{d\phi_p}{dt} \right) \propto N_p \omega \phi_o \cos \omega t \quad (2)$$

La resistencia del hilo tanto de la bobina receptora como de excitación puede variar por razones de temperatura sin que ello afecte las señales de salida. Hemos podido así eliminar la derivada de temperatura. Su independencia del factor temperatura hace que este método sea útil para la medición de resistividad, espesor de paredes y separación entre componentes.

5.2 DETECTOR DEL EFECTO HALL

La mayoría de los circuitos de “emisión - recepción” consisten en una bobina de excitación y una o varias bobinas receptoras.

No obstante, el flujo magnético inducido ϕ_s puede medirse por medio de un detector del Efecto Hall en lugar de controlar la tensión inducida V_s en una bobina receptora.

El voltaje inducido en una bobina receptora es proporcional al índice de cambio en tiempo del flujo magnético y, por lo tanto, se proporcional a la frecuencia de la inspección,

$$V_{\text{receptora}} \propto f \quad (3)$$

El detector del efecto de Hall reacciona más bien ante el valor instantáneo del flujo magnético, ϕ_o .

Esto quiere decir que el voltaje de salida es independiente de la frecuencia de la inspección, haciéndolo útil para inspecciones de baja frecuencia (particularmente si el detector necesita ser de tamaño reducido).

El detector del efecto de Hall funciona así: cuando se pasa corriente continua por un elemento de Hall, se produce un voltaje (potencial eléctrico) perpendicular al flujo de corriente. Este voltaje es proporcional al componente del flujo magnético perpendicular al elemento y al área superficial del elemento. Esta tensión o voltaje NO procede de un cambio en la resistencia del elemento. Los elementos de Hall, de tamaño tan reducido como es 1 mm^2 , pueden adquirirse en el mercado.

5.3 BOBINAS PARA EMISION-RECEPCION Y COMPENSACIÓN DE LIFT-OFF

Los instrumentos de “emisión - recepción” de uso general se asemejan a los de “impedancia”.

La diferencia principal radica en el método de equilibrio debido a lo diferente de la configuración de las bobinas. La mayoría de los circuitos de emisión - recepción consisten en un bobina de excitación y dos receptoras colocadas simétricamente dentro o fuera de la bobina de excitación. Ambas pueden ser: diferenciales, cuando las dos bobinas “palpan” (o sondean) el espécimen que se examina, o absolutas cuando una bobina solamente es la que sondea e espécimen que se examina, según se indica en la figura 5.1. Si bien la impedancia de la bobina no es importante en los instrumentos de emisión - recepción, el voltaje inducido es función del número de espiras y de la frecuencia de la inspección. Por lo tanto, su reactancia inductiva tiende a ser similar a las bobinas empleadas en instrumentos de impedancia.

Las bobinas sensoras se enrollan en oposición de forma que el campo de excitación no induzca ninguna tensión en las bobinas receptoras cuando ambas palpan el mismo material. En presencia de un defecto, el voltaje cambia a medida que cada bobina pasa sobre él. La bobina de excitación y las bobinas receptoras pueden colocarse en lados opuestos de la muestra. Este método se conoce como de transmisión.

En la mayoría de los instrumentos de emisión-recepción las señales de salida son los componentes en cuadratura del voltaje secundario. En algunos instrumentos para fines especiales, una señal de salida es proporcional a la magnitud mientras que la otra a la fase del voltaje secundario. Compensan el LIFT-OFF (acoplamiento mutuo entre bobina y muestra indicado como la separación entre estos), como sigue: Si la distancia entre la bobina y la muestra varía se produce un gran cambio en la amplitud del voltaje secundario pero poco cambio en fase.

El defasaje entre los voltajes sinusoidales secundario y primario se mide a un nivel de voltaje V_0 ligeramente mayor de cero. Bajo este voltaje, los voltajes sinusoidales tienen o experimentan el mismo defasaje para un LIFT-OFF de cero que para un LIFT-OFF máximo. El discriminador de voltaje en estos instrumentos de medición del defasaje de las corrientes de Foucault se activa en el punto V_0 de voltaje y la señal de salida de un LIFT-OFF comprendidas entre cero y 0.1 mm se minimiza. La medición de la resistividad del espesor de paredes o de los defectos profundos puede efectuarse sin ruido del LIFT-OFF Según se muestra en la figura 5.2.

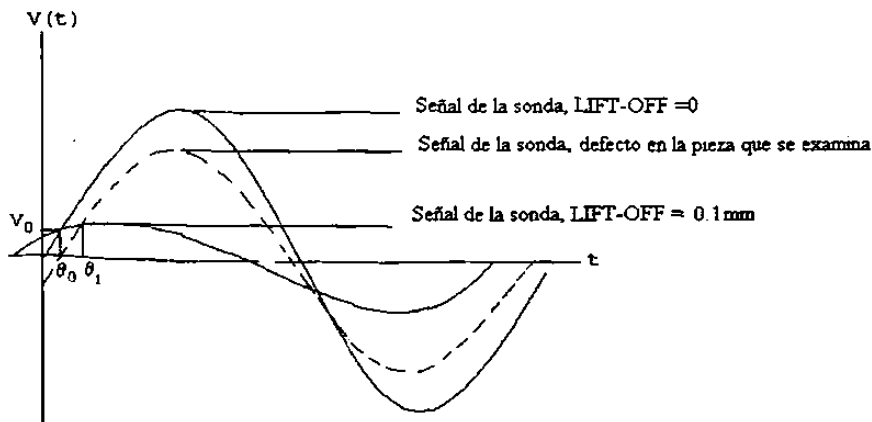


FIGURA 5.2 Forma de la onda del voltaje secundario

5.4 EQUIPO DE FRECUENCIAS MÚLTIPLES

Uno por lo general está interesado en un parámetro único tal como defectos. Parámetros insignificantes tales como cambios en propiedades eléctricas y magnéticas, la presencia de abolladuras o las placas de soporte en la inspección de tubos y el LIFT-OFF en inspección empleando sondas superficiales pueden ocultar las señales de posibles defectos. El método de frecuencia múltiple de las corrientes de Foucault se concibió para eliminar el efecto de parámetros indeseables.

La respuesta a diversas anomalías varía con la frecuencia de la inspección. Esto permite diferenciar las variaciones no importantes. En los instrumentos de frecuencia múltiple se usan dos o más frecuencias. La corriente de la bobina consiste en dos o más frecuencias superpuestas, es decir, las bobinas se excitan simultáneamente por más de una frecuencia de inspección. Un aparato de frecuencia múltiple que emplee tres frecuencias actúa en la misma forma que tres instrumentos de inspección por corrientes de Foucault que empleen una frecuencia única. Los filtros de paso de banda de frecuencias separan las señales de cada frecuencia. El proceso de discriminación o eliminación se realiza combinando las señales de salida de las frecuencias individuales de forma similar a la solución simultánea de las ecuaciones múltiples. La eliminación de señales parásitas se consigue comparando la señal bajo dos frecuencias de inspección y efectuando la sustracción. El proceso se continúa para otras señales parásitas empleando otras frecuencias de inspección hasta que la salida final consista en solamente la señal del defecto.

5.5 INSPECCIÓN CON SONDA DE SUPERFICIE

Las sondas de las corrientes de Foucault tienen dos funciones importantes: inducen las corrientes de Foucault y detectan la deformación de su circulación provocada por los defectos. Los defectos pueden ser superficiales o internos.

Los tipos diversos de sonda de superficie son: sonda plana, sonda o bobina de muelle, sonda rotativa y la lápiz-sonda.

5.6 CARACTERISTICAS DIRECCIONALES

Cuando se intentan detectar defectos tales como fisuras es esencial que las corrientes de Foucault formen un gran ángulo (preferiblemente perpendicular) con la fisura para obtener una reacción máxima. Si las corrientes de Foucault son paralelas al defecto, no se producirá disyunción en las corrientes o si se produce será muy ligera; de aquí que la impedancia de las bobinas no cambie.

Cuando se busquen fallas o defectos paralelos en la superficie, tales como laminaciones, la sonda de tipo herradura produce una sensibilidad razonable.

5.7 INDUCTANCIA DE LA SONDA

El factor que regula el acoplamiento y el voltaje inducido en el material de inducción es el flujo magnético que rodea a la bobina.

El flujo magnético total (ϕ_p) es proporcional a la inductancia de la sonda (L) y a la corriente (I) es decir, $\phi_p \sim LI$.

La autoinductancia de una bobina larga (solenoides) puede calcularse con la ayuda de la ecuación

$$L_o = 4\pi \times 10^{-10} \mu_r N^2 A / l \quad (4)$$

donde L_o es la autoinductancia en henrios

μ_r es la permeabilidad relativa del núcleo (normalmente =1)

A es el área de la superficie plana de la bobina en mm^2

l es la longitud de la bobina en mm

Esta fórmula da una buena aproximación para las bobinas cuya relación longitud/diámetro es superior a 10.

Para calcular la inductancia de las bobinas cortas:

$$L_o = [4\pi\mu_r N^2 (\ln (8r/k)-2) 10^{-10}] \quad (5)$$

donde r es el radio medio de la bobina = $(D_o + D_i) / (4)$, mm

y $K = 0,112 (2l + D_o + D_i)$, mm

5.8 SENSIBILIDAD EN FUNCIÓN DEL LIFT-OFF Y DE LA PROFUNDIDAD DE LOS DEFECTOS

La sensibilidad a los defectos disminuye a medida que una bobina se aleja o está alejada de la superficie. Esto resulta de una disminución de la densidad del flujo magnético en función de la distancia, producida por el valor finito del diámetro de la sonda. La Figura 5.3 (a) muestra la magnitud de esta disminución en el caso de cuatro sondas de diámetro diferentes.

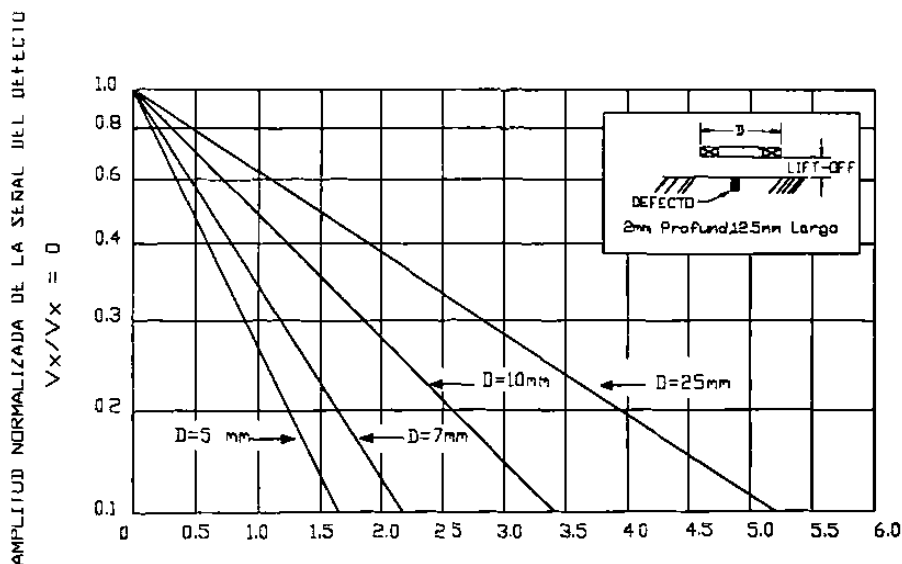


Figura 5.3 (a) Distancia del LIFT-OFF (mm)

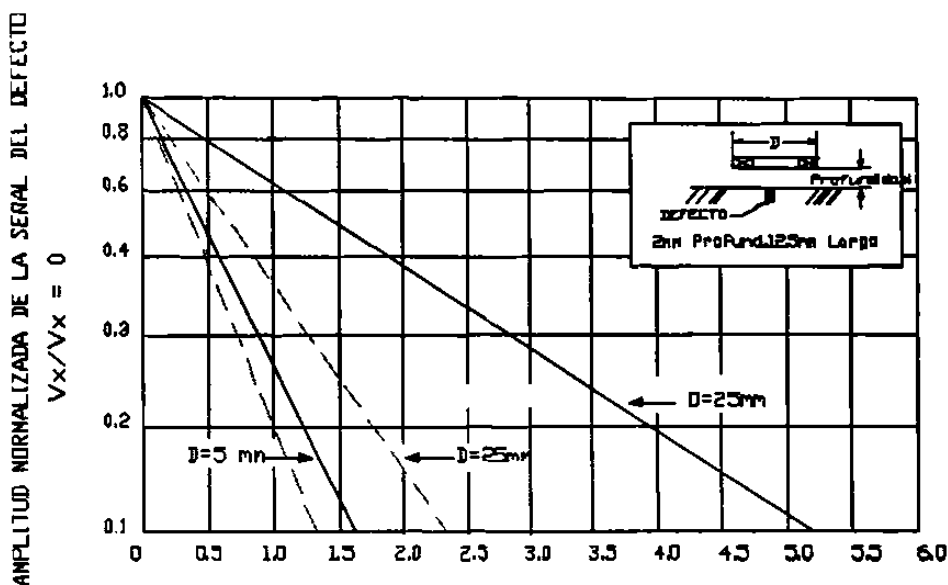


Figura 5.3 (b) Profundidad de un defecto interno (mm)

Obsérvese, por ejemplo, que la sensibilidad de la sonda más pequeña (5mm de diámetro) se hace cuatro veces más débil cuando está alejada a 1 mm aproximadamente de la superficie.

Esta pérdida de sensibilidad en función de la distancia se aplica igualmente a los defectos en un cuerpo sólido; además, se producirá una reducción suplementaria resultante de la atenuación debida al efecto pelicular.

La figura 5.3 (b) muestra la disminución de la amplitud de la señal en función de la profundidad de un defecto subsuperficial, con y sin atenuación debida al efecto pelicular (líneas punteadas y sólidas respectivamente). En el caso de espesores de película mayores (frecuencia de inspección baja) la disminución de la sensibilidad a los defectos invisibles en función de la profundidad es semejante a la disminución de sensibilidad en función de la distancia para los defectos superficiales (véase la figura 5.3 (a)). Esto quiere decir que la

densidad del flujo magnético disminuye en función de la distancia desde la bobina en el aire como en un sólido (sin atenuación debida al efecto pelicular).

A una frecuencia de inspección típica donde un espesor de película es igual a la profundidad del defecto ($\delta = 2$ mm para las líneas punteadas de la figura 5.3 (b)), se atribuye una reducción suplementaria, de aproximadamente tres veces la amplitud de la señal a $x = 2$ mm, a la atenuación debida al efecto pelicular. Esto resulta de que a una profundidad igual al espesor de la película la densidad de las corrientes de Foucault es 37% de las corrientes de Foucault en la superficie.

La disminución de la sensibilidad a los defectos en función de la profundidad, en una muestra de espesor finito, sin atenuación debida al efecto pelicular, es aproximadamente igual que en una muestra de espesor infinito. No obstante, con la atenuación debida al efecto pelicular la sensibilidad a los defectos disminuye menos rápidamente que en las líneas punteadas de la figura 5.3 (b); la curva resultante caería en un punto situado entre las líneas punteadas y sólidas.

En general, la disminución en la sensibilidad a los defectos en función de la profundidad queda determinada por el tamaño de la sonda más que por la atenuación debida al efecto peculiar. Debido a que la mayoría de los defectos no son mucho más largos que el espesor de la muestra, es imposible utilizar sondas que tengan bobinas cuyo diámetro sea muy superior al espesor de la muestra. La inspección por corrientes de Foucault por medio de sonda de superficie se limita por lo tanto a espesores menores de 5 mm.

5.9 EFECTO DE LA LONGITUD DEL DEFECTO

La parte sensible de la sonda es la región situada bajo la bobina, más una región suplementaria debida a la expansión del campo magnético. El diámetro efectivo, D_{eff} de una sonda es aproximadamente igual al diámetro de la bobina, D_c , más cuatro espesores de película(4δ)

$$D_{eff} = (D_c + 4\delta) \quad (6)$$

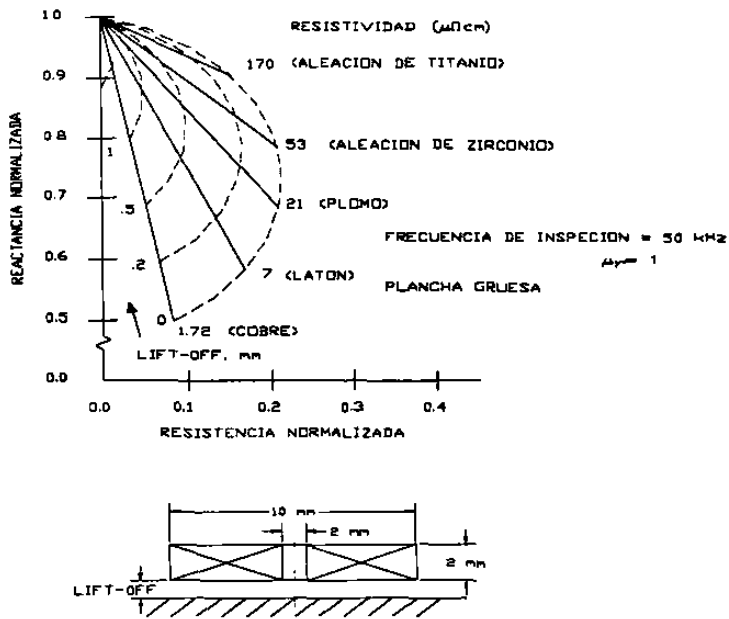


FIGURA 5.4 Gráfica de impedancia-efecto de resistividad

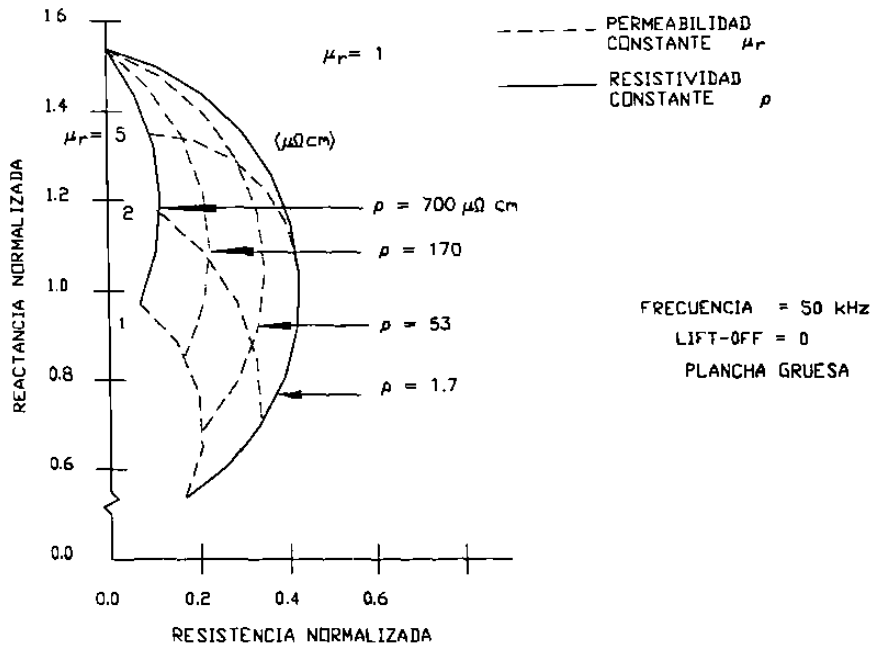


FIGURA 5.5 Gráfica de impedancia-efecto de la permeabilidad

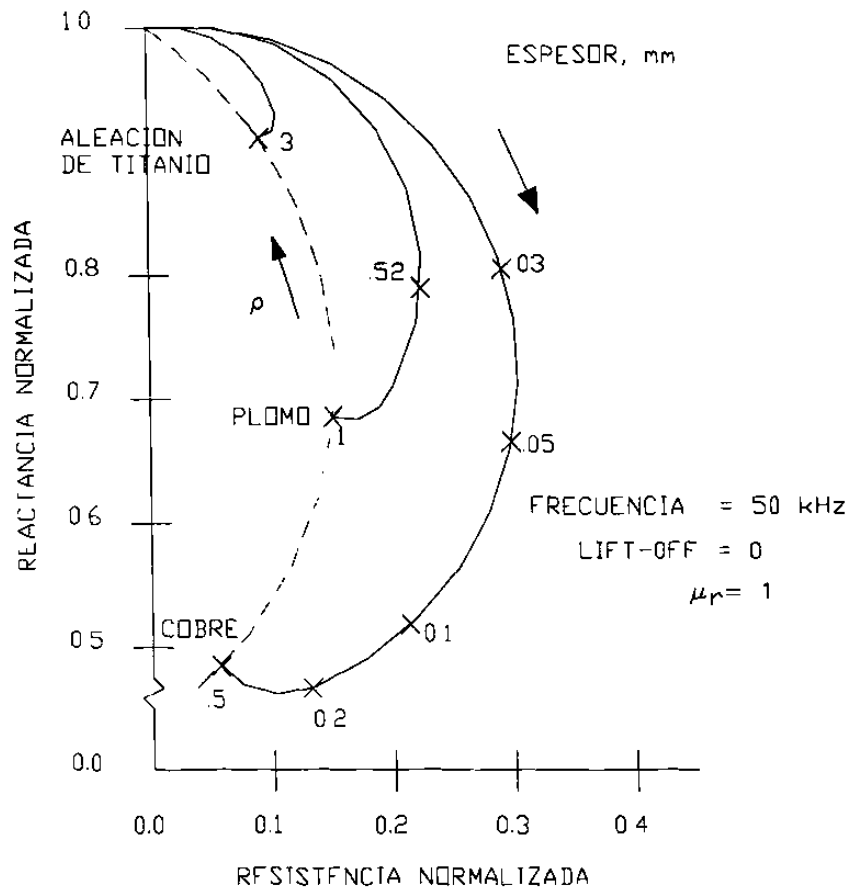


FIGURA 5.6 Gráfica de impedancia-efecto de espesor

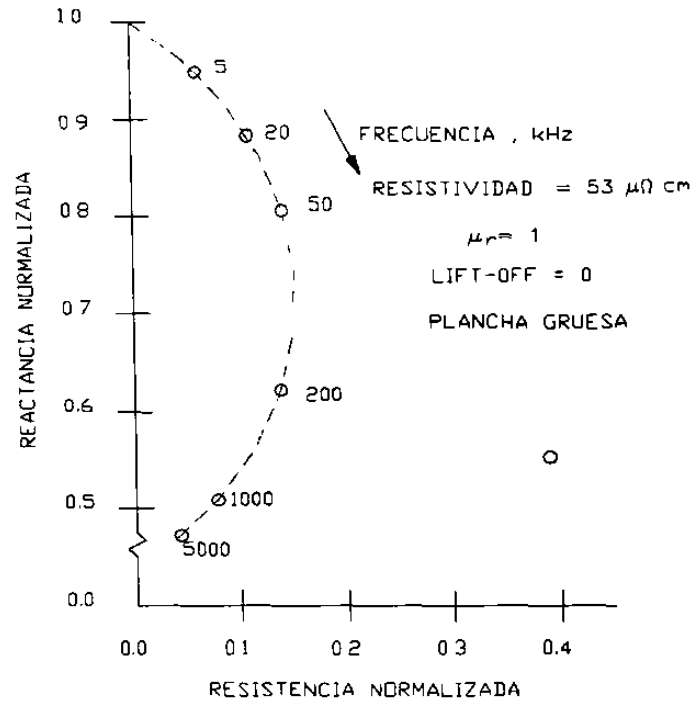


FIGURA 5.7 Gráfica de impedancia- efecto de la frecuencia

5.10 EFECTO DE LA RESISTIVIDAD

La figura 5.4 muestra los efectos de la resistividad eléctrica de diversos materiales conductores. El punto de impedancia hace subir la curva a medida que aumenta la resistividad. Los puntos de impedancia en el caso de cambios discretos de la distancia entre la bobina y la pieza que se inspecciona, que van de cero al infinito, también se incluyen. Obsérvese que un pequeño aumento de la distancia (lift-off) provoca una modificación o cambio importante en la impedancia. Esto es debido a una atenuación del acoplamiento del flujo magnético a la muestra. Se producirá un efecto relativamente mayor en la impedancia de una bobina pequeña que en la de una más grande con el mismo cambio de separación.

5.11 EFECTO DE LA PERMEABILIDAD

Obsérvese en la figura 5.5 que existe un gran aumento en la impedancia resultante de un pequeño cambio en permeabilidad. pequeños cambios en permeabilidad pueden ocultar otras variables de la inspección.

5.12 EFECTO DEL ESPESOR

La figura 5.6 representa el trayecto del punto de impedancia a medida que el espesor de la muestra disminuye del infinito a cero.

A medida que el material de inspección se hace mas fino, lo que conlleva un aumento en la resistencia a las corrientes de Foucault, el punto de impedancia hace subir la curva. Esto es igualmente lo que se produce en el gráfico de la resistividad. Esto significa que toda condición que provoca un aumento en la resistencia a la circulación de las corrientes de Foucault, (fisura, reducción de espesor, elementos de aleación, temperatura, etc.) hace esencialmente subir el punto de impedancia a lo largo de la curva hacia la impedancia de la sonda al aire, $X_L/X_0 = 1$

La curva de impedancia de la figura 5.4, desde el codo hacia abajo, traza un remolino invertido cuando la sonda se desplaza por encima de un conductor de espesor creciente. Esto es debido al efecto pelicular y al defasaje, que predominan sobre todos los movimientos básicos del punto de impedancia.

5.13 EFECTO DE FRECUENCIA

La figura 5.7 muestra el efecto de la frecuencia de inspección (parámetro instrumental). A medida que aumenta la frecuencia, las corrientes de Foucault muestran una capa progresivamente más delgada cerca de la superficie. Cuando la frecuencia disminuye, las corrientes de Foucault penetran mas profundamente en el material y el punto de impedancia ascienda en la curva.

Cerca del extremo superior de la curva, la impedancia se compone principalmente de resistencia, que depende en gran medida de la temperatura tanto en la pieza que se inspecciona como en la resistencia del hilo de la bobina (si bien este último no aparece en esta curva normalizada). Es por lo tanto aconsejable, siempre que sea posible, operar cerca del codo de la curva, es decir entre 20kHz y 200 kHz en este ejemplo.

5.14 EFECTO DEL DIÁMETRO DE LA Sonda

La figura 5.8 muestra el efecto del diámetro de la bobina (uno de los parámetros de la sonda). obsérvese que el aumento del diámetro de la bobina hace descender el punto de impedancia a lo largo de la curva, similar al del aumento de la frecuencia. Cuando las condiciones de inspección exigen el empleo de una frecuencia baja, el punto operativo frecuentemente puede llevarse hacia la parte inferior de la curva, en la región preferida del codo, aumentando el diámetro de la bobina siempre y cuando las condiciones de inspección permitan el empleo de una sonda de gran tamaño).

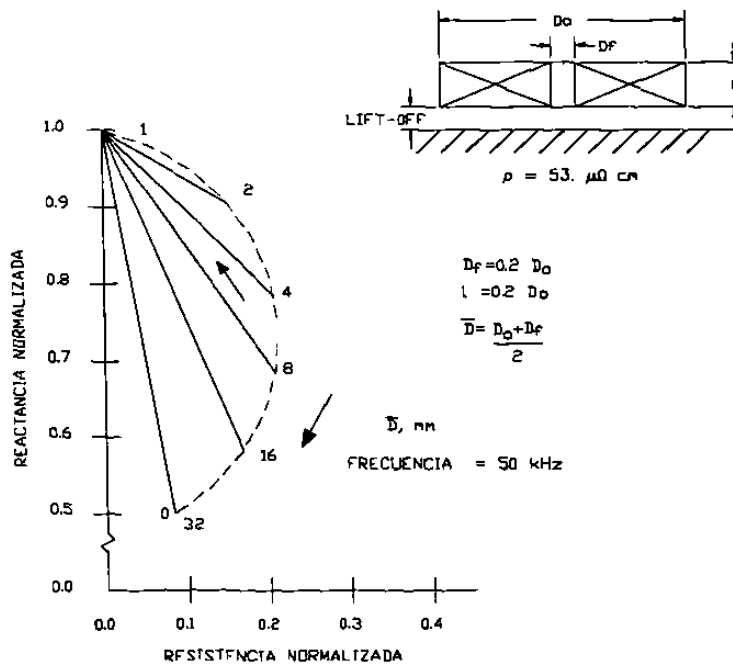


FIGURA 5.8 Gráfica de impedancia-efecto de diámetro de la bobina de superficie

5.15 RESONANCIA DEL CONJUNTO SONDA-CABLE

La resonancia del conjunto sonda - cable puede tomarse en consideración si se opera con frecuencias elevadas de inspección o si se utilizan cables largos, es decir, a frecuencias superiores a 100 KHz y con cables de una longitud superior a 30m.

Para evitar la resonancia puede adoptar ciertas medidas, a saber:

1. Emplear una frecuencia de inspección inferior a la frecuencia de resonancia, tal que f sea inferior a $0,8f_r$.

2. Seleccionar una sonda con una inductancia menos elevada (dado que f_r es proporcional a $1/\sqrt{L}$, la inductancia debe reducirse a un cuarto para doblar la frecuencia de resonancia).

3. Reducir la longitud del cable o utilizar un cable que tenga una capacidad por unidad de superficie más débil (tal como la de los cables coaxiales múltiples). Esto aumenta la frecuencia de resonancia dado que la capacidad es proporcional a la longitud del cable y que f_r es proporcional a $1/\sqrt{C}$.

4. Utilizar una frecuencia de inspección superior a la frecuencia de resonancia, de forma que f sea superior a $1,2 f_r$. No obstante, mas allá del punto de resonancia, la sensibilidad de todos los instrumentos de corrientes de Foucault disminuye rápidamente al aumentar la frecuencia puesto que la reactancia capacitiva ($X_c = 1/\omega C$) disminuye, y por que se produce un cortocircuito en la corriente en el cable, en lugar de pasar por la bobina.

CAPITULO 6

INSPECCIÓN DE TUBOS Y PIEZAS CILÍNDRICAS

6.1 TIPOS DE SONDAS

La figura 6.1 muestra cuatro tipos corrientes de sondas para la inspección de objetos redondos: (b) y (d) son sondas diferenciales, y (a) y (c) son sondas absolutas. Cada tipo contiene dos bobinas distintas para responder a las exigencias de un circuito puente en corriente alterna que constituye el modo operativo ordinario de la mayor parte de los instrumentos de corrientes de Foucault. Estos puentes exigen que bobinas idénticas montadas sobre dos brazos separados del puente estén en equilibrio, permitiendo así la amplificación de pequeñas diferencias de impedancia entre las dos bobinas. Si las dos bobinas se colocan una al lado de la otra, de forma que se barra con la misma intensidad el material que se inspecciona, la sonda es “diferencial”. Si una bobina barre la pieza que se inspecciona mientras que la otra no sirve más que de referencia, se trata de una sonda absoluta.

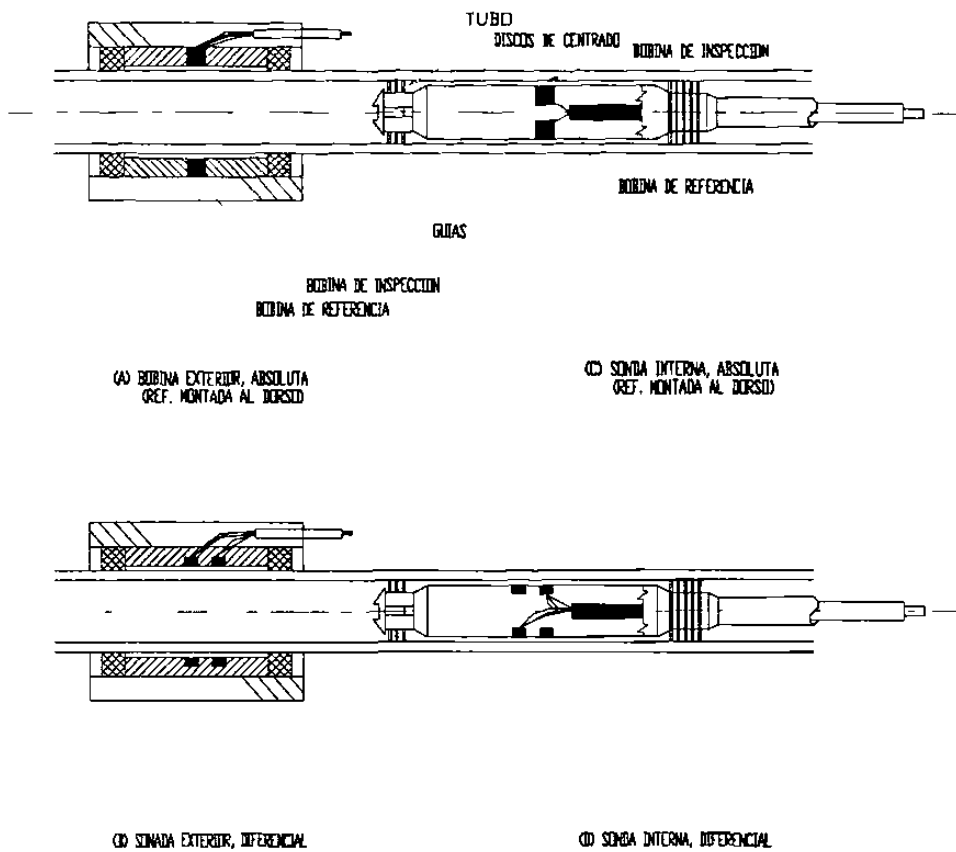


FIGURA 6.1 Tipo de sondas para el control de tubos

Las figuras 6.1 (a) y (c) presentan configuraciones eficaces para sondas absolutas; la bobina de referencia, está separada de la pieza que se inspecciona y, por consiguiente, no está más que ligeramente acoplada a la pieza de inspección.

6.2 TAMAÑOS DE LAS BOBINAS

Como principio general para la inspección de tubos, la longitud y la profundidad de la bobina deberían ser aproximadamente iguales al espesor de la pared (ver figura 6.2). No obstante, para mejorar el acoplamiento, se puede utilizar una sección rectangular cuyo espesor se reduzca a la mitad de la longitud. Para obtener una mejor sensibilidad a los pequeños defectos situados cerca de la superficie, la longitud y el espesor de la bobina pueden reducirse aún más. Lamentablemente, ello conlleva una disminución de la sensibilidad a los defectos externos situados sobre la superficie opuesta a la bobina.

La separación de las bobinas en las sondas diferenciales también debería ser aproximadamente igual a la profundidad de los defectos o al espesor de la pared, en el caso de una inspección general.

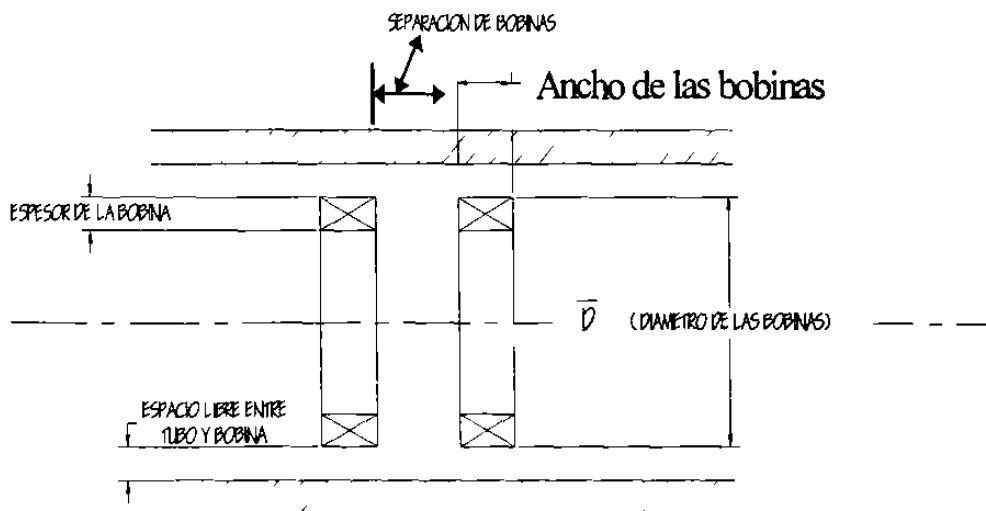


FIGURA 6.2 Nomenclatura de las bobinas de sonda

Para obtener una mejor sensibilidad a los defectos situados cerca de la superficie, el espacio puede reducirse a costa de una disminución en la sensibilidad a los defectos situados lejos de la bobina.

El espacio libre o separación entre la sonda y el tubo, deberá ser lo más pequeño posible. En la mayoría de las inspecciones internas de tubos, una separación igual a la mitad del espesor de la pared es normal. Una separación mayor (menos factor de llenado o acoplamiento) conlleva una ligera disminución de la resolución del defecto situado cerca de la superficie y una reducción importante en la amplitud de las señales para todo tipo de defectos.

6.3 COMPARACIÓN ENTRE SONIDAS DIFERENCIALES Y ABSOLUTAS.

Las sondas absolutas con una bobina de referencia fija son esenciales a la comprensión fundamental del fenómeno. permiten el estudio de todas las propiedades físicas de un artículo en inspección, trazando los lugares geométricos característicos de la impedancia.

Cuando se representa la señal de una bobina absoluta en función de la distancia. La señal es función del área de la sección transversal recorrida por las corrientes de Foucault, es decir, espesor de pared en el caso de tubos, y puede analizarse como la representación gráfica de una superficie rugosa con ventaja adicional de que pueden detectar los defectos internos.

Las sondas diferenciales tienen dos bobinas activas, generalmente enrolladas en sentido contrario. Cuando ambas bobinas se encuentran sobre un zona de la muestra que no tiene defectos, no se produce señal diferencial entre las dos bobinas dado que ambas inspeccionan el mismo material. No obstante, cuando primero pasa una bobina y después la otra por encima de un defecto, se produce una señal diferencial. Tienen la ventaja de ser insensibles a propiedades de lenta variación, tales como variaciones graduales en dimensión y temperatura: las señales procedentes de las partes adyacentes de una pieza en inspección se anulan constantemente. Las señales producidas por los movimientos parásitos de la sonda se reducen con este tipo de sonda. Sin embargo, existen inconvenientes: las señales pudieran ser difíciles de interpretar hasta el punto de inducir a error. Las señales de defectos situados bajo placas de soporte pueden revestir gran complicación. La señal producida por un defecto se representa dos veces: la primera, cuando la primera bobina se aproxima al

defecto y una segunda vez cuando lo hace la segunda bobina. las dos señales son su reflejo recíproco y es preciso observar la dirección de la señal procedente de la primera bobina. Si un defecto es más largo que la separación entre las dos bobinas, como consecuencia de la anulación de la señal cuando ambas bobinas detectan el defecto con igual sensibilidad, sólo se detectan los bordes anterior y posterior.

Se produce una situación aún más seria con sondas diferenciales, cuando los extremos de un defecto varían gradualmente; el efecto pudiera no ser observable.

COMPARACIÓN DE LAS VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS DOS TIPOS DE SONIDAS.

VENTAJAS

INCONVENIENTES

SONIDAS ABSOLUTAS

-responde a cambios repentinos y progresivos en las propiedades y dimensiones.

-las señales combinadas son por lo general fáciles de separar (interpretación simple).

-muestra la longitud total de los defectos.

- tendencia a la deriva debida a inestabilidad térmica

-mayor sensibilidad a los movimientos parásitos de la sonda que con una sonda diferencial

SONDAS DIFERENCIALES

-insensibilidad a cambios progresivos en propiedades o dimensiones

- inmune ala deriva debida a cambios en temperatura

- menor sensibilidad a los movimientos parásitos de la sonda que la sonda absoluta

-insensibilidad a cambios progresivos (puede omitir completamente los defectos largos y progresivos)

pueden detectar únicamente las extremidades de las señales largas

- puede producir señales difíciles de interpretar

6.4 CARACTERÍSTICAS DIRECCIONALES

Durante una inspección para detectar defectos, es esencial que la circulación de las corrientes de Foucault sea tan perpendicular como sea posible a los defectos para obtener una reacción máxima. Si las corrientes de Foucault circulan paralelamente a un defecto, se producirá una distorsión mínima de las corrientes de Foucault y por consiguiente un cambio leve en la impedancia de la sonda.

Además de las consideraciones relativas a la dirección de las corrientes de Foucault, son también importantes los puntos siguientes:

El flujo magnético no queda limitado por la pared del tubo; induce corrientes de Foucault en materiales conductores adyacentes, por ejemplo, en las placas de soporte de tubo para los intercambiadores de calor.

- Las bobinas de corriente de Foucault son sensibles a los materiales ferromagnéticos introducidos en el campo magnético de una bobina. El material ferromagnético no necesita ser conductor eléctrico ni formar una trayectoria cerrada para las corrientes de Foucault.

- Las bobinas de las corrientes de Foucault son sensibles a todas las variaciones en el material que afectan su conductividad o permeabilidad.

6.5 INDUCTANCIA DE LAS SONDAS

El aspecto importante de la inductancia es el que la impedancia de una sonda, que está en función de la inductancia, debe ser compatible con el aparato de corrientes de Foucault y los cables portadores de las señales,

$$Z_{\text{sonda}} = (R^2 + X_L^2)$$

donde $X_L = 2\pi fL$ cuando f es en hertzios y L en henrios, y R es la resistencia del hilo de la bobina en ohmios.

Resonancia de Conjunto Sonda - cable

La resonancia del conjunto sonda - cable debe tenerse en cuenta cuando se utilizan frecuencias de inspección elevadas o cables largos, es decir, frecuencias superiores a 100 kHz o cables mayores de 30 m.

La resonancia se produce cuando la reactancia inductiva de la bobina es igual a la reactancia capacitiva del cable, es decir cuando

$$\omega L = (1 / \omega C)$$

donde ω es la frecuencia angular en radianes/ segundo

L es la inductancia de la bobina, en henrios

C es la capacitancia total del cable, faradios.

Transponiendo esta ecuación y sustituyendo $\omega = 2\pi f$ se comprueba que se produce resonancia cuando la frecuencia es

$$f_r = (1 / 2 \pi \sqrt{LC})$$

Para evitar la resonancia pueden tomarse medidas:

1. Operar a una frecuencia de inspección inferior a la frecuencia de resonancia, elegida de forma tal que inspección sea menor de $0,8f_r$

2. Elegir una sonda con una inductancia menos elevada (puesto que f_r es proporcional a $1/\sqrt{L}$, la inductancia debe disminuirse en un factor de cuatro para doblar la frecuencia de resonancia).

3. Reducir la longitud del cable o utilizar un cable que tenga una capacitancia más débil por unidad de longitud (tal como un cable coaxial múltiple). Estas medidas aumentan la frecuencia de resonancia puesto que la capacidad es proporcional a la longitud del cable y puesto que también f_r es proporcional a $1/\sqrt{C}$.

4. Operar a una frecuencia de inspección superior a la frecuencia de resonancia, eligiendo inspección de tal forma que sea mayor que $1,2 f_r$.

No obstante, más allá del punto de resonancia, la sensibilidad de todos los instrumentos de corrientes de Foucault disminuye rápidamente cuando la frecuencia aumenta en razón a que la reactancia capacitiva ($X_c = 1/\omega C$) disminuye, dado que la corriente produce un cortocircuito en el cable en lugar de pasar por la bobina.

6.6 TUBOS

El diagrama de impedancia de un tubo de paredes extremadamente delgadas inspeccionado por medio de una bobina circunferencial interna o externa es un semicírculo. Esta forma geométrica no se obtiene más que cuando el espesor de la pared, t , es muy inferior al espesor de la película ($t \ll \delta$), es decir, cuando el efecto pelicular y el defasaje son insignificantes. Esta situación es rara en la práctica sobre todo bajo frecuencias de inspección medias y elevadas, aunque el concepto es útil dado que define uno de los límites de impedancia de la bobina.

En el caso de una bobina exterior, el otro límite queda definido por la curva de impedancia de un cilindro sólido (espesor de pared máxima). El diagrama de impedancia de un tubo cualquiera inspeccionado por medio de una bobina exterior debe situarse entre las dos curvas punteadas de la figura 6.3; por ejemplo la línea continua se aplica a un tubo de

un diámetro interior igual al 80% del diámetro exterior, es decir, $D_i/D_o = 0.8$. Los tubos de un D_i/D_o mayores de 0,8 se situarían a la derecha de la línea sólida. Las líneas punteadas de la figura 6.3 trazan el desplazamiento del punto operativo a medida que disminuye el espesor de la pared (D_o constante, D_i creciente). obsérvese la forma espiral del lugar geométrico del espesor de la pared. El extremo de la curva que denota una pared gruesa se aparta del lugar geométrico semicircular.

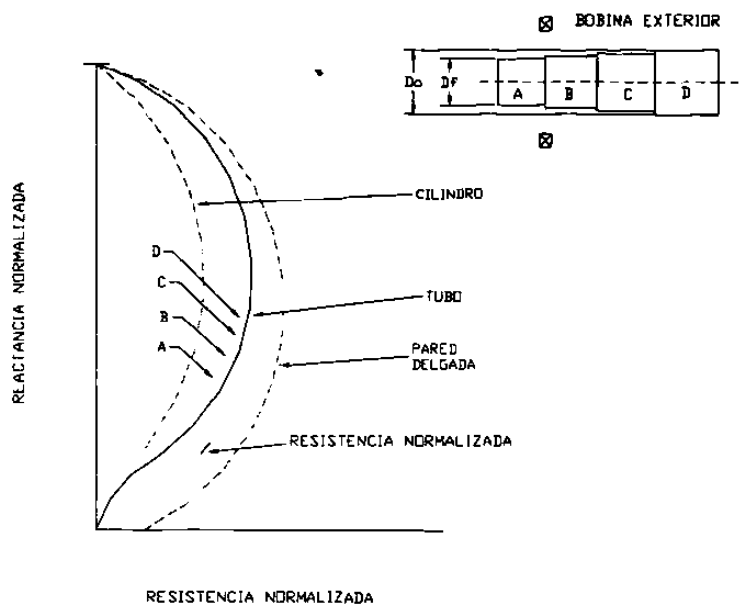


FIGURA 6.3 Diagrama de impedancia de un tubo con bobina externa mostrando el efecto del adelgazamiento progresivo de la pared del tubo.

Esto se atribuye al defasaje a través de la pared del tubo y constituye la base del análisis de las corrientes de Foucault.

La figura 6.3 revela la dependencia de los términos “pared gruesa” y “pared delgada” con respecto a la frecuencia de la inspección. cerca de la parte superior del diagrama (frecuencias bajas) un tubo de 0,8 D_i/D_o se puede considerar como un tubo de pared delgada, y no existe defasaje debido a su pared, $t \ll \delta$. cerca de la parte baja del diagrama (frecuencias elevadas), el mismo tubo se convierte en un tubo de pared gruesa en razón a

que el espesor se hace más grande que el espesor de la película y, a los efectos de las corrientes de Foucault, el tubo se nos presenta como un cilindro sólido.

Cuando un tubo se inspecciona por medio de una bobina circunferencial interna, el diagrama de impedancia de un tubo de pared delgada continúa semicircular, pero el que corresponde a un tubo de pared gruesa es marcadamente diferente del diagrama de un cilindro sólido. El lugar geométrico de la impedancia de un tubo determinado se sitúa una vez entre las curvas formadas por las líneas punteadas en las frecuencias intermedias y se aproximará a la curva relativa a las paredes delgadas en las frecuencias bajas y la curva relativa a paredes gruesas en las frecuencias elevadas, como se indica en el caso de los tubos con $D_i/D_o = 0,8$ y $0,9$. Un cambio en el espesor de la pared produce un cambio correspondiente en la impedancia de la bobina a lo largo de las líneas punteadas que forman una curva en espiral. una vez más, esta divergencia en relación al semicírculo se atribuye al defasaje provocado por la pared del tubo.

6.7 FRECUENCIA CARACTERÍSTICA PARA LOS TUBOS.

Por definición, f_g (frecuencia característica) es la frecuencia bajo la cual la solución de la función de Bessel para ecuaciones de Maxwell relativas al campo magnético de un objeto finito que se inspecciona, es igual a la unidad. (Las soluciones de Bessel se asemejan, aunque son más complejas que las funciones trigonométricas de seno y coseno). En el caso de un cilindro sólido o de un tubo de pared inspeccionado con ayuda de una bobina exterior,

$$f_g = (5,07\rho) / (\mu_r D_o^2) \quad \text{KHz}$$

Con ρ en microohmios - centímetros y D_o en mm

Para un tubo de pared gruesa inspeccionado por medio de bobina interna,

$$f_g = (5,07 \rho_r) / (\mu_r D_i^2) \quad \text{kHz}$$

Las frecuencias para los cilindros y tubos de pared gruesa inspeccionados con bobinas exteriores nos es dada por

$$(f / f_g) = (f D_o^2 / 5,07\rho)$$

donde f es la frecuencia de inspección en kilohertzios.

para un tubo de pared gruesa inspeccionado por medio de una bobina interna,

$$(f / f_g) = (f D_i^2 / 5,07\rho)$$

Para tubos de pared delgada inspeccionados con bobinas internas ó externas,

$$(f / f_g) = (f D_i^2 t / 5,07\rho)$$

6.8 SELECCIÓN DE LA FRECUENCIA DE INSPECCIÓN

La selección de la frecuencia de inspección apropiada depende del tipo del control que se efectúe. Las inspecciones que tienden a determinar variaciones de diámetro exigen por lo general una reacción máxima al factor de llenado, que se produce a frecuencias elevadas. Las inspecciones para detectar defectos exigen penetración hasta la localización de los defectos que pudieran existir; los defectos superficiales pueden detectarse bajo frecuencias más elevadas que los defectos subsuperficiales.

Una penetración máxima exige una frecuencia baja que permita no obstante establecer una distinción neta entre las señales procedentes de variaciones sin importancia en las propiedades del material y los defectos importantes.

6.9 FRECUENCIA EN LA INSPECCIÓN DE TUBOS

Cuando se inspeccionan tubos para detectar defectos, los criterios que se deben respetar son (a) la discriminación de fase entre las señales de los defectos y las otras indicaciones o señales y (b) una buena separación de fase entre las señales de los defectos internos y externos. Una frecuencia de inspección que ha demostrado su utilidad con diversos tipos y tamaños de tubos, es la frecuencia f_{90} que produce una separación de fase de 90° entre las variaciones del factor de llenado (y las señales de defectos internos) y las señales de los defectos externos. la frecuencia f_{90} se obtiene empíricamente partiendo de la relación entre el espesor del material y el espesor pelicular, ligeramente mayor de uno,

$$t/\delta = 1,1$$

que se convierte en

$$f_{90} = (3 \rho / t^2) \quad \text{kilohertzios}$$

donde ρ es la resistividad en microohmios - centímetros y t , es el espesor de la pared del tubo en mm. Con f_{90} , se obtiene una buena sensibilidad a los defectos internos y externos y una sensibilidad débil a los depósitos de magnetita y a las placas de soporte ferromagnéticas.

6.10 SONDAS PARA LA DETECCIÓN DE FISURAS CIRCUNFERENCIALES

Una sonda circunferencial (cilíndrica) interior típica induce corrientes de Foucault que son paralelas al bobinado de las bobinas y, por consiguiente, su dirección es circunferencial. Para detectar un defecto, la impedancia de la bobina debe cambiarse; pero no se produce sino cuando la trayectoria de las corrientes de Foucault se modifica. los defectos circunferenciales que son paralelos a esta corriente, y que no ofrecen ninguna región perpendicular a esta trayectoria, no serán por consiguiente detectados.

Para detectar defectos circunferenciales, la bobina debe inducir corrientes que formen un ángulo en relación con las fisuras. En este caso se utilizan dos tipos de sondas, a saber (a) las sondas de superficie y (b) las sondas de zig-zag.

El inconveniente principal en este tipo de sonda reside en la cobertura parcial de la circunferencia.

6.11 CASOS TEÓRICOS

Calcular la frecuencia de inspección necesaria para operar en el codo del diagrama de impedancia en el caso de un cilindro de 5 mm de diámetro y una resistividad eléctrica $\rho = 10$ microohmios - centímetros.

Solución:

$$f / f_g = (f D_o^2 / 5.07\rho) = 6$$

$$\text{por consiguiente } f = (6 \times 5.07 \times 10 / 5^2)$$

$$= 12 \text{ kHz}$$

Caso 2. Calcular la frecuencia de inspección para efectuar la de tubos de Inconel con $D_i = 10,2$ mm, $t = 1,1$ mm y $\rho = 98$ microohmios - centímetros.

Solución: Los mejores resultados se obtienen cuando existe una separación de fase suficiente entre las señales de los defectos internos y externos. Una separación de fase de 90° permite una buena discriminación entre las dos y una estimación razonable de la profundidad de los defectos. Para obtener una separación de fase de 90° , la frecuencia de inspección queda determinada por

$$f_{90} = (3\rho / t^2)$$

$$(\text{derivada de } t/\delta) = 1,1)$$

$$= 3 \times 98 = 245 \text{ kHz}$$

$$(1,1)^2$$

Por consiguiente, 245 KHZ es la frecuencia requerida.

Caso3. Determinar la posición aproximada del punto operativo en el diagrama de impedancia en el caso 1.

Solución: Puesto que $t/\delta = 1.1$ este tubo no puede considerarse que tiene una pared gruesa o delgada. por consiguiente no es estrictamente aplicable ninguna de las ecuaciones. No obstante, si $t/\delta > 1$, la ecuación para tubos de pared gruesa nos daría una solución aproximada.

$$\begin{aligned} f/f_g &= f D_i^2 / 5,07 \rho \\ &= 245 \times (10,2)^2 / 5,07 \times 98 \\ &= 51,3 \end{aligned}$$

CAPITULO 7

CASO PRACTICO

GENERACIÓN Y MEDICIÓN DE CORRIENTES DE FOUCAULT

Lo primero que se realizó fue el tratar de obtener acceso al equipo necesario para realizar las pruebas que comprobaran la hipótesis que me había planteado al inicio de la presente tesis, lo cual fue posible al llegar a obtener la autorización de la empresa Carrier de México, la cual me facilitó la utilización del siguiente equipo que fue el que se utilizó:

Equipo: MIZ-17

Sonda: AC3 DIFERENCIAL

Material: TUBO DE CUPRONIQUEL XD46-9

El MIZ-17 es un mecanismo de inducción. (Básicamente un oscilador). Genera una corriente variable en el tiempo a diferentes frecuencias que se hacen circular por una bobina (Sonda: AC3) quien a su vez produce ondas electromagnéticas las cuales al chocar con el tubo generan en este las corrientes de Foucault.

Este equipo me permite lograr la medición que deseo dada la correlación entre la impedancia de la bobina (sonda) y las propiedades de la muestra (tubo). Sabemos que al tener la bobina en el aire el punto operativo de la figura 4.7 es representado por la ecuación 14 del capítulo 4. La cual deja de manifiesto que los cambios en la impedancia pueden relacionarse a cambios en las características de la muestra.

De aquí que si tenemos la sonda al aire y aumentamos la frecuencia de inspección se traduzca en un incremento entre el punto operativo (p) y la referencia.

Con este equipo me dispuse a realizar las pruebas las cuales desarrollaré aquí paso a paso:

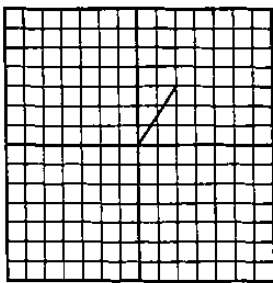
1. Se realizan las conexiones necesarias del equipo y se verifica que estas estén correctas.

2. Se procedió a conseguir un tubo patrón para calibrar el equipo, para la generación y medición de las mismas corrientes. El tubo patrón es un tubo igual al espécimen que se va a analizar.

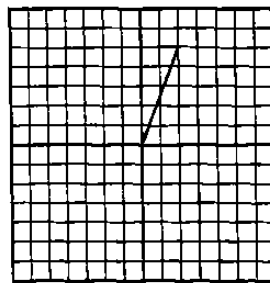
3. Se procede a calibrar el equipo de acuerdo a dicho patrón.

4. A continuación se realizaron algunas lecturas para comprobar que el punto operativo de la figura mencionada anteriormente se mueve de acuerdo a la teoría utilizada en este trabajo.

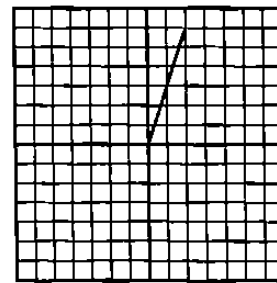
Al realizar esto obtuve las siguientes lecturas:



$f = 11.4 \text{ KHz}$



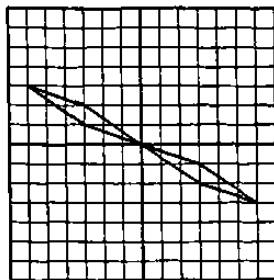
$f = 15.3 \text{ KHz}$



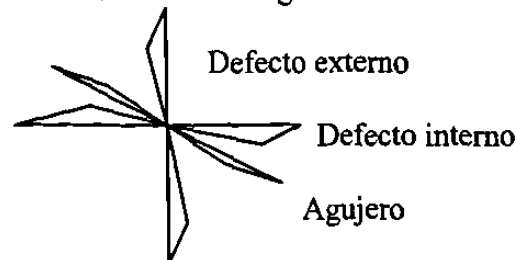
$f = 15.4 \text{ KHz}$

5. Utilizando un tubo diferente para poder analizar el estado en el que se encontraba.

6. Se coloca la sonda dentro de dicho tubo obteniendo la siguiente lectura:



$f = 15 \text{ KHz}$



7. Obteniendo una respuesta la cual me permitió observar el defecto que tenía dicho tubo analizado.

Esto lo realicé en base a un patrón de respuesta que se tiene y que me permite identificar el tipo de defecto que se encuentra presente en el material analizado.

Obtuve como resultado que el defecto que tenía el tubo se trataba de una perforación, lo cual fue verificado y se comprobó mediante una inspección visual, hayando dicha perforación, lo cual me permite llegar a decir que un análisis de este tipo sí es confiable para realizar las pruebas descritas en este trabajo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos en esta tesis he llegado a la conclusión de que la teoría Electromagnética nos permite hacer un análisis más completo y más adecuado al inspeccionar por corrientes de Foucault.

Aunque no me profundice en dicho análisis creo que este trabajo le será de ayuda a quienes les interese el tema y que le pueda ayudar a que en una forma un poco mas simple, al menos en los principios básicos de este estudio, el llegar a realizar alguna investigación más profunda en el tema.

En este trabajo me pude dar cuenta de que al tratar de medir una fisura en un espécimen con cierta orientación no es detectada debido a la orientación que tienen las ondas producidas por la bobina y por el comportamiento de las corrientes de Foucault, por lo cual me permito recomendarles que traten de verificar que las ondas producidas realmente realicen un barrido completo y en todas las direcciones para evitar esta posible falla en el análisis que se realiza.

Otra recomendación que quizás muchos ya sepan pero que no esta de mas el mencionarla es que recuerden que existe una sonda especial para cada material que se va a analizar, ya que si no toman en cuenta esto el análisis puede ser erróneo.

BIBLIOGRAFÍA

William H. Hayt, JR. Teoría electromagnética, Segundo edición en español, Editorial Mc Graw-Hill 1991

Arthur F. Kip Fundamentos de electricidad y magnetismo, Primera edición en español, Editorial Mc Graw-Hill 1978.

Robert Plonsey, Robert E. Collin. Principles and Application of Electromagnetic Fielda, Primera edición, Editorial Mc Graw-Hill 1961.

Roald K. Wangsness. Campos Electromagnéticos, Séptima edición, Editorial Noriega Limusa 1992.

Oficinas de Normas Generales de Canadá, Manual avanzado para el método de inspección por corrientes de Foucault.

Donald J. Hagemaiier. ASNT, Fundamentals of Current Testing.

[http:// www.hocking.com/tekintro/ECTEK6.HTM](http://www.hocking.com/tekintro/ECTEK6.HTM)

GLOSARIO

CIRCUITO DE EMISION-RECEPCION : Método en el cual el flujo de las corrientes de Foucault se controlan observando el efecto de sus campos electromagnéticos con nexos sobre el voltaje inducido en una bobina o bobinas independientes.

CONDUCTIVIDAD: Densidad de corriente por intensidad de campo eléctricos y se mide en Siemens por metro

CORRIENTES DE FOUCAULT: Fenómeno de inducción electromagnética que se presenta en materiales conductores que son expuestos a un flujo magnético variable en el tiempo

EFEECTO PELICULAR: Concentración de la corriente alterna en las inmediaciones de la superficie del conductor

FRECUENCIA CARACTERISTICA: Frecuencia bajo la cual la solución de la función de Bessel para ecuaciones de Maxwell relativas al campo magnético de un objeto finito que se inspecciona, es igual a la unidad

IMPEDANCIA: Oposición al flujo de corriente alterna

INDUCTANCIA: Propiedad de un circuito eléctrico por la que una corriente variable induce una fuerza electromotriz en el circuito mismo o en un circuito vecino.

LIF-OFF : Acoplamiento mutuo entre bobina y muestra

OSCILADOR: Fuente de corriente alterna

PERMEABILIDAD: Factor que depende de la corriente, radio y número de vueltas en una bobina

PERMITIVIDAD: Factor que depende de la intensidad del campo magnético, la frecuencia (si el campo varia con el tiempo), la historia anterior del material

REACTANCIA CAPACITIVA: Oposición al cambio de voltaje alterno.

REACTANCIA INDUCTIVA: Oposición a cambios en la corriente alterna

RESISTENCIA Oposición al flujo de corriente eléctrica.

LISTADO DE GRÁFICAS

	PAGINA
1. Interpretación física del teorema de la divergencia	4
2. Variación de un valor escalar	5
3. Sistema de Coordenadas Cilíndricas	7
4. Superficies en Coordenadas cilíndricas	8
5. Sistema de Coordenadas Esféricas	10
6. Superficies en Coordenadas Esféricas	11
7. Representación de la distancia entre dos cargas	14
8. Patrón de campo de la carga inducida en una esfera conductora colocada en un campo eléctrico uniforme	21
9. Patrón de campo de una esfera conductora en un campo eléctrico uniforme	21
10. Representación de la intensidad del campo magnético y eléctrico en materiales expuestos a un flujo magnético variable en el tiempo	33
11. Equipo de Inspección por corrientes de Foucault	35
12. Sistemas de Inspección por corrientes de Foucault	36
13. Distribución de las corrientes de Foucault y del flujo magnético en un conductor en función de la profundidad	37
14. Cuadro físico donde se presenta la teoría elemental del efecto pelicular	38
15. Distribución de las Corrientes de Foucault y del Flujo magnético en función de la profundidad en una placa gruesa	41
16. Circuitos equivalentes	46
17. Representación gráfica de la impedancia	48
18. Circuito de Emisión-Recepción	52
19. Forma de la onda del voltaje secundario	55
20. Distancia del Liff-off	58

21. Profundidad de un defecto interno	59
22. Gráfica de impedancia-efecto de resistividad	61
23. Gráfica de impedancia-efecto de la permeabilidad	61
24. Gráfica de impedancia-efecto de espesor	62
25. Gráfica de impedancia-efecto de la frecuencia	63
26. Gráfica de impedancia-efecto de diámetro de la bobina de superficie	65
27. Tipo de sondas para el control de tubos	68
28. Nomenclatura de las bobinas de sonda	69
29. Diagrama de impedancia de un tubo con bobina externa mostrando el efecto del adelgazamiento progresivo de la pared del tubo	75

LISTADO DE TABLAS

	PAGINA
1. Producto punto de vectores unitarios del sistemas de coordenadas cilíndricas y del sistema cartesiano	9
2. Producto punto de vectores unitarios en sistemas de coordenadas esféricas y cartesianas	12

AUTOBIOGRAFÍA

**EDUARDO ALONSO CASTILLO MONTEMAYOR
CANDIDATO PARA EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA ELECTRICA
CON ESPECIALIDAD EN POTENCIA**

TESIS:

TEORIA ELECTROMAGNETICA

CAMPO DE ESTUDIO: POTENCIA

DATOS PERSONALES:

Nací 8 de Febrero de 1963, siendo hijo del Sr. Enrique Castillo Gutiérrez y de la Sra. Rebeca Montemayor Cerda.

EDUCACIÓN PROFESIONAL:

Licenciatura la realicé en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de U.A.N.L. obteniendo el Título de Ingeniero en Control y Computación en 1986.

Inicié la Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con especialidad en Potencia.

EXPERIENCIA PROFESIONAL:

Instructor en Capacitación de Máquinas paqueteras, calderas y electrónica.

Administrador a nivel nacional del departamento de servicios de Carrier de México.

Catedrático de la F.I.M.E.-U.A.N.L. desde 1986 hasta la Fecha.

