



Universidad de Valladolid

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN

**DEPARTAMENTO DE TEORÍA DE LA SEÑAL Y COMUNICACIONES E
INGENIERÍA TELEMÁTICA**

TESIS DOCTORAL:

**CONTRIBUCIONES EN EL ÁREA DE SONDAS Y ALGORITMOS
APLICADAS A LA DETECCIÓN DE DISCONTINUIDADES,
METROLOGÍA DE DISTANCIA Y CLASIFICACIÓN DE
MATERIALES CON TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS BASADAS
EN CORRIENTES INDUCIDAS**

Presentada por Javier García Martín para optar al grado de
doctor por la Universidad de Valladolid

Dirigida por:
Jaime Gómez Gil

Resumen

Se presenta esta tesis doctoral, en formato de compendio de tres publicaciones, sobre sondas y algoritmos de procesamiento de datos de *técnicas de ensayos no destructivos (Non-Destructive Testing, NDT) basadas en corrientes inducidas*. El **Artículo 1** presenta los resultados del estudio del estado del arte de estas técnicas.

El **Artículo 1** ha sido el punto de partida para la formulación de la **hipótesis general**: (i) las sondas de corrientes inducidas inductivas puras para las aplicaciones de detección de discontinuidades y medida de espesor no conductor tienen mejor rendimiento que las sondas con sensores de efecto *Hall*, y (ii) la fusión de técnicas de corrientes inducidas multifrecuencia y redes neuronales para la clasificación de materiales puede tener, con iguales o mejores tasas de acierto, menor carga computacional y menor tiempo de procesamiento de clasificación, que la fusión de técnicas monofrecuencia y redes neuronales. Derivado de la hipótesis general, el **objetivo general** de esta tesis, es proponer (i) sondas de corrientes inducidas para la detección de discontinuidades, y la metrología de espesor de recubrimiento no conductor, y (ii) redes neuronales para tratar los datos base mono y multifrecuencia que entregan los equipos de instrumentación de corrientes inducidas para la clasificación de materiales.

Para la consecución del objetivo general se han realizado los **ensayos 1 y 2** cuyos resultados han sido incluidos en los **Artículos 2 y 3 del compendio**. En el **ensayo 1** dedicado a sondas, los **objetivos específicos** han sido proponer, entre una *sonda con generación y captación inductivas* y una *sonda con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*: (i) la sonda con mayor ancho de banda de funcionamiento y mayor relación señal/ruido para los trabajos de detección de discontinuidades, (ii) la sonda más adecuada para los trabajos de resolución del problema inverso de caracterización de discontinuidades de distintos diámetros, y (iii) la sonda más adecuada para los trabajos de resolución del problema inverso de medición de espesor no conductor sobre aluminio. En el **ensayo 2**, dedicado a redes neuronales para clasificar automáticamente piezas de acero por su tratamiento térmico, se han podido utilizar sondas en la cadena de señal como las propuestas a partir del **ensayo 1**. En el **ensayo 2**, los **objetivos específicos** han sido

proponer, entre redes con complejidad interna variable que procesan impedancias en modos mono y multifrecuencia, la red óptima en cuanto: (iv) a la tasa de acierto, (v) a la carga computacional, y (vi) al tiempo de clasificación promedio de redes entrenadas.

Para realizar el **ensayo 1**, se han diseñado dos sondas *de tipo palpador*: la *Sonda 1 con generación y captación inductivas*, y la *Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*. A continuación, se han comparado entre sí, sobre probetas planas de aluminio de 1.6 mm de espesor, mediante tres tipos de ensayos: barrido de frecuencias, detección de discontinuidades artificiales de distintos diámetros e interpolación para la resolución del problema inverso, y metrología de espesor de recubrimiento no conductor sobre aluminio e interpolación para la resolución del problema inverso. A continuación, para realizar el **ensayo 2**, se ha diseñado la *Sonda 3 de tipo palpador, con generación y captación inductiva* similar a la *Sonda 1*. Con esta sonda se han tomado 40 medidas de impedancia sobre un grupo de levas de acero UNE F-1310 sometidas a uno de dos tratamientos térmicos posibles: correcto con enfriamiento rápido y dureza >55HRC, e incorrecto con enfriamiento lento y dureza <45HRC. Se ha realizado un pre-procesado de los datos adquiridos, para adecuarlos al procesamiento *monofrecuencia y multifrecuencia* mediante *redes neuronales perceptrón multicapa*, las cuales, una vez entrenadas, han clasificado las levas en uno de los dos tratamientos con el 25% de las muestras.

Los resultados obtenidos relativos a sondas han sido: (i) en la detección de discontinuidades en aluminio, la relación señal/ruido promedio de la *Sonda 1* en el rango 10-1000 kHz ha sido un 14.95 dB superior a la de la *Sonda 2*, con máximos de sensibilidad de ambas sondas en el entorno de 100 kHz; (ii) en la detección de agujeros en aluminio de diámetros 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5 mm, la relación señal/ruido promedio de la *Sonda 1* ha sido un 10.66 dB superior a la de la *Sonda 2*. En la resolución del problema inverso, los errores promedio en la predicción del diámetro, del interpolador lineal de la *Sonda 1* ha sido 0.07mm; respecto a 0.13mm del interpolador exponencial, y 0.18mm del interpolador lineal de la *Sonda 2*; (iii) en la resolución del problema inverso, en la predicción de medidas de espesor no conductor sobre aluminio, el error absoluto promedio de la *Sonda 1* ha sido 0.09mm, respecto a 0.12mm de la *Sonda 2*. **Los resultados**, con la *Sonda 3 inductiva pura*, **relativos a redes neuronales** que resuelven el problema inverso y clasifican piezas por su tratamiento térmico han sido: (iv) la *red multifrecuencia* con 2 neuronas en la capa oculta ha logrado una tasa de acierto un 10.4 % superior que *las redes monofrecuencia con variación del número de capas ocultas de 2 a 10*; (v) la misma red multifrecuencia ha necesitado un número de sumas y productos un 33.3 % inferior y un número de cálculos de la función de activación de las neuronas *tanh* un 50.0 % inferior, que *las redes monofrecuencia ensayadas*; y (vi) la misma red multifrecuencia ha requerido un tiempo de ejecución un 22.1 % inferior que *las redes monofrecuencia ensayadas*.

Los resultados confirman la hipótesis general, y **sugieren utilizar las sondas con generación y captación inductivas** para detectar discontinuidades, y resolver los problemas inversos de caracterización de discontinuidades y de metrología espesor no conductor sobre aluminio. **Los resultados** también **sugieren**, con una *sonda con generación y captación inductiva* en la cadena de señal, utilizar **una red neuronal MLP para clasificación de levas de acero por su tratamiento térmico con procesado multifrecuencia, 4 neuronas en la capa de entrada y 2 neuronas en la capa oculta.**

Palabras clave: Técnicas de ensayos no destructivas, corrientes inducidas, técnica monofrecuencia, técnica multifrecuencia, *sonda con generación y captación inductiva*, *sonda con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*, red neuronal perceptrón multicapa, discontinuidad, espesor, tratamiento térmico.

Abstract

This thesis is presented in compendium format of three publications about probes and data processing algorithms of nondestructive testing techniques (Non-Destructive Testing, NDT) based on induced currents. **Article 1** presents the results of the state-of-the-art review of these techniques.

Derived from the **Article 1**, the formulation of the **general hypothesis** is: (i) pure inductive eddy current probes for discontinuities detection applications and nonconducting thick measurement provide better results than the probes with Hall effect sensors, and (ii) fusion techniques of multifrequency eddy currents and neural networks for materials classification have, with equal or better success rates, lower computational load and shorter processing classification time, than fusion techniques with single frequency and neural networks. Derived from the general hypothesis, the **general objective** of this thesis is to propose (i) eddy current probes for detecting discontinuities currents and thickness metrology of non-conductive coating, and (ii) neural networks to process eddy currents monofrequency and multifrequency data provided by the instrumentation for materials classification.

To achieve this objective, **tests 1 and 2** have been conducted, whose results have been included in **Articles 2 and 3 of the Compendium**. **Specific objectives of focused-on-probes test 1** are to propose, between *an inductive generation and pickup probe or an inductive generation and Hall effect sensor pickup probe*: (i) the probe with higher operation bandwidth and higher signal/noise ratio for the work of discontinuities detection, (ii) the most suitable probe for the work of resolution of the inverse problem of discontinuities characterization with different diameters, and (iii) the most suitable probe for the work of resolution inverse problem of non-conductive thickness measurement on aluminum. Probes in the signal chain as proposals from **test 1** have been used in **test 2**, focused on neural networks to automatically classify steel samples by heat treatment. **Specific objectives of test 2** are to propose the optimal neural network, between neural networks with variable internal complexity that process impedances in mono and multifrequency modes, in terms of: (iv) the success rate, (v) the computational load, and (vi) the execution time.

Two probes were designed to develop the **test 1**. Probe 1: inductive generation and inductive pickup and Probe 2: inductive generation and Hall effect sensor pickup. Both probes were compared with each other on flat 1.6 mm thick aluminum probes, using three types of tests: frequency sweep, detection of artificial discontinuities of different diameters and interpolation for solving the inverse problem, and thick non-conductive coating metrology on aluminum and interpolation for solving the inverse problem. Then, Probe 3 was designed with inductive generation and pickup similar to Probe 1, for the **test 2**. Impedance measurements were taken with this probe over a group of 40 UNE F-1310 steel cams under one of two heat treatments: right with rapid cooling and >55HRC, and wrong with slow cooling and <45HRC. A pre-processing of the acquired data was carried out to fit the processing by mono and multifrequency MultiLayer Perceptron (MLP) neural networks. Then, once the networks were trained, they sorted the 25% of the cams measurements in one of two heat treatments.

The results concerning probes were: (i) in aluminum discontinuities detection, the average signal/noise of Probe 1 in the range 10-1000 kHz was 14.95 dB higher than the signal/noise of the Probe 2, with sensitivity maximum of both probes in the vicinity of 100 kHz; (ii) in aluminum hole detection of diameters 1.0, 1.5, 2.0 and 2.5 mm, the average signal/noise of Probe 1 was 10.66 dB higher than the signal/noise of the Probe 2. The average error in the inverse problem diameter prediction, was 0.07mm with the linear interpolator of Probe 1; 0.13mm with the exponential interpolator of Probe 2, and 0.18mm with the linear interpolator of Probe 2; (iii) The average absolute error of Probe 1 was 0.09mm, with respect of 0.12mm of Probe 2 in the inverse problem resolution of predicting non-conductive thickness measurements on aluminum. **The results** with full-inductive Probe 3 in the signal chain, **concerning neural networks** that solve the inverse problem of samples sorting by heat treatment were: (iv) *the multifrequency neural network* with 2 neurons in the hidden layer achieved a success rate 10.4% higher than the single frequency networks with varying the number of hidden layers 2 to 10; (v) *the same multifrequency neural network* required -33.3% number of sums and products and -50.0% number of *tanh* neuron activation function calculations with respect to *the tested monofrequency neural networks*; and (vi) *the same multifrequency network* required -22.1% runtime with respect to *the tested monofrequency neural networks*.

De forma general, **los resultados** confirman la hipótesis general, y **sugieren utilizar las sondas con generación y captación inductivas** para detectar discontinuidades, y resolver los problemas inversos de caracterización de discontinuidades y de metrología espesor no conductor sobre aluminio. **Los resultados** también **sugieren**, con una *sonda con generación y captación inductiva* en la cadena de señal, utilizar **una red neuronal MLP para clasificación de levas de acero por su tratamiento térmico con procesado multifrecuencia, 4 neuronas en la capa de entrada y 2 neuronas en la capa oculta**. Con esta propuesta de sondas y de redes neuronales, se ha alcanzado el **objetivo general de la tesis**.

The results confirm the general hypothesis and **suggest the use of *inductive generation and pickup probe***, to detect discontinuities, and to solve the inverse problems of discontinuities characterization and thickness nonconductive metrology on aluminum. **The results also suggest** with full-inductive probe in the signal chain, **the use of the MLP neural network** for steel cams classification by heat treatment, **with multifrequency processing, with 4 neurons in the input layer and 2 neurons in the hidden layer.**

Keywords: Non-destructive testing techniques, eddy current, multifrequency technique, monofrequency technique, inductive generation and inductive pickup probe, inductive generation and Hall effect sensor pickup probe, multilayer perceptron artificial neural network MLP-ANN, discontinuity, thickness, heat treatment.

Agradecimientos

Agradezco a todos los que han hecho posible la redacción de la presente memoria.

El desarrollo y culminación de esta tesis ha sido una labor de perseverancia y aprendizaje, que ha tenido sus frutos gracias al apoyo de mi director de tesis el Dr. Jaime Gómez Gil. Valoro infinitamente su confianza en mí en los momentos que necesité ánimo, su respaldo permanente y su empatía. Para él mi agradecimiento con admiración y respeto.

Y mis infinitos agradecimientos son y serán siempre para mi mujer María, para el resto de mi familia y para mis amigos, por su confianza y apoyo incondicional. Siempre han estado ahí cuando más lo he necesitado. En mi memoria siempre están las personas que más orgullosas se sentirían de verme defendiendo esta tesis.

Agradezco al grupo de doctorandos que han trabajado bajo la tutela de Jaime Gómez, el gran esfuerzo y las contribuciones realizadas. Gracias Ernesto Vázquez, por el apoyo en la parte de estado del arte de la tecnología y gracias Víctor Martínez por tu experiencia y colaboración en el trabajo realizado con redes neuronales.

Merece también una mención especial, reconocer el mérito de los emprendedores Carlos Rodríguez y José Bernárdez, fundadores de la empresa Ingeniería y Ensayos no Destructivos-ISEND. La Empresa me ha permitido tomar contacto con el mundo de los ensayos no destructivos y fomentar el interés por el tema. Les agradezco la confianza que han depositado en mí, poder formar parte del Equipo, y su apoyo material para la realización de ensayos que han permitido la redacción de artículos científicos que forman parte de este **compendio de publicaciones**. Agradezco también a mis compañeros de trabajo de la gran familia ISEND, que han contribuido a transmitirme sus conocimientos y su buen saber hacer.

Valladolid, 12 de marzo 2016

Índice abreviado

| | |
|---|-----|
| <u>PRIMERA PARTE: INTRODUCCIÓN AL COMPENDIO</u> | 25 |
| Capítulo 1: Introducción | 27 |
| 1.1 Introducción al compendio..... | 29 |
| 1.2 Introducción a los ensayos NDT | 33 |
| 1.3 Estudio de estado del arte..... | 43 |
| 1.4 Formulación de hipótesis y objetivos..... | 51 |
| 1.5 Materiales..... | 57 |
| 1.6 Metodología | 65 |
| 1.7 Resultados y discusión | 75 |
| 1.8 Conclusiones | 89 |
| 1.9 Líneas futuras..... | 91 |
| 1.10 Contribuciones originales..... | 97 |
| <u>SEGUNDA PARTE: ARTÍCULOS DEL COMPENDIO</u> | 103 |
| Capítulo 2: Artículo 1 del compendio..... | 105 |
| 2.1 Datos bibliográficos | 105 |
| 2.2 Texto íntegro del artículo | 105 |
| Capítulo 3: Artículo 2 del compendio | 149 |
| 3.1 Datos bibliográficos | 149 |
| 3.2 Texto íntegro del artículo | 149 |
| Capítulo 4: Artículo 3 del compendio..... | 161 |
| 4.1 Datos bibliográficos | 161 |
| 4.2 Texto íntegro del artículo | 161 |
| Referencias..... | 171 |

Índice general

| | |
|--|----|
| PRIMERA PARTE: INTRODUCCIÓN AL COMPENDIO | 25 |
| Capítulo 1: Introducción | 27 |
| 1.1 Introducción al compendio..... | 29 |
| 1.1.1 Publicaciones científicas | 29 |
| 1.1.2 Relación temática de las publicaciones | 29 |
| 1.1.2.1 Relación del Artículo 1 con el Artículo 2 | 30 |
| 1.1.2.2 Relación del Artículo 1 con el Artículo 3 | 31 |
| 1.1.2.3 Relación del Artículo 2 con el Artículo 3 | 31 |
| 1.2 Introducción a los ensayos NDT | 33 |
| 1.2.1 Aspectos generales de los ensayos NDT..... | 33 |
| 1.2.2 Fundamentos de las técnicas NDT de corrientes inducidas | 34 |
| 1.2.3 Técnica NDT de corrientes inducidas para la detección de discontinuidades..... | 35 |
| 1.2.4 Técnica NDT de corrientes inducidas para la medición de espesor..... | 38 |
| 1.2.5 Técnica NDT de corrientes inducidas multifrecuencia combinada con redes neuronales para la clasificación de piezas de acero por su tratamiento térmico | 39 |
| 1.3 Estudio de estado del arte..... | 43 |
| 1.3.1 Las técnicas NDT basadas en corrientes inducidas..... | 43 |
| 1.3.2 Sondas de corrientes inducidas | 45 |
| 1.3.2.1 Sondas inductivas puras | 45 |
| 1.3.2.2 Sondas con sensores magneto-resistivos..... | 46 |
| 1.3.2.3 Sondas con sensores de efecto Hall..... | 46 |
| 1.3.2.4 Sondas con dispositivos SQUID | 47 |
| 1.3.3 Técnicas multifrecuencia | 48 |
| 1.3.4 Redes neuronales..... | 48 |
| 1.4 Formulación de hipótesis y objetivos..... | 51 |
| 1.4.1 Hipótesis H1 y objetivos específicos | 51 |
| 1.4.2 Hipótesis H2 y objetivos específicos | 53 |
| 1.4.3 Relaciones entre hipótesis y objetivos | 55 |
| 1.5 Materiales..... | 57 |
| 1.5.1 Hardware..... | 57 |
| 1.5.1.1 Ordenadores | 57 |
| 1.5.1.2 Componentes electrónicos | 57 |
| 1.5.1.3 Banco de pruebas | 57 |
| 1.5.1.4 Instrumentación de medida | 58 |
| 1.5.1.5 Sondas de corrientes inducidas | 58 |
| 1.5.1.6 Probetas | 61 |
| 1.5.2 Software | 62 |
| 1.5.2.1 Entorno de desarrollo Matlab..... | 62 |

| | |
|--|------------|
| 1.5.2.2 Software del equipo de corrientes inducidas | 62 |
| 1.5.2.3 Herramientas ofimáticas | 62 |
| 1.5.3 Medios bibliográficos | 62 |
| 1.5.4 Entornos de trabajo | 63 |
| 1.6 Metodología | 65 |
| 1.6.1 Etapa 1A: Estudio del estado del arte | 65 |
| 1.6.2 Etapa 2: Formulación de hipótesis y definición de los objetivos | 66 |
| 1.6.3 Etapa 3: Diseño y desarrollo de la Sonda 1 y 2 de corrientes inducidas: Detección de discontinuidades y medidas de espesor | 66 |
| 1.6.4 Etapa 4A: Ensayo NDT con corrientes inducidas 1: discontinuidades y metrología de espesor no conductor | 67 |
| 1.6.4.1 Caracterización frecuencial de las sondas diseñadas | 68 |
| 1.6.4.2 Ensayos de detección de discontinuidades | 68 |
| 1.6.4.3 Ensayos de metrología de espesor de recubrimiento no conductor | 68 |
| 1.6.5 Etapa 5: Diseño y desarrollo de la Sonda 3 para la clasificación de piezas de acero por su tratamiento térmico | 69 |
| 1.6.6 Etapa 6A: Ensayo NDT con corrientes inducidas 2: clasificación de materiales | 71 |
| 1.6.6.1 Toma de datos | 71 |
| 1.6.6.2 Pre-procesado | 72 |
| 1.6.6.3 Procesado mediante redes neuronales | 72 |
| 1.6.6.4 Análisis de los clasificadores implementados | 73 |
| 1.6.7 Etapas 1B, 4B, 6B: Redacción y publicación de resultados | 74 |
| 1.7 Resultados y discusión | 75 |
| 1.7.1 Sondas de corrientes inducidas | 75 |
| 1.7.1.1 R1: Respuesta en frecuencia | 75 |
| 1.7.1.2 R2: Caracterización de discontinuidades | 76 |
| 1.7.1.3 R3: Metrología de espesor | 79 |
| 1.7.2 Redes neuronales aplicadas al postprocesado de datos de corrientes inducidas | 82 |
| 1.7.2.1 R4: Tasa de acierto | 84 |
| 1.7.2.2 R5: Carga computacional | 86 |
| 1.7.2.3 R6: Tiempo de ejecución | 87 |
| 1.8 Conclusiones | 89 |
| 1.9 Líneas futuras | 91 |
| 1.10 Contribuciones originales | 97 |
| 1.10.1 Sonda con sensor de efecto Hall fuera del radio del solenoide generador de campo | 97 |
| 1.10.2 Fusión de técnica multifrecuencia y redes neuronales para la clasificación de piezas de acero por su tratamiento térmico | 99 |
| SEGUNDA PARTE: ARTÍCULOS DEL COMPENDIO | 103 |
| Capítulo 2: Artículo 1 del compendio | 105 |
| 2.1 Datos bibliográficos | 105 |
| 2.2 Texto íntegro del artículo | 105 |
| Capítulo 3: Artículo 2 del compendio | 149 |
| 3.1 Datos bibliográficos | 149 |
| 3.2 Texto íntegro del artículo | 149 |
| Capítulo 4: Artículo 3 del compendio | 161 |
| 4.1 Datos bibliográficos | 161 |
| 4.2 Texto íntegro del artículo | 161 |
| Referencias | 171 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Esquema de la relación temática de los Artículos 1, 2 y 3 del compendio de publicaciones | 30 |
| Figura 2. Interacción de sonda inductiva con pieza de ensayo con defecto. | 35 |
| Figura 3. Esquema de automodulación de la portadora en el ensayo de corrientes inducidas y de demodulación IQ para la extracción de señal de impedancia. | 36 |
| Figura 4. (a) Lazo del plano de impedancia de un equipo de corrientes inducidas con sonda diferencial. (b) Variación del plano de impedancia normalizado ante una discontinuidad en materiales no ferromagnéticos. | 37 |
| Figura 5. Variación del plano de impedancia normalizado ante la medición de espesor basado en la curva de <i>lift-off</i> | 38 |
| Figura 6. Variación del plano de impedancia normalizado al aproximar: (a) piezas no ferromagnéticas con conductividad $\sigma_1 < \sigma_2$. (b) piezas ferromagnéticas con permeabilidad relativa $\mu r_1 < \mu r_2$ | 39 |
| Figura 7. Variación del plano de impedancia normalizado en un sistema multifrecuencia con materiales: (a) No ferromagnéticos. (b) Ferromagnéticos. | 40 |
| Figura 8. Espectro de frecuencias de ensayo recomendado por la AEND. | 40 |
| Figura 9. (a) Estructura de un perceptrón de una red neuronal multicapa. (b) Estructura de una red <i>feedforward</i> con neuronas totalmente conectadas, con una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida. | 41 |
| Figura 10. Principio de funcionamiento de un sensor <i>Hall</i> (a) Sin campo magnético aplicado $V_H=0V$. (b) Con campo magnético aplicado $V_H \neq 0V$ | 47 |
| Figura 11. Esquema de relaciones entre hipótesis y objetivos de la tesis. | 55 |
| Figura 12. (a) Esquema y (b) fotografía de la <i>Sonda 1 con generación y captación inductivas</i> utilizada en el Artículo 2 del compendio. | 58 |

| | |
|--|----|
| Figura 13. (a) Esquema y (b) fotografía de la <i>Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall</i> utilizada en el Artículo 2 del compendio. | 59 |
| Figura 14. (a) Esquema y (b) fotografía de la <i>Sonda 3 de tipo palpador, con generación y captación inductiva, axial, absoluta y de baja frecuencia</i> utilizada en el Artículo 3 del compendio. | 60 |
| Figura 15. Placas de aluminio de 1.6 mm de espesor con taladros de 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5 mm utilizadas en el Artículo 2 del compendio..... | 61 |
| Figura 16. Juego de levas 1, 2, 3, 4 forjadas con enfriamiento rápido (50%) y juego de levas 5,6,7,8 forjadas con enfriamiento lento (50%), utilizadas en el Artículo 3 del compendio. | 61 |
| Figura 17: Metodología seguida para la realización de los trabajos de investigación de esta tesis y relación de etapas con hipótesis, objetivos específicos O1-O6 y resultados R1-R6 | 65 |
| Figura 18. Diagrama de bloques del sistema: <i>Equipo de corrientes, sonda inductiva, juego de piezas de acero y PC de procesado.</i> | 71 |
| Figura 19. Interacción de la sonda palpador con las levas inspeccionadas en el Artículo 3 del compendio. | 71 |
| Figura 20. Esquema del proceso de entrenamiento de una RNA empleando un algoritmo iterativo..... | 73 |
| Figura 21: Relación señal/ruido (SNR) de la detección de discontinuidad artificial de 2.5mm con la <i>Sonda 1 con generación y captación inductivas</i> y con la <i>Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall</i> en la banda 10kHz-1000kHz | 75 |
| Figura 22: Gráfico de Relación señal/ruido SNR de la detección de agujeros en aluminio de diferentes diámetros, con la <i>Sonda 1 con generación y captación inductivas</i> y la <i>Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall</i> | 77 |
| Figura 23: Gráfico de ajuste de medida de espesor no conductor basado en el parámetro <i>lift-off</i> con la <i>Sonda 1 con generación y captación inductivas</i> , y con la <i>Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall</i> | 79 |
| Figura 24: Gráfico de <i>impedancia del equipo de corrientes inducidas de las muestras tratadas correctamente e incorrectamente y líneas de tendencia.</i> Frecuencia de inyección: (a) 50kHz, (b) 100kHz..... | 83 |
| Figura 25: Tasa de acierto de la RNA monofrecuencia de 50 kHz, de la RNA monofrecuencia de 100 kHz y de la RNA multifrecuencia de 50 kHz y 100 kHz. | 84 |

Figura 26: Carga computacional de las RNAs propuestas en función del número de neuronas ocultas. Número de sumas/productos y cómputos de la *tanh* de las RNAs monofrecuencia y de las RNAs multifrecuencia. 86

Figura 27. (a) Diagrama de inspección rotatoria para la detección de defecto largo. (b) Corrección electrónica de ganancia con canal absoluto con sensor de efecto *Hall*. 92

Figura 28. Sonda envolvente distribuida en 8 sectores con control de distancia con sensores de efecto *Hall* 92

Figura 29. (a) Rodillo de laminación fracturado que imprime defectología periódica. (b) Esquema de laminación de N trenes de rodillos, velocidades de producto v_i y diámetros de producto d_i . $i=1 \dots N$ 94

Figura 30. Posición relativa de la bobina y el sensor de *efecto Hall* de la sonda utilizada en el Artículo 2 del compendio. 97

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla I. Medidas de resistencia e inductancia de las bobinas activa y de compensación de la Sonda 1. Derivas de la bobina de compensación respecto a la bobina activa..... | 59 |
| Tabla II. Medidas de resistencia e inductancia de la bobina de excitación de la Sonda 2 y derivas R, L de la bobina de excitación de la Sonda 2 respecto bobina activa de Sonda 1 | 60 |
| Tabla III. Carga computacional teórica de las RNAs propuestas con N_{in} neuronas de entrada, N_{oc} neuronas en la capa oculta y una neurona de salida. | 73 |
| Tabla IV. Resultados de señal/ruido SNR de la <i>Sonda 1 con generación y captación inductivas</i> y de la <i>Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall</i> en función de la frecuencia | 75 |
| Tabla V. Resultados de señal/ruido SNR de la <i>Sonda 1 con generación y captación inductivas</i> y de la <i>Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall</i> en función de diferentes diámetros | 76 |
| Tabla VI. Resultados de exactitud de resolución del problema inverso del interpolador lineal de la <i>Sonda 1 con generación y captación inductivas</i> , y de los interpoladores lineal y exponencial de la <i>Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall</i> | 78 |
| Tabla VII. Resultados de incertidumbre digital del interpolador lineal de la <i>Sonda 1 con generación y captación inductivas</i> , y de los interpoladores lineal y exponencial de la <i>Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall</i> | 78 |
| Tabla VIII. Juego de datos de ajuste para la medida de espesor con interpoladores..... | 79 |
| Tabla IX. Juego de datos 2: Espesor real, amplitud, predicción de espesor, error absoluto y error relativo con la <i>Sonda 1 con generación y captación inductiva</i> , y la <i>Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall</i> | 80 |

| | |
|--|----|
| Tabla X. Incertidumbres de medida de espesor a partir de la equivalencia de espesor de medio punto del equipo de corrientes inducidas | 81 |
| Tabla XI. Resultados de datos de impedancia del equipo de corrientes inducidas de las muestras tratadas correcta e incorrectamente | 82 |
| Tabla XII. Resultados comparativos de precisión de medidas entre muestras tratadas correctamente e incorrectamente, a las frecuencias de trabajo 50kHz y 100kHz | 83 |
| Tabla XIII. Resultados de tasa de acierto de clasificación monofrecuencia a 50kHz, monofrecuencia a 100kHz y multifrecuencia a 50 y 100kHz, en función del número de neuronas de la capa oculta..... | 84 |
| Tabla XIV. Resultados de carga computacional de clasificación monofrecuencia a 50/100kHz y multifrecuencia a 50 y 100kHz, en función del número de neuronas de la capa oculta..... | 86 |
| Tabla XV. Tiempo de ejecución promedio y máximo requerido por cuatro configuraciones de las RNAs propuestas para clasificar levas de acero | 87 |

Listado de acrónimos

| | |
|---------------------|---|
| ADC | <i>Analog to Digital Converter</i> |
| AEND | <i>Asociación Española de Ensayos no Destructivos</i> |
| Análisis ROC | <i>Análisis Receiver Operating Characteristic</i> |
| ANN | <i>Artificial Neural Network</i> |
| CCD | <i>Charge-Coupled Device</i> |
| CRT | <i>Cathode Ray Tube</i> |
| EMAT | <i>Electromagnetic Acoustic Transducer</i> |
| EVT | <i>Entrenamiento-Validación-Test</i> |
| FDM | <i>Frequency-Division Multiplexing</i> |
| FFT | <i>Fast Fourier Transform</i> |
| HRC | <i>Hardness Rockwell C</i> |
| ISI | <i>Institute of Scientific Information</i> |
| JCR | <i>Journal Citation Reports</i> |
| LCD | <i>Liquid Crystal Display</i> |
| MLP | <i>Multilayer Perceptron</i> |
| NDT | <i>Non-Destructive Testing</i> |
| PCB | <i>Printed Circuit Board</i> |
| RBFFNN | <i>Radial Basis Function Neural Network</i> |
| RNA | <i>Red Neuronal Artificial</i> |
| SNR | <i>Signal to Noise Ratio</i> |
| TDM | <i>Time-Division Multiplexing</i> |
| UNESID | <i>Unión de Empresas Siderúrgicas</i> |

WOS

Web of Science

PRIMERA PARTE:
**INTRODUCCIÓN AL
COMPENDIO**

Capítulo 1: Introducción

En el presente capítulo se presenta una introducción a la tesis presentada en formato por compendio de tres publicaciones en revistas científicas con factor de impacto *Journal Citation Reports* (JCR), aceptados para su publicación con posterioridad al inicio de los estudios de doctorado.

El capítulo contiene una introducción con una justificación de la relación temática de las publicaciones que se compendian, una introducción a las técnicas NDT basadas en corrientes inducidas, un resumen del estado del arte de la tecnología, la formulación de las hipótesis y la definición de los objetivos del proyecto de investigación, los materiales empleados, la metodología seguida, los resultados y su discusión, las conclusiones alcanzadas, las líneas futuras de investigación y las contribuciones originales.

1.1 Introducción al compendio

En esta sección se presentan los artículos que han surgido de esta tesis en formato compendio de publicaciones científicas y la relación temática de las mismas.

1.1.1 Publicaciones científicas

Las publicaciones científicas que se compendian en la presente tesis son:

- *Artículo 1: J. García-Martín, J. Gómez-Gil, and E. Vázquez-Sánchez, "Non-destructive techniques based on eddy current testing", Sensors, vol. 11, pp. 2525-2565, 2011.*
- *Artículo 2: J. García-Martín and J. Gómez-Gil, "Comparative evaluation of coil and Hall probes in hole detection and thickness measurement on aluminum plates using eddy current testing", Russian Journal of Nondestructive Testing, vol. 49, pp. 482-491, 2013.*
- *Artículo 3: J. García-Martín, V. Martínez- Martínez, and J. Gómez-Gil, "Clasificación del tratamiento térmico de aceros con ensayos no destructivos por corrientes inducidas mediante redes neuronales", DYNA-Ingeniería e Industria, vol. 89, pp. 526-532, 2014.*

1.1.2 Relación temática de las publicaciones

La línea de investigación de esta tesis doctoral se centra en el ámbito de sondas y algoritmos de técnicas NDT basadas en corrientes inducidas. A continuación, se explica cómo las contribuciones de esta tesis están relacionadas entre sí. La Figura 1 es un esquemático de esta relación temática dos a dos.

En el **Artículo 1 del compendio** [1] se presenta un estudio del estado del arte de las técnicas NDT basadas en corrientes inducidas. En el **Artículo 2 del compendio** [2] se presentan resultados comparativos sobre ensayos NDT con sondas de corrientes inducidas de diverso tipo. En el **Artículo 3 del compendio** [3] se presentan resultados de clasificación del tratamiento térmico de aceros con ensayos no destructivos por corrientes inducidas mediante redes neuronales y técnicas mono y multifrecuencia.

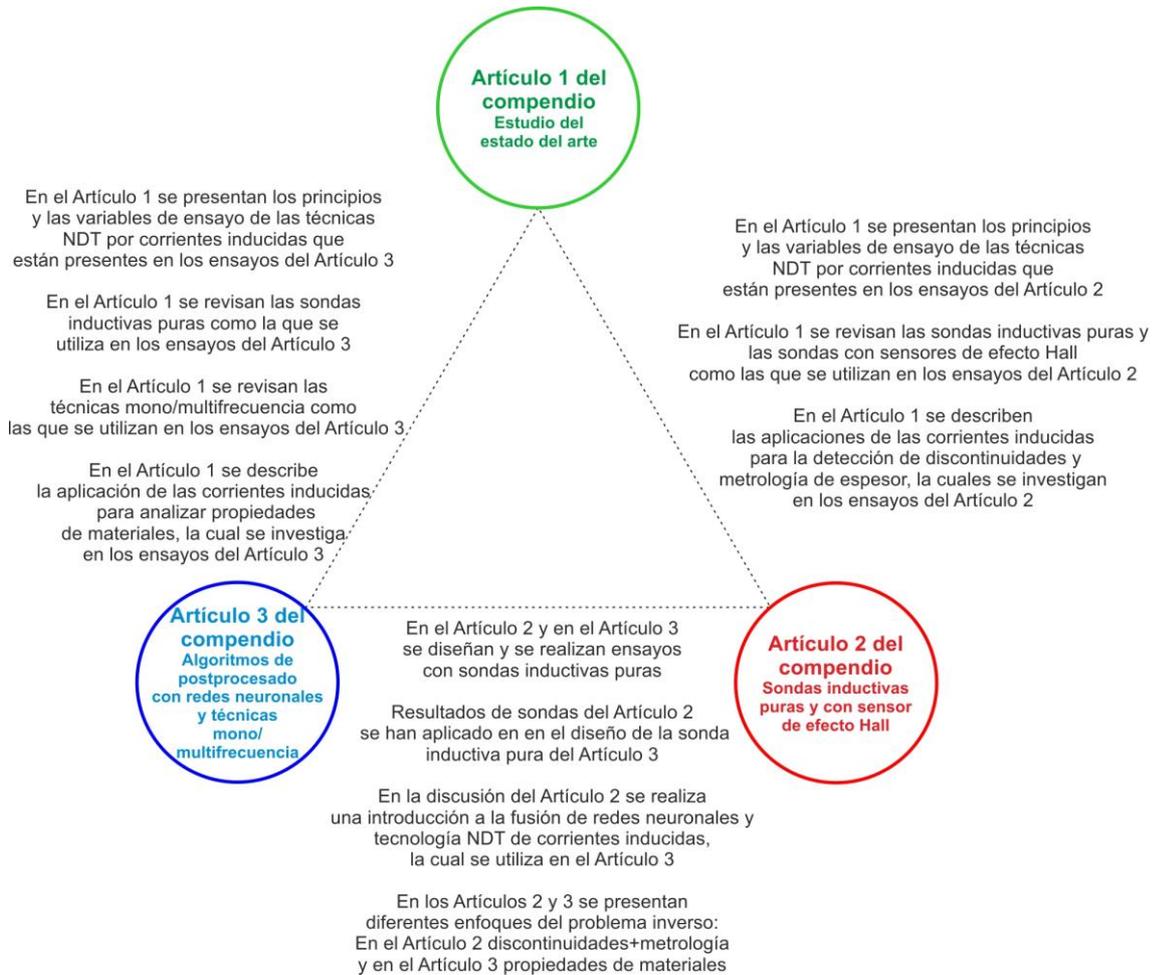


Figura 1. Esquema de la relación temática de los Artículos 1, 2 y 3 del compendio de publicaciones

1.1.2.1 Relación del Artículo 1 con el Artículo 2

El **Artículo 1 del compendio** [1], en el que se presenta un estudio del estado del arte de las técnicas NDT basadas en corrientes inducidas, se relaciona con el **Artículo 2 del compendio** [2], por los siguientes aspectos:

- En los Apartados 2 y 3 del **Artículo 1 del compendio** se describen los principios de operación y las variables principales que influyen en el ensayo 1, cuyos resultados se publicaron en el **Artículo 2 del compendio**
- En el Apartado 4 del **Artículo 1 del compendio** se describen las distintas sondas existentes. En el Subapartado 4.1 se realiza un estudio de estado del arte de las sondas inductivas puras, como una de las dos que se utilizan en el **Artículo 2 del compendio**. En el Subapartado 4.3 se realiza un estudio de estado del arte de las sondas que integran sensores de efecto *Hall*, como el que se utiliza en el **Artículo 2 del compendio**. En el Subapartado 4.5 se realiza una comparación de distintas estructuras de sondas y con distintos sensores magnéticos inductivos y alternativos, como se realiza en el **Artículo 2 del compendio**.

- En el Apartado 6 del **Artículo 1 del compendio** se describen las aplicaciones de las técnicas NDT de corrientes inducidas. En el **Artículo 2 del compendio** se trabaja sobre dos de las tres descritas: (i) las aplicaciones para la detección de discontinuidades en materiales conductores de la electricidad, y sobre (ii) las aplicaciones para la metrología de espesor.

1.1.2.2 Relación del Artículo 1 con el Artículo 3

El **Artículo 1 del compendio**, se relaciona con el **Artículo 3 del compendio** [3] por los siguientes aspectos:

- En los Apartados 2 y 3 del **Artículo 1 del compendio** se describen los principios de operación y las variables principales que influyen en el ensayo 2, cuyos resultados se publicaron en el **Artículo 3 del compendio**.
- En el Apartado 4 del **Artículo 1 del compendio** se describen las distintas sondas existentes. En el subapartado 4.1 se realiza un estudio de estado del arte de las sondas inductivas puras, como la que se utiliza en el **Artículo 3 del compendio**.
- En el Apartado 3.6.1 del **Artículo 1 del compendio** se describen los fundamentos de la técnica multifrecuencia, utilizada en el **Artículo 3 del compendio**.
- En el Apartado 6 del **Artículo 1 del compendio** se describen las aplicaciones de las técnicas NDT de corrientes inducidas. En el **Artículo 3 del compendio** se trabaja sobre una de las tres descritas: (i) las aplicaciones para la clasificación de materiales por su composición química y/o microestructura.

1.1.2.3 Relación del Artículo 2 con el Artículo 3

El **Artículo 2 del compendio**, se relaciona con el **Artículo 3 del compendio** por los siguientes aspectos:

- En el **Artículo 3 del compendio** se trabaja con algoritmos de postprocesado de los datos base mono/multifrecuencia que entregan los equipos de instrumentación con redes neuronales. Estos datos proceden de la interacción sonda-pieza. En los ensayos del **Artículo 3 del compendio** se utiliza una sonda inductiva pura, como las que se analizan y comparan en el **Artículo 2 del compendio**.
- Se han tomado decisiones de diseño para la sonda inductiva pura del **Artículo 3 del compendio** en base a los resultados de sondas del **Artículo 2 del compendio**. Se incluyen en el apartado 1.6.5 de la Metodología.
- En la discusión de resultados del **Artículo 2 del compendio** se dejó plasmada la posibilidad de resolver el problema inverso de caracterizar discontinuidades por medio de **redes neuronales**. Esta introducción a la fusión de técnicas de

corrientes inducidas y de redes neuronales, ha dado paso, aunque con aplicaciones de propiedades de materiales, a los trabajos de investigación que se han publicado en el **Artículo 3 del compendio**.

- Tanto en el **Artículo 2 del compendio** como en el **Artículo 3 del compendio** se presenta la resolución del problema inverso. En el **Artículo 2 del compendio** se muestran resultados para poder ajustar un sistema de interpolación, para caracterizar discontinuidades y a medir espesor, a partir de las indicaciones del equipo de corrientes. El cierre del ciclo de resolución de estos dos problemas inversos, con la predicción de tamaño de discontinuidades y espesor, se completa en el apartado 1.7 Resultados y discusión de esta memoria de tesis. En el **Artículo 3 del compendio**, se muestra una ejecución completa de resolución del problema inverso de piezas por sus propiedades microestructurales, con ajuste y clasificación binaria en dos grupos.

1.2 Introducción a los ensayos NDT

En este apartado se describen algunos aspectos generales de los ensayos no destructivos (*Non-Destructive Testing*, NDT). Posteriormente se describen los fundamentos de las técnicas NDT basadas en corrientes inducidas, y después se describen los tres grupos de aplicación que se tratan en la presente tesis. Se comienza con las bases de la detección de discontinuidades, después se presentan las bases para la medición de espesor y finalmente se presentan las bases para la clasificación de piezas de acero por su tratamiento térmico combinada con redes neuronales artificiales (*Artificial Neural Networks*, ANNs).

1.2.1 Aspectos generales de los ensayos NDT

En la actualidad, las técnicas de ensayos no destructivos se utilizan ampliamente en la industria con el fin de controlar la calidad de una amplia variedad de materiales. Al contrario de los ensayos destructivos, en los que sólo es posible inspeccionar una parte de un lote producido, con los ensayos no destructivos se puede ensayar la totalidad del lote, consiguiendo aumentos de la seguridad, la calidad y la fiabilidad del producto. Además, los ensayos no destructivos permiten trazar la calidad de un producto a lo largo de su vida útil, por medio de controles que pueden ayudar a la prevención de accidentes.

Cuando se va a inspeccionar una pieza por una técnica NDT hay una serie de pasos generales que se deben seguir:

El primer paso es **elegir la técnica más adecuada de ensayo**. Existen un amplio abanico de técnicas, como las basadas en ultrasonidos, las técnicas con *Electromagnetic Acoustic Transducer* EMAT, las que utilizan líquidos penetrantes, las de visión y las de tipo electromagnético. En el caso de ensayo de defectos, la técnica se elige en función del tipo de material y de las discontinuidades que presenta. Cuando varias técnicas pueden ser capaces de detectar una misma discontinuidad se dice que son redundantes. Cuando varias técnicas detectan discontinuidades diferentes, se dice que son complementarias.

El segundo paso es **definir el ensayo**. Supongamos haber elegido la técnica de corrientes inducidas. El ensayista con certificado en nivel II o III en corrientes inducidas (denominación de la norma UNE-EN ISO 9712:2012) debe elegir aspectos como magnetizar o no el material, el modo mono o multifrecuencia, la sonda más adecuada, y la configuración idónea.

El tercer paso es **obtener** los datos que el equipo de corrientes inducidas proporciona, los cuales en el argot se conocen como **indicaciones**. En las indicaciones influye la morfología de la pieza, si es tubo, barra o plana, y en caso de ensayo de defectos, influye la posición, la orientación y el tamaño de las discontinuidades que se desean detectar.

El cuarto paso es **interpretar las indicaciones** obtenidas y relacionarlas con los defectos de la pieza, con sus propiedades o con las variables que se desean medir de la misma.

El quinto paso es **evaluar las indicaciones**, y tomar decisiones sobre el estado de la pieza ensayada.

1.2.2 Fundamentos de las técnicas NDT de corrientes inducidas

Las técnicas no destructivas de corrientes inducidas tienen tres aplicaciones fundamentales: la primera de ellas, y por las que son ampliamente conocidas, es la detección de discontinuidades en los metales que se inspeccionan. La segunda aplicación es la metrología de distancia, como la medición de espesor de revestimiento conductor, no conductor y de óxido sobre metales [4]. Finalmente, la tercera aplicación de estas técnicas es la medición de la composición química y/o la microestructura resultante de piezas tras haber sido sometidas a tratamientos térmicos [5].

El principio de las técnicas de corrientes inducidas de Foucault se basa en la interacción entre una fuente de campo magnético alterno y el material de ensayo, en el cual se inducen corrientes [6]. En caso de la presencia de grietas en el metal inspeccionado, se producen cambios en el flujo de la corriente que es detectado por los equipos de instrumentación [7].

Cuando una bobina energizada por corriente alterna se acerca a un material conductor de la electricidad, el campo magnético alterno primario penetra en el material y genera corrientes inducidas (o de *Foucault* o *Eddy*), como se muestran en la Figura 2. Cuando aparece una discontinuidad se produce **variación en la impedancia Z del solenoide**, que es monitorizada mediante la señal de tensión o de corriente, por el equipo de instrumentación. A su vez, la medida de impedancia Z puede revelar información específica acerca de la **metrología de la distancia sonda-pieza** y de la **composición química y/o microestructural de la pieza de ensayo**. Las variables que más afectan al ensayo son la conductividad eléctrica σ y la permeabilidad magnética μ por debajo de la *temperatura de Curie* [8].

Para una explicación más extensa y completa sobre las bases de las corrientes inducidas, puede consultar los libros de Mix *et al.* [9] y Davis *et al.* [10]. El lector también encontrará las bases del enfoque analítico del problema sonda-defecto a través de las *ecuaciones de Maxwell* en medios materiales, en la referencia de Wangsness *et al.* [11], y en numerosos artículos científicos relacionados.

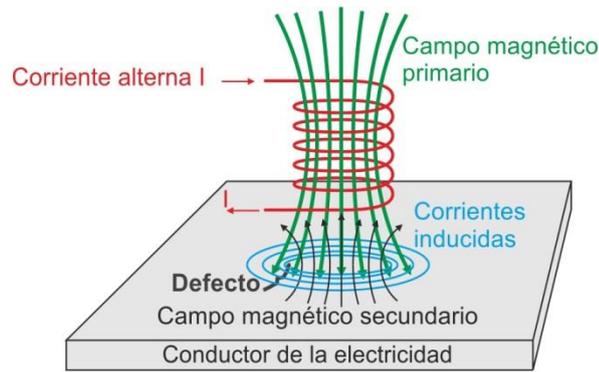


Figura 2. Interacción de sonda inductiva con pieza de ensayo con defecto.

Como se describe en el **Artículo 1 del compendio** y en muchos artículos de la bibliografía relacionada, existe el *problema sonda-defecto directo* y el *problema inverso*. Por un lado, el *problema directo* consiste en predecir la impedancia o el voltaje captado por una sonda de corrientes inducidas, cuando ésta inspecciona una pieza con una discontinuidad conocida y determinada [12]. Diversos autores han publicado modelos para resolver el *problema directo* como Skarlatos *et al.* en tubos ferromagnéticos [13] y Bowler *et al.* en piezas de aluminio y acero por medio de la *ecuación de Laplace* [14].

Por otro lado, la resolución del llamado *problema inverso* en NDT con corrientes inducidas tiene por objetivo la determinación del tipo y tamaño de las discontinuidades a partir de las señales eléctricas captadas por la sonda. En términos generales cuando un técnico utiliza un equipo de corrientes inducidas para la búsqueda de las discontinuidades e intenta clasificar un defecto a partir de ensayos previos, está resolviendo el *problema inverso*. También varios autores han publicado su resolución del *problema inverso*, como Uzal *et al.* [15] y Tamburrino *et al.* [16].

1.2.3 Técnica NDT de corrientes inducidas para la detección de discontinuidades

La técnica NDT de corrientes inducidas para la detección de discontinuidades en metales está basada en la monitorización del flujo de electrones que se genera en el seno de las piezas. En el caso de *sondas con generación y captación inductivas*, el flujo se mide a través del cambio temporal t de impedancia $Z = Z(t) = R(t) + jX(t)$ en el solenoide captador. La señal de impedancia sufre una automodulación por la señal de defecto, como se muestra en la parte izquierda de la Figura 3.

Llamemos $I(t)$ a una señal proporcional a la parte real de una impedancia $I(t) \propto R(t)$ y $Q(t)$ a una señal proporcional a la parte imaginaria de una impedancia $Q(t) \propto X(t)$. Los equipos de instrumentación se comportan como extractores de impedancia del solenoide que se aproxima a la pieza de metal de ensayo, a partir de demodulación IQ coherente de la señal recibida $S_{RF}(t)$ de la Ecuación (1).

$$S_{RF}(t) = S_I(t) + S_Q(t) = I(t) \cdot \cos(2\pi f_{LO} t) - Q(t) \cdot \sin(2\pi f_{LO} t) \quad (1)$$

En la demodulación el canal I se mezcla con $\cos(2\pi f_{LO} t)$, mientras que el canal Q se mezcla con $-\sin(2\pi f_{LO} t)$. Posteriormente se realiza un filtrado paso bajo (*Low Pass Filter*, LPF), como se muestra en parte derecha de la Figura 3.

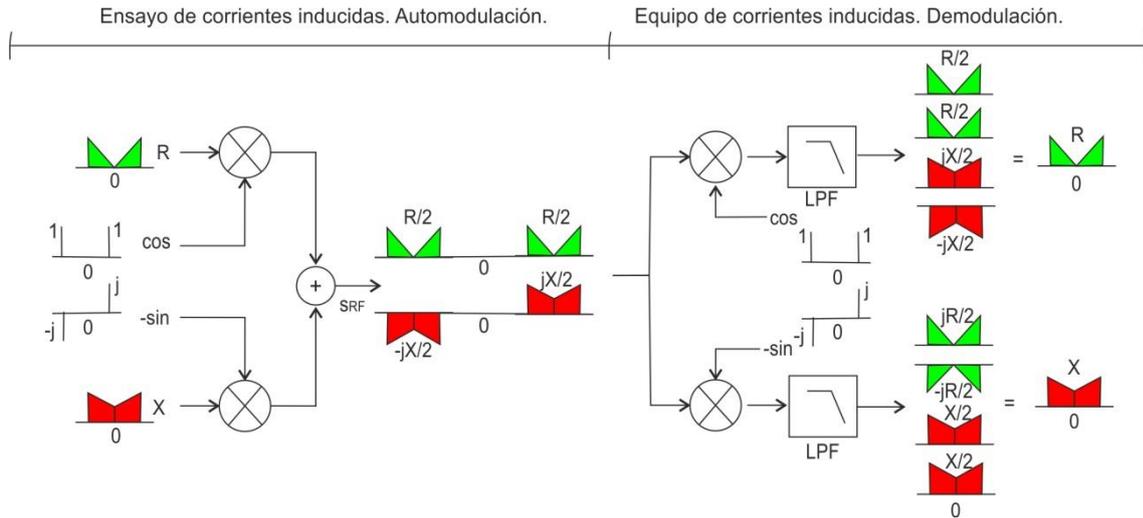


Figura 3. Esquema de automodulación de la portadora en el ensayo de corrientes inducidas y de demodulación IQ para la extracción de señal de impedancia.

La impedancia extraída se representa en planos de impedancia bidimensionales donde la abscisa (eje X) representa la resistencia y la ordenada (eje Y) representa la reactancia inductiva. Los equipos antiguos mostraban el lazo como el de la Figura 4-a, en osciloscopios de tubo de rayos catódicos CRT con pantalla de fósforo en modo XY [17], mientras que en los actuales el plano de impedancia se muestra en pantallas LCD o LED.

En la bibliografía relacionada es muy habitual encontrar la transformación de impedancia de la Ecuación (2) y el uso de diagramas de impedancia normalizados como el de la Figura 4-b [18]. La normalización sitúa la impedancia de aire Z_0 en el punto P_0 con coordenadas $R_{cn} = 0, X_{cn} = 1$, y el punto de trabajo en el P_1 según la conductividad y permeabilidad de la pieza de ensayo. El paso de la discontinuidad provoca la excursión temporal de P_1 hasta P_2 .

$$R_{cn} = \frac{R_c - R_0}{X_0}; X_{cn} = \frac{X_c}{X_0} \quad (2)$$

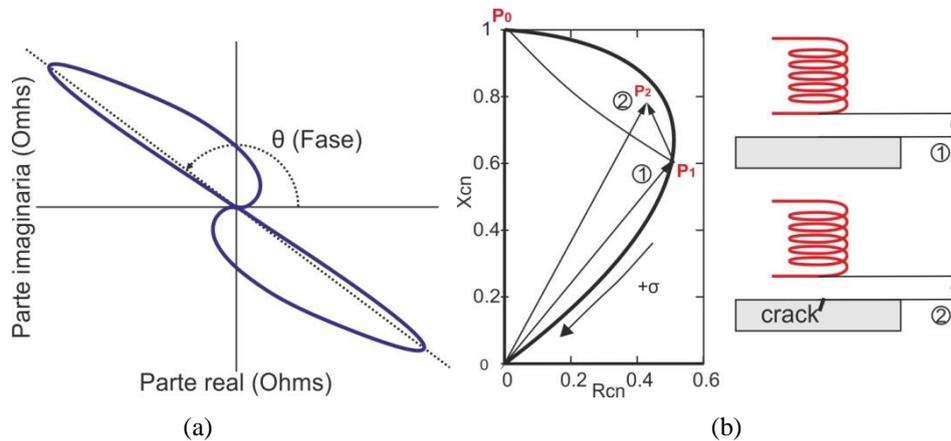


Figura 4. (a) Lazo del plano de impedancia de un equipo de corrientes inducidas con sonda diferencial. (b) Variación del plano de impedancia normalizado ante una discontinuidad en materiales no ferromagnéticos.

Es habitual que diferentes tipos de discontinuidades-defectos en una pieza se manifiesten como desviaciones de impedancia en amplitud y fase diferentes $\overline{P_1 P_2}$. El estudio de las discontinuidades en metales es un tema muy amplio, y no se aborda en esta memoria de tesis. De manera resumida, las discontinuidades pueden surgir (i) en los lingotes (también llamados tochos o palanquillas) de las siderurgias o acerías en colada continua, (ii) en el proceso de laminación en caliente de los lingotes para la fabricación de producto largo (grietas, briznas, incrustaciones, marcas periódicas-canal picada, pliegues irregulares, etc.), (iii) en el proceso de mecanizado de piezas finales, (iv) en la soldadura entre dos piezas, (v) en el forjado de piezas, (vi) en la extrusión de piezas, (vii) en el remachado de piezas, o (viii) en situaciones de servicio de infraestructuras industriales o de transporte críticas, tanto en casos de fatiga como de corrosión.

Para realizar ensayos de inspección de los productos metálicos más importantes como tubo, barra negra y barra calibrada, existen normas internacionales (normas ISO y normas americanas) y otras adaptadas a cada país por la agencia correspondiente (en España normas UNE publicadas por AENOR), que siguen la mayoría de los fabricantes.

En el **Artículo 1 del compendio** se describe la técnica NDT de corrientes inducidas para detectar discontinuidades en conductores de la electricidad, y en el **Artículo 2 del compendio** se incluyen contribuciones en este ámbito, con ensayos sobre piezas de aluminio con discontinuidades artificiales.

1.2.4 Técnica NDT de corrientes inducidas para la medición de espesor

La técnica NDT de corrientes inducidas para la medición de espesor está basada en los cambios de la parte real e imaginaria de la impedancia del solenoide en aproximación. Una técnica para la medida de espesor no conductor es la basada en el despeque (también muy conocido como *lift-off*). El *lift-off* es la distancia entre el bobinado de la sonda palpador y la pieza que se inspecciona. En la Figura 5 se muestra una curva de *lift-off* en un diagrama normalizado de impedancia con los nodos en saltos iguales de distancia, desde la impedancia en contacto en P_1 , hasta la impedancia de aire en P_0 . La máxima sensibilidad a la medida de espesor no conductor se obtiene con el palpador en las proximidades del metal en P_1 , ya que es donde se produce la máxima excursión de impedancia. En los casos de detección de discontinuidades, las oscilaciones en la distancia sonda-pieza provocan ruido en la inspección, que tratan de ser corregidas por diversos métodos por diversos autores como Yin *et al.*, Lopez *et al.*, Shu *et al.* y Yun *et al.* [19-22]. Sin embargo, en los casos de medición de espesor de recubrimiento no conductor, el *lift-off* resulta ventajoso y es empleado en el **Artículo 2 del compendio**.

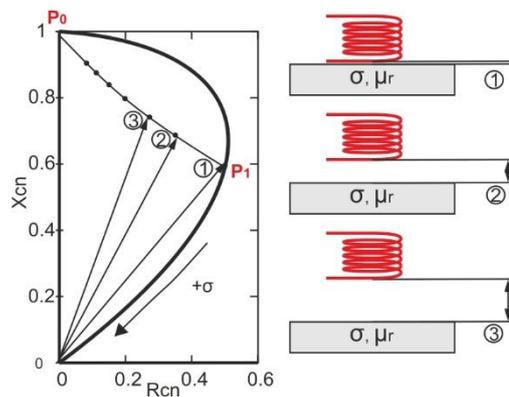


Figura 5. Variación del plano de impedancia normalizado ante la medición de espesor basado en la curva de *lift-off*.

Para una explicación más extensa y completa sobre la aplicación de la técnica NDT de corrientes inducidas en la medición de espesor no conductor, puede consultar el artículo de metrología de distancia sonda-metal con aire “entre medias” de Jun *et al.* [23]. También puede consultar los artículos de medida de espesor de láminas conductoras de los autores Zhao *et al.* [24] y de Wang *et al.* [25], y el artículo de medida de espesor conductor de recubrimiento galvanizado de Placko *et al.* [26].

1.2.5 Técnica NDT de corrientes inducidas multifrecuencia combinada con redes neuronales para la clasificación de piezas de acero por su tratamiento térmico

La técnica NDT de corrientes inducidas para la clasificación de piezas de acero por su tratamiento térmico está basada en los cambios de la parte real R_{cn} e imaginaria X_{cn} la impedancia del solenoide en aproximación, al acercar piezas con distinta composición química o microestructura. En la Figura 6-a se muestran los puntos finales de aproximación en un plano de impedancia normalizado, al aproximar piezas no ferromagnéticas con diferentes conductividades eléctricas $\sigma_1 < \sigma_2$. De modo análogo, en la Figura 6-b se muestran los puntos finales en “la oreja”, al aproximar materiales ferromagnéticos con diferentes permeabilidades magnéticas $\mu_{r1} < \mu_{r2}$. Las sutiles diferencias entre piezas con distinto tratamiento térmico se detectan con el vector diferencia $\overline{P_{1-1}P_{1-2}}$ a cada una de las frecuencias de inspección.

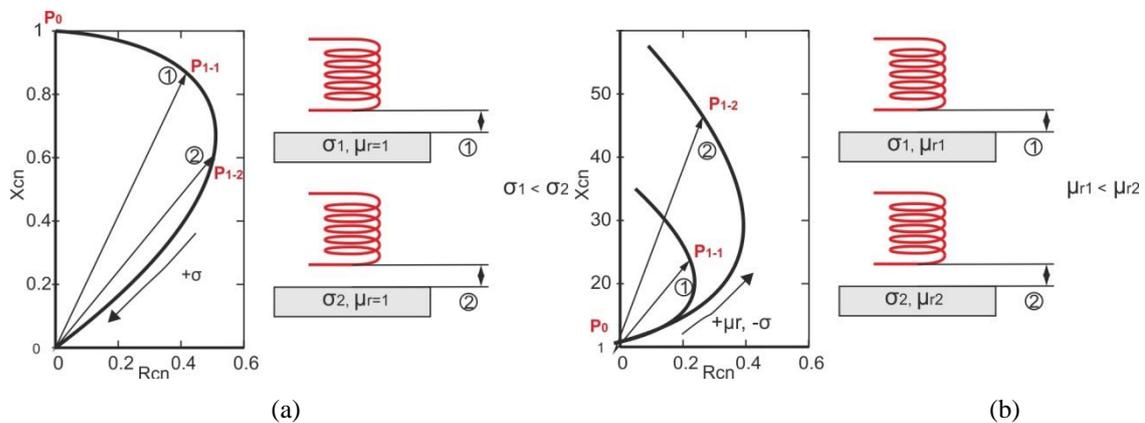


Figura 6. Variación del plano de impedancia normalizado al aproximar: (a) piezas no ferromagnéticas con conductividad $\sigma_1 < \sigma_2$. (b) piezas ferromagnéticas con permeabilidad relativa $\mu_{r1} < \mu_{r2}$.

La clasificación de piezas (o *sorting* de piezas) por su tratamiento térmico puede realizarse con equipos de corrientes inducidas convencionales, que emplean una sola excitación sinusoidal para realizar los ensayos. Sin embargo, estos sistemas están fuertemente limitados por la profundidad de penetración de las corrientes inducidas [27], por la influencia de fuentes de ruido captadas en los entornos industriales y por las variaciones de temperatura de sondas, piezas y componentes. Existe una alternativa para dar más robustez a los ensayos y tomar decisiones de clasificación con mayor número de variables evaluadas, que es la utilización de técnicas multifrecuencia para la clasificación de piezas por tratamiento térmico [28]. En la Figura 7-a se muestra un plano de impedancia normalizado de un sistema multifrecuencia al aproximar piezas no ferromagnéticas, en el que la “oreja” del diagrama tiene más resolución cuanto mayor es la frecuencia de ensayo. Se puede apreciar que la parte real de la impedancia aumenta, pero la parte imaginaria disminuyen.

En la Figura 7-b se muestra un plano de impedancia normalizado de un sistema multifrecuencia al aproximar piezas ferromagnéticas, donde se puede apreciar que tanto la parte real como la imaginaria de la impedancia aumenta, y más cuanto mayor es la frecuencia de ensayo. Este sistema es utilizado en el **Artículo 3 del compendio**.

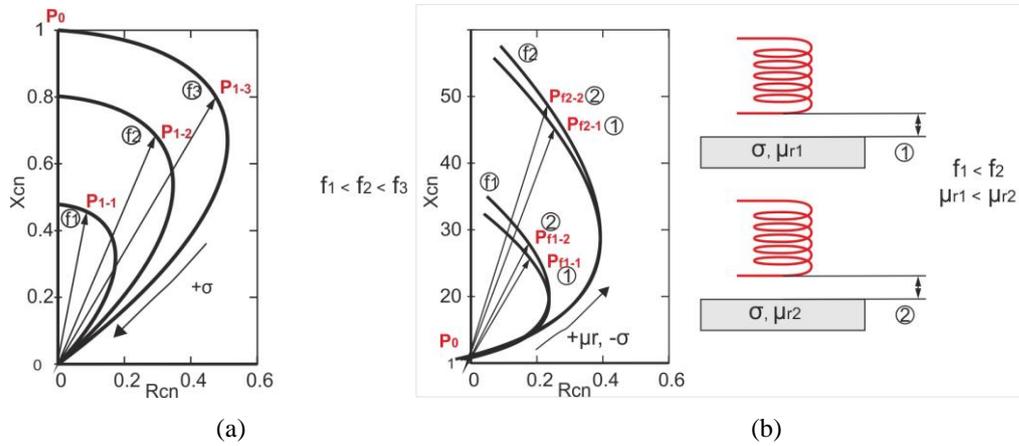


Figura 7. Variación del plano de impedancia normalizado en un sistema multifrecuencia con materiales: (a) No ferromagnéticos. (b) Ferromagnéticos.

Sea el caso de aproximación de pieza no ferromagnética o ferromagnética, el sistema multifrecuencia clasifica en función de varias “orejas de conductividad” a la vez, y cancela algunas variables indeseadas del ensayo comunes.

En la Figura 8 se muestra el espectro de frecuencias de ensayo, recomendado por la *Asociación Española de Ensayos no Destructivos AEND* en uno de sus cursos formativos de capacitación nivel II.

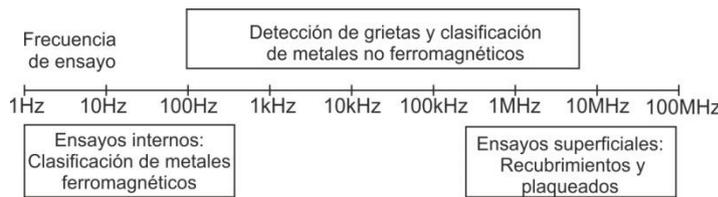


Figura 8. Espectro de frecuencias de ensayo recomendado por la AEND.

Las técnicas de *eddy current* multifrecuencia se pueden realizar a tiempo completo *full-time* o secuencial con multiplexación por división en el tiempo (*Time-Division Multiplexing, TDM*). Las técnicas *full-time* generan una señal compuesta $s(t)$ que es una combinación lineal de N señales cosenoidales con amplitud A_i y desfase inicial θ_i como muestra la Ecuación (3):

$$s(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cos_i(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (3)$$

El sistema *full-time* requiere frecuencias f_i suficientemente separadas, para que sean suficientemente rechazadas por el sistema de demodulación sintonizado y evitando la banda imagen. En cualquiera de ambos casos *full-time* o secuencial, las técnicas multifrecuencia expanden las capacidades de las *técnicas monofrecuencia*. En el **Artículo 3 del compendio** se incluyen las contribuciones realizadas en el campo de la mejora de las técnicas NDT de corrientes inducidas mono y multifrecuencia.

Además de las contribuciones a las técnicas mono y multifrecuencia, los datos de impedancia generados por los equipos de corrientes inducidas se pueden introducir a redes neuronales artificiales. Las redes neuronales son herramientas complejas de procesamiento de datos e inspiradas en el sistema nervioso de los animales. Están compuestas por múltiples neuronas (Figura 9-a), que constituyen unidades básicas de procesamiento capaces de generar un valor de salida en función de unos valores de entrada (Figura 9-b).

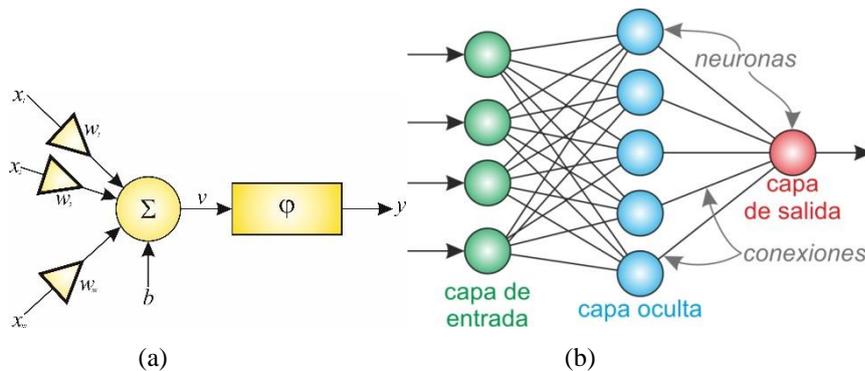


Figura 9. (a) Estructura de un perceptrón de una red neuronal multicapa. (b) Estructura de una red *feedforward* con neuronas totalmente conectadas, con una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida.

Las redes neuronales aplicadas a las técnicas NDT de corrientes inducidas son apropiadas para procesar las impedancias que generan los sistemas de *n-frecuencias* por ser sistemas multi-entrada. Además, son sistemas que realizan un aprendizaje objetivo a partir de unos datos de entrada. Una vez entrenadas las redes generan unos resultados de salida completamente neutrales y de manera autónoma. Esto es una gran contribución a los ensayos NDT, donde en muchas ocasiones influye la experiencia del operador humano. Se evitan errores humanos en la determinación de la presencia de defecto, o en la medición de una propiedad física del material que se inspecciona. El aprendizaje automático (*machine learning*) de las redes neuronales en la fase de entrenamiento sigue la tendencia actual del llamado *deep learning* [29].

Las redes neuronales se están pudiendo desarrollar gracias a los avances en la capacidad de procesamiento y pueden aplicarse en los controles de calidad industriales por NDT. En el **Artículo 3 del compendio** se presentan las contribuciones realizadas en el campo de la aplicación de diferentes redes neuronales a las técnicas NDT de corrientes inducidas. Para una explicación más extensa y completa sobre el funcionamiento de las redes neuronales artificiales, puede consultar los libros de Hayking [30] y Bishop [31].

1.3 Estudio de estado del arte

En este apartado se realiza un estudio de estado del arte de las técnicas de ensayos no destructivos (*Non-Destructive Testing*, NDT) basadas en corrientes inducidas, y después se concreta en las sondas que se utilizan en los ensayos y en los algoritmos que postprocesan los datos base que entregan los equipos de instrumentación. Se analizan en detalle las sondas que se utilizan para inspeccionar los distintos materiales y los algoritmos de procesado de la señal base que entregan los equipos de corrientes inducidas, porque constituyen el centro neurálgico de la tesis.

El estudio del estado del arte presentado en este apartado se completa con el **Artículo 1 del compendio**, en el que se realiza una revisión bibliográfica de revistas científicas indexadas y revistas técnicas del estado de la tecnología hasta 2011.

1.3.1 Las técnicas NDT basadas en corrientes inducidas

Las técnicas NDT basadas en corrientes inducidas se suelen englobar dentro de los métodos electromagnéticos y aparecen en la bibliografía como técnicas *Eddy Current* o EC. Estas técnicas comenzaron a desarrollarse a partir de los años 50 del siglo XX conjuntamente con el desarrollo de la electrónica integrada y los booms de las industrias nuclear y aeronáutica [32]. Las técnicas NDT basadas en corrientes inducidas son unas de las más utilizadas para la inspección de metales por su elevada velocidad de inspección, porque no requieren ningún contacto entre el material de la producción y la sonda, y porque ofrecen unos resultados casi instantáneos. Estas ventajas respecto de otras técnicas NDT, confiere a las corrientes inducidas un tratamiento destacado.

Las técnicas de ensayos no destructivos basadas en corrientes inducidas son de las más utilizadas, ya que además de permitir **la detección de heterogeneidades y discontinuidades** en metales, realizan medidas donde otras no llegan, como la **metrología** para la realización **de controles dimensionales** [4]; y la **caracterización** de los materiales a nivel químico, estructural o mecánico [5]. Es importante esta apreciación porque en esta tesis se trabaja en estas tres aplicaciones.

Desde la tecnología NDT de corrientes inducidas de mediados del siglo XX, a la tecnología de la actualidad, se han producido grandes cambios. Sobre todo se han producido en lo que respecta a: (i) la aplicación de la electrónica digital en el procesado de la información, (ii) la aplicación de sensores magnéticos de alta precisión y de estado sólido según las técnicas de fabricación microelectrónica, (iii) la visualización de la información gracias a las pantallas LCD y LED, (iv) la portabilidad de equipos gracias al avance en la capacidad de almacenamiento de las baterías, (v) la integración con dispositivos móviles, y (vi) el control informatizado integral de la producción de plantas siderúrgicas, gracias a las capacidades actuales de cómputo, de almacenamiento y extracción de datos, y de transmisión por medio de las diferentes tecnologías de redes de comunicaciones. La mejora de la instrumentación y las infraestructuras de captura y almacenamiento de datos están provocando volúmenes ingentes de datos de las

producciones, que plantean sustituir las técnicas tradicionales por técnicas de *big data* [33, 34]. Los datos procedentes de la producción poseen las características típicas del modelo 3V del *big data*: Volumen, Velocidad y Variedad. El llamado *big data* aplicado al control de calidad de una planta siderúrgica fomenta la paralelización, las técnicas de *mapReduce* y el acceso a información distribuida.

Desde un punto de vista general, hay tres razones de peso por las que investigar en técnicas no destructivas basadas en corrientes inducidas:

Primera razón: En el contexto macroeconómico del siglo XXI, **se demanda cada vez más seguridad en instalaciones nucleares, petroquímicas y aeronáuticas, y en infraestructuras de transporte** por carretera, ferroviario y aeronáutico, **que puede ser satisfecha con tecnología NDT de corrientes inducidas.**

Segunda razón: Según el anuario de 2014 de UNESID [35], el peso de la producción de acero del continente europeo (202MT en 2004 frente a 166MT en 2013) está disminuyendo respecto a la producción mundial (1062MT en 2004 frente a 1649MT en 2013), por el desarrollo de los países emergentes y en especial los del continente asiático (503MT en 2004 frente a 1122MT en 2013). Además, en este entorno globalizado el sector siderúrgico en Europa está pasando en 2010-2016 por un momento crítico, ya que se están conjuntando tres factores: la caída de la demanda interna, el *hándicap* del elevado precio la electricidad y el dumping del acero chino. **La investigación en nuevas sondas y en algoritmos aplicados a las técnicas NDT de corrientes inducidas, puede contribuir en los países europeos a la mejora en competitividad y diferenciación de producto.**

Tercera razón: El control de calidad de productos siderúrgicos de manera temprana supone evidentes ahorros económicos (evitando descartes de producto final) e importantes implicaciones energéticas y medioambientales. Tomando el acero como el material más representativo, según datos de la Comisión Europea, el consumo de energía para la producción de acero por la vía integral oscila entre los 17 y los 23 GJ por tonelada, mientras que las emisiones directas de CO₂ son del orden de 2.3 toneladas de CO₂ por tonelada de acero producido [36]. **Las contribuciones en ensayos no destructivos de corrientes inducidas, que pueden analizar los productos siderúrgicos de manera temprana en lingotes o en formatos semiacabados, fomentan el ahorro económico, energético y la sostenibilidad medioambiental.**

Grupos de investigación de todo el mundo están llevando a cabo investigación en el desarrollo de nuevas sondas, en los algoritmos de procesado que se ejecutan en los equipos de instrumentación o en servidores anexos, con el fin de satisfacer los estándares cada vez más altos de calidad requeridos en casi todas las industrias. Aunque hay excelentes mejoras, debido al esfuerzo de los muchos científicos durante varias décadas, **considero que más investigación sobre las técnicas corrientes de Foucault, en**

términos de sensores, y algoritmos de procesamiento de señales, dará lugar a más campos de aplicación de estas técnicas.

A continuación, se incluyen tres subapartados dedicados al estudio del estado del arte de: (i) sondas de corrientes inducidas utilizadas en los **Artículos 2 y 3 del compendio**, (ii) técnicas *multifrecuencia* y (iii) redes neuronales, como algoritmos de procesamiento de datos base que entregan los equipos de instrumentación. Tanto las técnicas de procesamiento *multifrecuencia*, como la aplicación de redes neuronales a los ensayos NDT con corrientes, son utilizados en el **Artículo 3 del compendio**.

1.3.2 Sondas de corrientes inducidas

Hay varios tipos de sondas para la evaluación no destructiva con corrientes inducidas, como las sondas inductivas formadas por bobinas utilizadas en los **Artículos 2 y 3 del compendio**, las sondas con sensores magneto-resistivos, las sondas con sensores de efecto *Hall* como la utilizada en el **Artículo 2 del compendio** y las sondas con dispositivos superconductores de interferencia cuántica (SQUID). En esta sección se presentan estos tipos de sondas y se resumen las investigaciones de diversos autores.

1.3.2.1 Sondas inductivas puras

Las sondas inductivas compuestas únicamente por bobinas (sondas puras) proporcionan una alta sensibilidad a los defectos cuando el tamaño del defecto es comparable con el de bobina transductora de recepción [37]. Los autores Grimberg *et al.* tuvieron en cuenta esta relación entre el tamaño de la bobina y del defecto en la sensibilidad, y propusieron un método para resolver el problema inverso y determinar profundidad de la grieta [39]. Algunas sondas, como las envolventes, tienen la limitación de reducción de tamaño ya que se han de adaptar a las barras o tubos que inspeccionan.

Las sondas inductivas proporcionan una alta sensibilidad a los defectos cuando el flujo de corriente de Foucault cambia drásticamente. Esto significa que las sondas envolventes están especializadas para detectar pequeños defectos paralelos al eje en barras o en tubos. Cuando estos defectos se alargan más allá de la zona de influencia de la sonda envolvente, que en el caso de ser diferencial se suele estimar como el doble de la separación entre bobinas, se necesitan sondas tipo *pancake* o palpador. Al tener dimensiones menores que las sondas envolventes, son más sensibles [38], y pueden llegar a detectar grietas de profundidad inferior a 50 μm .

Las sondas inductivas sectoriales están diseñadas específicamente para el control de la costura de soldadura de tubos [35]. La sensibilidad de las sondas sectorial es, en general, más alta que las sondas envolventes, ya que limitan la superficie de exploración a un sector, mientras que las sondas envolventes inspeccionan los 360 grados de la circunferencia.

Las bobinas en forma de herradura son útiles en la detección de defectos laminares que las sondas tipo *pancake* o palpador no pueden detectar. Las bobinas en espiral, muy

habituales en las sondas en placa de circuito impreso proporcionan una alta sensibilidad, y los arrays de bobinas micro permiten una inspección de alta velocidad y una alta resolución espacial [39].

En general, las ventajas de utilizar inductivas puras son la sencillez de su construcción, el amplio rango dinámico y la posibilidad de enfocar el sensor hacia la discontinuidad [40]. Algunas desventajas son los tiempos de acomodación al comienzo y fin de la señal (típicos transitorios de circuitos RL) [40] y los límites en su miniaturización [41].

Se pueden utilizar otros magnetómetros en lugar de bobinas de captación. Muchos autores encuentran la estructura y las características de los sensores magnetorresistivos atractivas para la evaluación no destructiva debido a su tamaño micro, la operación en alta frecuencia y su alta sensibilidad [42]. Los sensores *Hall* son sensores de campo magnético cuyo rango dinámico, según de Haan *et al.* no es lo suficientemente grande para algunas aplicaciones [40]. Las sondas con sensores SQUID son difíciles de utilizar en líneas de producción industriales y son costosos [40], aunque proporcionan ruido de campo muy bajo del orden de $fT / \sqrt{\text{Hz}}$, en comparación con sondas inductivas puras de inducción, que tienen ruido de campo de aproximadamente 3 órdenes de magnitud mayor, $1 \text{ nT} / \sqrt{\text{Hz}}$ [43].

1.3.2.2 Sondas con sensores magneto-resistivos

Los sensores magnetorresistivos son transductores de campo magnéticos que exhiben un cambio lineal en la resistencia eléctrica ante un campo magnético externo [44]. Los sensores magnetorresistivos son altamente sensibles y precisos, aunque su principal desventaja es el alto coeficiente de temperatura [41].

Los sensores magnetorresistivos se pueden utilizar en la evaluación no destructiva para detectar el campo secundario de las corrientes de Foucault. Algunos investigadores, como Ramos *et al.* [45] y Yamada *et al.* [42] han utilizado este tipo de sensores. Yamada *et al.* han utilizado un sensor de tipo SV-GMR cuyo rango operativo de densidad de campo magnético B varió desde los nT a los mT, con alta sensibilidad en frecuencias de hasta 100 MHz, y alta resolución espacial debido a la miniaturización.

1.3.2.3 Sondas con sensores de efecto Hall

Los sensores de efecto *Hall* pueden detectar campos magnéticos producidos por las corrientes de Foucault y se pueden utilizar en ensayos NDT. En presencia de inducción magnética B perpendicular al plano del sensor, la tensión *Hall* V_H es proporcional a la corriente que fluye a través del rectángulo conductor (Figura 10). Los sensores *Hall* se utilizan principalmente en la gama mT y pueden ser fácilmente miniaturizados e integrados dentro de los circuitos microelectrónicos [41]. Sus desventajas son la sensibilidad limitada del silicio, el alto nivel de ruido $1/f$ y el *offset* relativamente grande [41].

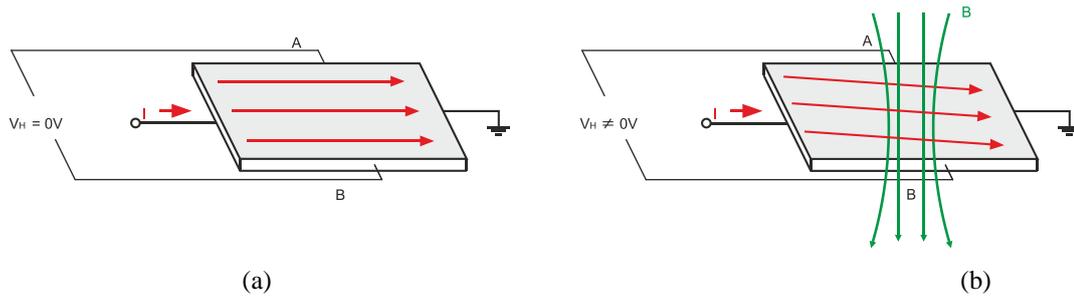


Figura 10. Principio de funcionamiento de un sensor *Hall* (a) Sin campo magnético aplicado $V_H=0V$. (b) Con campo magnético aplicado $V_H \neq 0V$.

Algunos autores como Jongwoo *et al.* han investigado la aplicación de sensores de efecto *Hall* a la inspección con corrientes inducidas [46]. Jongwoo *et al.* han presentaron una evaluación cuantitativa de las corrientes de Foucault en acero inoxidable austenítico con grietas, utilizando una matriz de sensores de efecto *Hall*. Otros investigadores como He *et al.* han probado una sonda *Hall* diferencial para detectar defectos en estructuras de aeronaves remachadas [47]. Y los autores Paasi *et al.* han presentado un magnetómetro *Hall* de tres ejes para medir la homogeneidad del campo magnético en un superconductor en los 3 ejes coordenados [48].

1.3.2.4 Sondajes con dispositivos SQUID

Los dispositivos superconductores de interferencia cuántica (*Superconducting quantum interference devices, SQUIDs*) son magnetómetros muy sensibles diseñados para medir campos magnéticos extremadamente débiles. Los dispositivos SQUID se basan en bucles superconductores que contienen uniones *Josephson* [41]. Los sensores SQUID pueden medir niveles extremadamente bajos de inducción magnética. La desventaja de estos tipos de sensores es la necesidad de refrigeración criogénica para disminuir los niveles de ruido a la gama de fT / \sqrt{Hz} , lo cual limitan su uso en muchas aplicaciones.

Los sensores SQUIDs se han utilizado ensayos NDT de corrientes inducidas desde la década de 1980 [43]. En los sistemas corrientes de Foucault convencionales, donde el campo magnético producido por las corrientes inducidas se detecta por medio de una bobina de inducción, el ruido de campo típico es de aproximadamente $1 \text{ nT} / \sqrt{Hz}$, a frecuencias de corrientes inducidas de aproximadamente 100 kHz. En algunos casos, este ruido de campo es demasiado alto para ciertas aplicaciones, tales como la detección de pequeñas partículas de óxido, especialmente si los materiales de prueba son altamente conductores, como cobre o aluminio. En estos casos, es recomendado utilizar magnetómetros SQUID, en lugar de las sondas inductivas puras.

Algunos autores han investigado el uso de sensores SQUID con corrientes de Foucault. Por ejemplo, Muck *et al.* han testado diversos materiales, y han obtenido una sensibilidad mucho más alta que en los ensayos con técnicas de corrientes de Foucault convencionales y con ensayos con ultrasonidos [49]. Otros autores, como Ruosi *et al.* han presentado sus

resultados de detección experimentales y numéricos, de defectos artificiales superficiales y subsuperficiales en estructuras planas de Al-Ti [50].

1.3.3 Técnicas multifrecuencia

Las técnicas de multifrecuencia son ampliamente utilizadas en la evaluación no destructiva con corrientes inducidas. Se considera el uso de técnicas multifrecuencias cuando se utilizan dos o más frecuencias en la inyección, y se caracterizan porque amplían las capacidades de test de un sistema monofrecuencia y ahorran tiempo, ya que permiten tests simultáneos.

Las técnicas multifrecuencia también se utilizan para cancelar las señales no deseadas, con el fin de mejorar la relación señal a ruido en la detección de defectos [28]. Las técnicas multifrecuencia restan componentes indeseadas de la señal y minimizan sus efectos, como *lift-off*, variaciones de temperatura, y cambios geométricos en las piezas inspeccionadas [28].

También pueden encontrarse en la bibliografía trabajos de inspección multifrecuencia en el dominio espacial. En esta línea de trabajo destaco los trabajos de los autores Liu *et al.* de fusión piramidal de datos [28], y de Bartels *et al.* de aplicación de técnicas de procesado de imágenes 2-D extraídas a múltiples frecuencias [51].

1.3.4 Redes neuronales

Se han consultado diversas fuentes bibliográficas, y se han encontrado aplicaciones de redes neuronales en el campo de los ensayos de corrientes inducidas, orientados principalmente a la detección y caracterización de defectos en piezas. En el **Artículo 3 del compendio** se utilizan redes neuronales, pero orientadas a resolver el problema inverso con la clasificación de piezas por su por su composición química y/o microestructura.

Téngase en cuenta que existen diversas tipologías de redes neuronales que pueden aplicarse a la evaluación no destructiva con corrientes inducidas. Destaco las redes *Multi-Layer Perceptron* (MLP) y las de tipo *Radial Basis Function* (RBF).

Las redes MLP de la contribución tienen: (i) capa de entrada, (ii) una oculta (pudiendo ser varias), y (iii) una capa de salida con tantas neuronas como variables independientes de salida del sistema. Las neuronas de las capas ocultas y de salida tienen conexiones de la capa previa, pero no hay conexiones de neuronas de la misma capa.

Por el contrario, las redes de base radial RBF tienen siempre tres capas, como explican los autores Longoni *et al.* [52]: (i) la capa de entrada tiene neuronas que dejan pasar el patrón de entrada, (ii) la capa oculta con neuronas que se activan según las funciones de base radial alojadas, y que miden la distancia entre el patrón de entrada y el vector de pesos (centroide), y (iii) la capa de salida que realiza una combinación lineal de la salida de las neuronas de la capa oculta.

Algunas referencias que combinan redes neuronales y ensayos de corrientes inducidas se describen a continuación: Chady *et al.* estudian modelos de redes neuronales que procesan datos multifrecuencia de ensayos con corrientes inducidas, para la detección de defectología en piezas, y basados en espectrogramas [53]. Wrzuszczak *et al.* resuelven el *problema inverso*, de inferencia de defectos, por medio de redes neuronales de tipo *Multi-Layer Perceptron* (MLP), como la presentada en el **Artículo 3 del compendio**, y otra de tipo *Radial Basis Function* (RBF) [54]. Lunin *et al.* estudian un clasificador geométrico de defectos en tubos intercambiadores de calor para la industria nuclear, implementado con redes neuronales MLP que procesan datos multifrecuencia [41].

1.4 Formulación de hipótesis y objetivos

La **hipótesis general** de esta tesis es que (i) las *sondas de corrientes inducidas inductivas puras* para las aplicaciones de detección de discontinuidades y medida de espesor no conductor tienen mejor rendimiento que las *sondas con sensores de efecto Hall*, y que (ii) la fusión de técnicas de corrientes inducidas multifrecuencia y redes neuronales para la clasificación de materiales tiene, mayor tasa de acierto, menor carga computacional y menor tiempo de procesamiento de clasificación, que la fusión de técnicas monofrecuencia y redes neuronales.

Consecuente con la hipótesis general, el **objetivo general** de esta tesis es proponer: (i) sondas de corrientes inducidas para la detección de discontinuidades, y la metrología de espesor de recubrimiento no conductor, y (ii) redes neuronales para tratar los datos base mono y multifrecuencia que entregan los equipos de instrumentación de corrientes inducidas para la clasificación de materiales.

La hipótesis general se desglosa en las dos hipótesis siguientes, y permiten la definición de los objetivos específicos que se pretenden alcanzar en la tesis.

1.4.1 Hipótesis H1 y objetivos específicos

La **hipótesis H1** es que las *sondas con generación y captación inductivas* comparadas con *sondas con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*: (i) funcionan en un ancho de banda de frecuencias de inyección mayor y con una relación señal/ruido mayor, (ii) resuelven el problema inverso de caracterización de defectos con una exactitud mayor, y (iii) resuelven el problema inverso de medida de gap entre sonda y metal con una exactitud mayor.

Esta hipótesis se basa en los planteamientos de Haan *et al.*, que afirman que los sensores *Hall* son sensores de campo magnético cuyo rango dinámico, no es lo suficientemente grande para algunas aplicaciones [40], y de Novkovski que encuentra desventajas en los sensores *Hall* como la sensibilidad limitada del silicio, el alto nivel de ruido $1/f$ y el *offset* relativamente grande [55]. Por el contrario, de Haan *et al.* encuentran en las sondas inductivas puras ventajas de su amplio rango dinámico y la posibilidad de enfocar el sensor hacia la discontinuidad [40].

Con respecto al apartado (i) de la hipótesis H1, el ancho de banda y la relación señal/ruido para las aplicaciones de detección de discontinuidades en metales de las *sondas con generación y captación inductivas* pueden ser mayores que los de las *sondas con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*. Utilizando el mismo material que en el caso de discontinuidades, el análisis del ancho de banda puede orientar en ambos tipos de sondas sobre las frecuencias de trabajo para la medición de espesor no conductor basado en *lift-off*.

Con respecto al apartado (ii) de la hipótesis H1, las *sondas con generación y captación inductivas*, pueden tener exactitudes mayores que las *sondas con generación inductiva y*

captación con sensor de efecto Hall, para caracterizar discontinuidades a partir de las observaciones del equipo de corrientes inducidas (indicaciones). Al incorporar sensores comerciales *Hall* en las sondas, en lugar de sondas con bobinas realizadas a mano y con una tolerancia inherente importante, van a poder ser más repetibles, pero pueden tener menor exactitud.

Con respecto al apartado (iii) de la hipótesis H1, las *sondas con generación y captación inductivas* pueden tener exactitudes mayores que las *sondas con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall* para medir espesor. Aunque esta hipótesis ocurra, se ha de valorar la posibilidad de integrar sondas con sensor *Hall* en la compensación electrónica de ganancia en los cabezales de inspección rotatoria, y en las sondas envolventes segmentadas.

Bajo la hipótesis H1 surgen los objetivos específicos O1, O2 y O3 de la tesis, que se describen a continuación:

O1: El primer objetivo es proponer la sonda con mayor ancho de banda de funcionamiento y mayor relación señal/ruido para los trabajos de detección de discontinuidades, entre una sonda con generación y captación inductivas, y una sonda con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall. Se pretende proponer la sonda con mayor ancho de banda, en base a los diagramas de Bode de la relación señal/ruido, cuando se realiza la detección de una discontinuidad artificial del mismo diámetro. Se busca así obtener una configuración óptima de trabajo para el siguiente objetivo de detección de discontinuidades, y tener una orientación de frecuencia de trabajo para los trabajos de medición de espesor no conductor.

O2: El segundo objetivo es proponer la sonda más adecuada para los trabajos de resolución del problema inverso de discontinuidades de distintos diámetros, entre una sonda con generación y captación inductivas, y una sonda con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall. Se pretende proponer la sonda más adecuada para resolver el problema inverso, analizando la capacidad de clasificar un juego de probetas en aluminio con discontinuidades graduadas, a partir de las indicaciones obtenidas en el equipo de corrientes inducidas.

O3: El tercer objetivo es proponer la sonda más adecuada para los trabajos de resolución del problema inverso de medición de espesor no conductor sobre aluminio, entre una sonda con generación y captación inductivas, y una sonda con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall. Se pretende proponer la sonda más adecuada para resolver el problema inverso, analizando la capacidad de medir espesor no conductor entre sondas y una placa de aluminio, a partir de las indicaciones obtenidas en el equipo de corrientes inducidas.

1.4.2 Hipótesis H2 y objetivos específicos

Las redes neuronales pueden considerarse algoritmos inteligentes de tratamiento de los datos base que entregan los equipos de instrumentación de corrientes inducidas para la clasificación de materiales. Se puede evaluar si las redes neuronales artificiales de tipo Perceptrón Multicapa (*Multilayer Perceptron, MLP*) pueden integrarse en los equipos de instrumentación de corrientes inducidas como algoritmos avanzados, para implementar clasificadores automáticos rápidos de piezas de acero por su tratamiento térmico (terminología de *sorting* de piezas según la bibliografía).

La **hipótesis H2** es que, las redes MLP entrenadas que procesan impedancias multifrecuencia para clasificar piezas de acero por su tratamiento térmico, comparadas con las que procesan impedancias monofrecuencia: (i) ofrecen mejor tasa de acierto, y con igual o mejor tasa de acierto, tienen (ii) menor carga computacional, y (iii) menor tiempo de ejecución promedio.

Esta hipótesis se basa en los planteamientos de Chady et al. [53], Wrzuszczak et al. [54] y de Lunin et al. [41], acerca de que las redes neuronales con técnicas multifrecuencia son prometedoras para resolver el problema inverso, o lo pueden hacer con una precisión adecuada, o con un planteamiento modular pueden dar solución a una caracterización compleja. Sin embargo, todas estas publicaciones científicas encontradas se orientan al problema de inferir el tipo y tamaño de defectos en base a las observaciones, y no a la clasificación de piezas por su tratamiento térmico.

Con respecto al apartado (i) de la hipótesis H2, las tasas de acierto binarias de una red neuronal que procesa dos impedancias simultáneas (X_{f_1}, Y_{f_1}) y (X_{f_2}, Y_{f_2}) en modo multifrecuencia, con 4 entradas, puede que sean siempre mejores que las de las redes monofrecuencia con 2 entradas $(X_{f_1/f_2}, Y_{f_1/f_2})$. Sin embargo, incrementando la complejidad interna de las redes, es decir, el número de neuronas de la capa oculta, podría llegar a ocurrir, que una red con procesado monofrecuencia supere a una red con procesado multifrecuencia, con relativamente muy pocas neuronas ocultas.

Con respecto al apartado (ii) de la hipótesis H2, las redes MLP con procesado multifrecuencia con 4 entradas (X_{f_1}, Y_{f_1}) y (X_{f_2}, Y_{f_2}) y con igual o mejor tasa de acierto, pueden llegar a tener una carga computacional menor que las redes MLP entrenadas que procesan impedancias monofrecuencia $(X_{f_1/f_2}, Y_{f_1/f_2})$. Muy posiblemente, al tener mayor información de las piezas de ensayo, las redes neuronales van a poder ser internamente más sencillas, con menor número de neuronas en la capa oculta.

Con respecto al apartado (iii) de la hipótesis H2, las redes MLP con procesado multifrecuencia con 4 entradas (X_{f_1}, Y_{f_1}) y (X_{f_2}, Y_{f_2}) y con igual o mejor tasa de acierto, pueden llegar a tener tiempos promedio de clasificación menores que las redes MLP entrenadas que procesan impedancias monofrecuencia $(X_{f_1/f_2}, Y_{f_1/f_2})$. Además, los tiempos promedio de clasificación han de estar correlados con el número de operaciones determinado en la carga computacional. Por último, con la capacidad de cómputo actual

y con redes neuronales MLP relativamente sencillas como clasificadores de piezas, ha de ser viable el procesamiento multifrecuencia de impedancias de corrientes inducidas, en una planta industrial que fabrica y verifica piezas con tasa de al menos una por segundo.

Bajo la hipótesis H2 surgen los objetivos específicos O4, O5 y O6 de la tesis que se describen a continuación:

O4: El cuarto objetivo es proponer la red neuronal óptima en términos de tasa de acierto, para clasificar automáticamente piezas de acero por su tratamiento térmico, entre redes con complejidad interna variable que procesan impedancias en modos mono y multifrecuencia. Se pretende encontrar la red neuronal óptima con mejor tasa de acierto binaria de clasificación de piezas, a partir del conocimiento a priori de su tratamiento térmico. Se pretende optimizar la red, variando la complejidad interna de la red, modificando el número de neuronas de la capa oculta.

O5: El quinto objetivo es proponer la red neuronal óptima en términos de la carga computacional, para clasificar automáticamente piezas de acero por su tratamiento térmico, entre redes con complejidad interna variable que procesan impedancias en modos mono y multifrecuencia. Se pretende proponer la red que menor número de operaciones matemáticas teóricas realiza, desglosado en sumas, productos y cálculos de la función de activación de las neuronas de las redes MLP.

O6: El sexto objetivo es proponer la red neuronal óptima en términos del tiempo de ejecución, para clasificar automáticamente piezas de acero por su tratamiento térmico, entre redes con complejidad interna variable que procesan impedancias en modos mono y multifrecuencia. Se pretende evaluar en la red propuesta, la idoneidad de su utilización como clasificadores de piezas en entornos industriales reales. Se pretende también, analizar si en la red propuesta, los tiempos promedio de clasificación son proporcionales con el número de operaciones determinado en la carga computacional. También se pretende poder extrapolar si el recuento de operaciones matemáticas realizado, permite predecir de manera relativa, pues depende de los recursos hardware/software empleados, los tiempos de ejecución de las redes neuronales implementadas.

1.4.3 Relaciones entre hipótesis y objetivos

En la Figura 11 se muestra un esquema de las relaciones entre la hipótesis general y el objetivo general, entre las dos hipótesis H1 y H2 y entre los objetivos específicos que se pretenden alcanzar en la tesis.

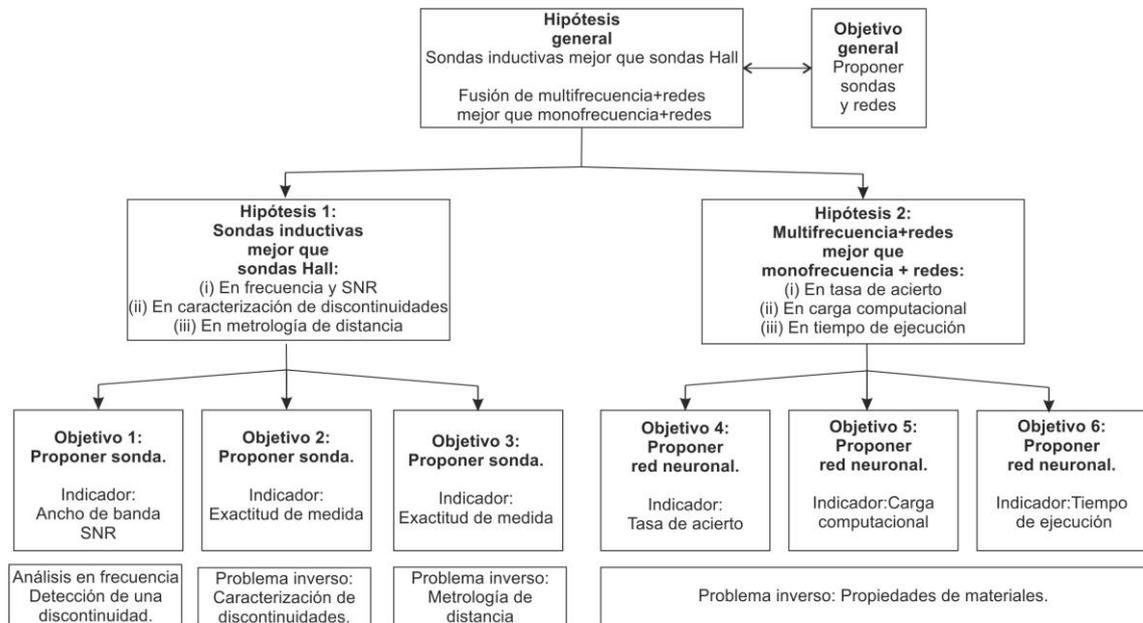


Figura 11. Esquema de relaciones entre hipótesis y objetivos de la tesis.

Los objetivos **O1-O3** entre sí están relacionados porque pretenden proponer sondas de dos tipos para aplicaciones diversas. De manera similar, los objetivos **O4-O6** entre sí están relacionados porque pretenden proponer redes neuronales en función de distintos parámetros de *benchmarking*. A su vez, los grupos de objetivos **O1-O3** y **O4-O6** están relacionados entre sí. Los objetivos **O4-O6** tratan de proponer redes neuronales que postprocesan los datos base mono/multifrecuencia que entregan los equipos de instrumentación. Estos datos proceden de la interacción sonda-pieza, y podemos encontrarnos en la cadena de señal alguna sonda inductiva o con sensor de efecto *Hall*, como las que se pretenden proponer en los objetivos **O1-O3**.

1.5 Materiales

En este apartado se describen tanto el hardware como el software utilizados en la presente tesis doctoral. A continuación, se detallan los medios bibliográficos utilizados y los entornos de trabajo en los que se han realizado los trabajos de investigación.

1.5.1 Hardware

1.5.1.1 Ordenadores

Para la elaboración de esta tesis se han utilizado los siguientes equipos informáticos:

- Un ordenador portátil de propósito general, con un procesador Intel Core 2 Duo T5670 @1.8 GHz y una memoria RAM de 3 GB, para la adquisición, el post-procesado de datos y la representación de resultados de los **Artículos 1 y 2 del compendio**.
- Un ordenador portátil de propósito general, con un procesador Intel Core i3 M350 @2.27 GHz y una memoria RAM de 4 GB, para implementar las tres redes neuronales de clasificación de piezas que se comparan en el **Artículo 3 del compendio**.

1.5.1.2 Componentes electrónicos

Para la fabricación de las sondas utilizadas en los ensayos NDT de corrientes inducidas, se han utilizado los siguientes componentes electrónicos:

- Componentes activos: sensores de efecto *Hall* del fabricante *Honeywell* modelo S SS94A1.
- Componentes pasivos: ferritas cilíndricas de los fabricantes *Epcos* y *Ferroxcube*, hilo esmaltado de diferentes diámetros, juego de resistencias axiales de 250mW y SMD en formato 1206, juego de condensadores SMD en formato 0805 y 1206, conectores LEMO y plástico para mecanizado POM para la elaboración de las carcasas de las sondas diseñadas.

1.5.1.3 Banco de pruebas

Banco de pruebas proporcionado por ISEND para ensayos consistente en:

- Un equipo de instrumentación electrónico de inspección de corrientes inducidas *FOCAnalyzer*® con PC integrado, de un canal, con modos de operación doble función y funciones separadas; y modos absoluto y diferencial. Con amplio rango de frecuencias (1 Hz a 10 MHz), posibilidad de alarmas cuadradas, circulares, sectoriales, mixtas y creadas por el usuario, y con posibilidad de configuración de numerosos tipos de filtros digitales. Con control integrado de 4 entradas/salidas digitales y 2 canales de encoders.

- Utillaje necesario para la realización de los ensayos: cableado de sondas y base magnética para fijación.
- Calibre digital electrónico.

1.5.1.4 Instrumentación de medida

Instrumentación de medida proporcionada por ISEND para el desarrollo y prueba de las sondas de la tesis:

- Medidor LCR *Agilent* 4263B.
- Generador de ondas *Tektronix* AFG 3102.
- Osciloscopio *Tektronix* TDS1012B.
- Multímetro *Fluke* 179.
- Fuente de alimentación *Grelco* GVD 305 SF.

1.5.1.5 Sondas de corrientes inducidas

Se han diseñado, fabricado y testeado la *Sonda 1 tipo palpador con generación y captación inductivas*, y la *Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*, cuya comparativa se ha publicado en el **Artículo 2 del compendio**. Los esquemas y fotografías de las mismas se muestran respectivamente, en la Figura 12 y en la Figura 13.

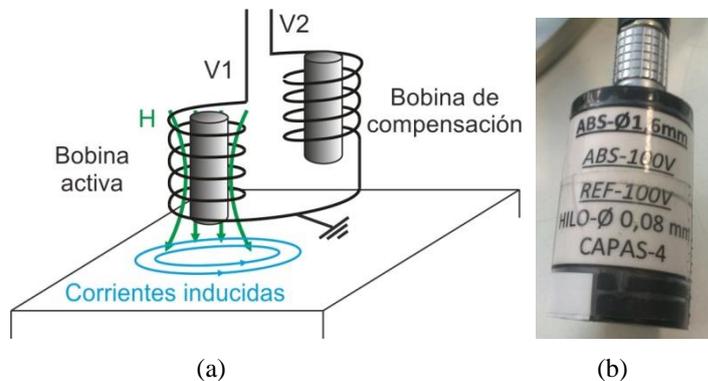


Figura 12. (a) Esquema y (b) fotografía de la *Sonda 1 con generación y captación inductivas* utilizada en el Artículo 2 del compendio.

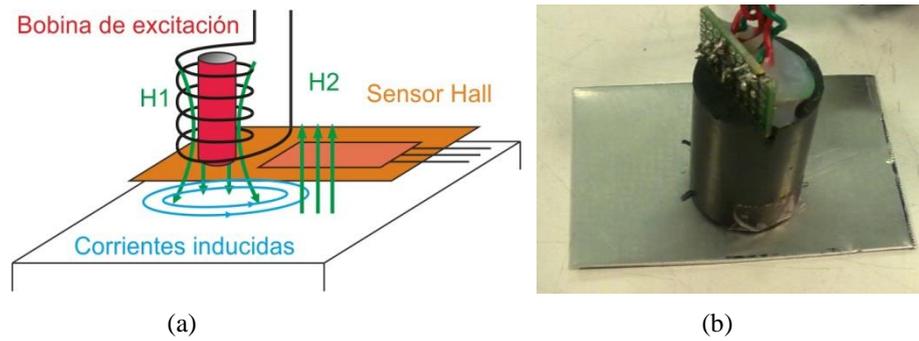


Figura 13. (a) Esquema y (b) fotografía de la Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall utilizada en el Artículo 2 del compendio.

La Sonda 1 está formada por una bobina activa, cuyo eje es perpendicular a la superficie de inspección, y una bobina de compensación, ambas con núcleo de ferrita, 4 capas y 100 vueltas e hilo de 0.08mm diámetro.

En la Tabla I se indican las medidas de resistencia e inductancia de las bobinas activa y de compensación de la Sonda 1 a 0.1 kHz, 0.12 kHz, a 1 kHz, a 10 kHz, y a 100 kHz y las derivas entre ellas. Téngase en cuenta que ambas bobinas tienen los mismos parámetros, por lo que las derivas se deben a tolerancias de los elementos y a la propia fabricación.

| Sonda 1: bobina activa | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| Frecuencia (kHz) | 0.1 | 0.12 | 1 | 10 | 100 |
| L (μ H) | 69 | 67 | 61.44 | 61.339 | 61.551 |
| XL (Ω) | 0.043 | 0.051 | 0.39 | 3.85 | 38.67 |
| R (Ω) | 3.0885 | 3.0887 | 3.0887 | 3.0887 | 3.0889 |
| Z (Ω) | 3.09 | 3.09 | 3.11 | 4.94 | 38.80 |
| Sonda 1: bobina de compensación | | | | | |
| Frecuencia (kHz) | 0.1 | 0.12 | 1 | 10 | 100 |
| L (μ H) | 69 | 67.1 | 61.76 | 61.648 | 61.864 |
| XL (Ω) | 0.043 | 0.051 | 0.39 | 3.87 | 38.87 |
| R (Ω) | 3.2608 | 3.2609 | 3.2607 | 3.2606 | 3.2606 |
| Z (Ω) | 3.26 | 3.26 | 3.28 | 5.06 | 39.01 |
| Derivas: bobina de compensación respecto bobina activa | | | | | |
| Variación relativa R (%) | 5.58% | 5.58% | 5.57% | 5.57% | 5.56% |
| Variación relativa L (%) | 0.00% | 0.15% | 0.52% | 0.50% | 0.51% |

Tabla I. Medidas de resistencia e inductancia de las bobinas activa y de compensación de la Sonda 1. Derivas de la bobina de compensación respecto a la bobina activa

La Sonda 2 está formada por una bobina de excitación que opera como generadora de campo alterno, cuyo eje es perpendicular a la superficie de inspección, con núcleo de ferrita, 4 capas y 100 vueltas e hilo de 0.08mm diámetro. El elemento captador de campo es un sensor *Honeywell S SS94A1* con sensibilidad 5mV/G y deriva de temperatura inferior a 0.02 %/K. La tensión de polarización utilizada fue 8 V, el cual fijó un rango

lineal de funcionamiento entre 1.5 V para inducciones de -500 G y 6.5 V para inducciones de +500 G. Se utilizó un puente de Wheatstone resistivo con resistencias de 100 Ω para compensar el *offset* de voltaje del sensor *Hall*.

En la Tabla II se indican las medidas de resistencia e inductancia de la bobina de excitación de la Sonda 2 a 0.1 kHz, 0.12 kHz, a 1 kHz, a 10 kHz, y a 100 kHz. Se incluyen las derivas de resistencia e inductancia respecto de la bobina activa de la Sonda 1, puesto que ambas son las encargadas de la generación del campo. Téngase en cuenta que esta bobina tiene los mismos parámetros que la bobina activa y de compensación de la Sonda 1, con el objetivo de que las generaciones de campo sean similares.

| Sonda 2: bobina de excitación | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| Frecuencia (kHz) | 0.1 | 0.12 | 1 | 10 | 100 |
| L (μ H) | 70.3 | 68.5 | 63.16 | 63.056 | 63.032 |
| XL (Ω) | 0.044 | 0.052 | 0.40 | 3.963 | 39.60 |
| R (Ω) | 3.3456 | 3.3112 | 3.2611 | 3.2748 | 3.2627 |
| Z (Ω) | 3.35 | 3.31 | 3.29 | 5.14 | 39.74 |
| Derivas: bobina de excitación respecto bobina activa de Sonda 1 | | | | | |
| Variación relativa R (%) | 8.32% | 7.20% | 5.58% | 6.03% | 5.63% |
| Variación relativa L (%) | 1.88% | 2.24% | 2.80% | 2.80% | 2.41% |

Tabla II. Medidas de resistencia e inductancia de la bobina de excitación de la Sonda 2 y derivas R, L de la bobina de excitación de la Sonda 2 respecto bobina activa de Sonda 1

También se ha diseñado, fabricado y testeado la *Sonda 3 de tipo palpador, con generación y captación inductiva, axial, absoluta y de baja frecuencia*, para la clasificación de piezas de acero por su tratamiento térmico, cuyos resultados se han presentado en el **Artículo 3 del compendio** (Figura 14).

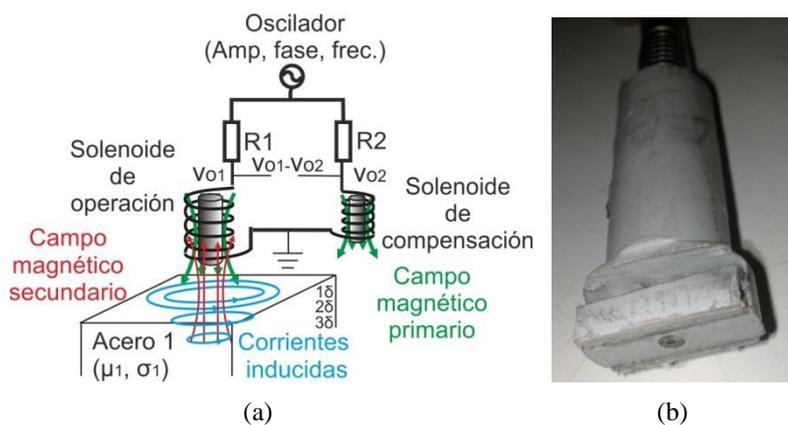


Figura 14. (a) Esquema y (b) fotografía de la *Sonda 3 de tipo palpador, con generación y captación inductiva, axial, absoluta y de baja frecuencia* utilizada en el **Artículo 3 del compendio**.

La *Sonda 3* está formada por una bobina activa, cuyo eje es perpendicular a la superficie de inspección, y una bobina de compensación, ambas con núcleo de ferrita y con mayor permeabilidad que de las *Sondas 1* y *2*, 100 vueltas, 4 capas y e hilo de 0.08mm

diámetro. Se dispone del dato de medida de inductancia de 2.1199mH a 100kHz de la bobina activa.

1.5.1.6 Probetas

Placas de aluminio de 1.6 mm de espesor, con escala graduada de discontinuidades artificiales de 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5 mm en el centro, utilizadas en el **Artículo 2 del compendio**.

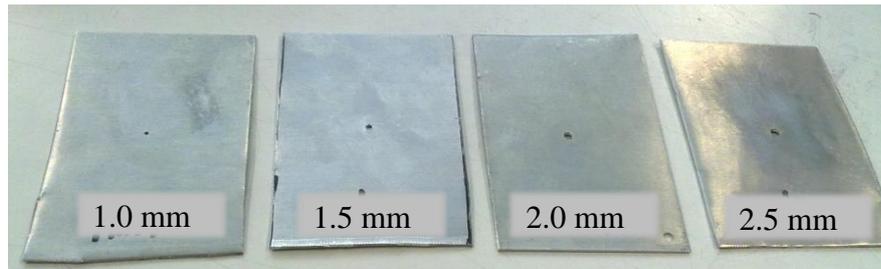


Figura 15. Placas de aluminio de 1.6 mm de espesor con taladros de 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5 mm utilizadas en el **Artículo 2 del compendio**.

Levas de acero UNE F-1310 (DIN 100Cr6) utilizadas en el **Artículo 3 del compendio**. Se distinguen dos grupos de piezas: (i) 4 levas forjadas con enfriamiento rápido y correcto para ser montadas en árboles de levas de motores de automóviles, con microestructura predominante martensítica y bainítica, y dureza aceptable >55HRC; (ii) 4 levas no correctas para su montaje, enfriadas más lentamente que las primeras, con microestructura predominante de perlita y algo de bainita, y con dureza inferior al valor mínimo aceptable <45HRC. Para ampliación de conocimientos de las fases del acero en función de la temperatura y la composición de carbono, el lector puede consultar un *diagrama de Hierro-Carbono*. Así mismo, para conocer la microestructura final de la austenita en función del ciclo térmico temporal, el lector puede consultar las *curvas temperatura-tiempo-transformación TTT* (o *curvas S*).



Figura 16. Juego de levas 1, 2, 3, 4 forjadas con enfriamiento rápido (50%) y juego de levas 5,6,7,8 forjadas con enfriamiento lento (50%), utilizadas en el **Artículo 3 del compendio**.

La composición de las levas de acero UNE F-1310 del ensayo es C 1.00 %-Mn 0.30 %, Si 0.23 %, Cr 1.60. El sometimiento a un tratamiento térmico adecuado las confiere gran dureza (HRC=60-62), poca ductilidad, gran resistencia al desgaste, y a la fatiga. El proceso de enfriamiento en aceite al que están sometidas es crítico para alcanzar las propiedades deseadas, y para evitar la descarburación superficial. Algunas medidas para evitar la descarburación son calentar las piezas en: hornos de atmósfera controlada, en baño de sales neutra o/y en hornos de vacío.

1.5.2 Software

1.5.2.1 Entorno de desarrollo Matlab

El entorno de programación para los cálculos de los **Artículos 2 y 3 del compendio** ha sido *Matlab 2009a* con el *Neural Network Toolbox*.

1.5.2.2 Software del equipo de corrientes inducidas

Se ha utilizado el software del equipo de instrumentación *FOCAnalyzer* en su versión *99a* desarrollado por ISEND para el control del equipo de corrientes inducidas y extracción de datos de los ensayos.

1.5.2.3 Herramientas ofimáticas

Para la elaboración de documentación, tablas de datos, procesado de datos, etc. se ha utilizado herramientas ofimáticas de *Microsoft Word, Excel y Visio 2010*.

Para la elaboración de esquemas se ha utilizado *CorelDRAW X7*.

Para la gestión de referencias se ha utilizado *Endnote X4*.

Adicionalmente, se ha utilizado Internet para la consulta de información como el acceso a bases de datos y repositorios digitales de documentación científica y de divulgación.

1.5.3 Medios bibliográficos

Los medios bibliográficos más relevantes empleados en la tesis son los que se indican a continuación:

- Fondos bibliográficos de la Universidad de Valladolid.
- Repositorios digitales de revistas científicas y bases de datos a través de la plataforma de la Biblioteca de la Universidad de Valladolid. Algunas de las más relevantes son las revistas electrónicas obtenidas de *IEEEExplore* o *ScienceDirect*, y las bases de datos *Web of Science (WOS)* y *Scopus*.

1.5.4 Entornos de trabajo

El doctorando ha compaginado su trabajo de investigación en la Universidad de Valladolid, con el trabajo y la investigación en el sector privado.

El trabajo de investigación en la Universidad de Valladolid, ha sido realizado dentro del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática de la E.T.S.I. de Telecomunicación y dirigido por Jaime Gómez Gil. Gracias a los medios bibliográficos de la Universidad se ha podido realizar el estudio del arte de la tecnología NDT de corrientes inducidas, el cual ha sido el punto de partida en la presente tesis doctoral. Los resultados del estudio del estado del arte además se han publicado en el **Artículo 1 del compendio**.

El trabajo de investigación en el sector privado ha sido realizado dentro de la empresa Ingeniería y Sistemas de Ensayos no Destructivos S. A. (ISEND). La Empresa está ubicada en el Parque Tecnológico de Boecillo (Valladolid), y es actualmente uno de los pocos fabricantes a nivel mundial de todo el equipamiento necesario para la inspección con corrientes inducidas del sector del metal, tanto de producto semiacabado como alambrón, barra, pletina, perfiles, barra calibrada y tubo, como de producto acabado. El ejercicio profesional del doctorando en ISEND ha permitido conocer en profundidad la tecnología, conocer la problemática actual de clientes del sector fabril nacionales e internacionales, detectar líneas abiertas de investigación y acceder a los recursos necesarios para la realización de los ensayos NDT que se presentan en los **Artículos 2 y 3 del compendio**.

1.6 Metodología

En esta sección se describe la metodología seguida para la realización de la tesis. La metodología seguida consta de las etapas que se indican en la Figura 17:

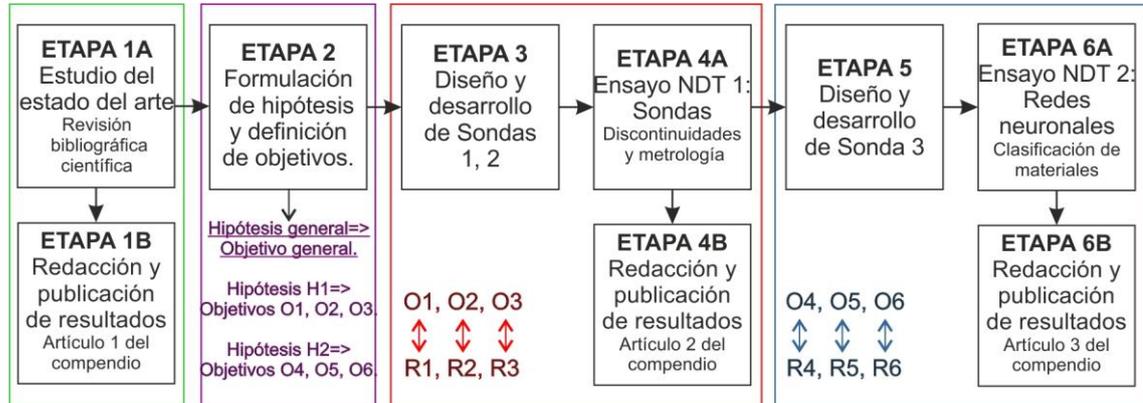


Figura 17: Metodología seguida para la realización de los trabajos de investigación de esta tesis y relación de etapas con hipótesis, objetivos específicos O1-O6 y resultados R1-R6

En las Etapas 1A y 1B se ha realizado el estudio de estado del arte y la publicación del **Artículo 1 del compendio**. En la Etapa 2 se han definido las hipótesis y los objetivos de la tesis.

En la Etapa 3 se han diseñado y desarrollado las Sondas 1 y 2 de corrientes inducidas para la detección de discontinuidades y medidas de espesor. En la Etapa 4A y 4B se ha realizado el ensayo NDT con corrientes inducidas 1, cuya temática son sondas, y se ha publicado el **Artículo 2 del compendio**. Las etapas 3, 4A y 4B han permitido cumplir los objetivos específicos O1, O2 y O3 de la tesis.

En la Etapa 5 se ha diseñado y desarrollado la Sonda 3 para la clasificación de piezas de acero por su tratamiento térmico. En las Etapas 6A y 6B se ha realizado el ensayo NDT con corrientes inducidas 2, cuya temática son redes neuronales y técnicas multifrecuencia, y se ha publicado el **Artículo 3 del compendio**. Las etapas 5, 6A y 6B han permitido cumplir los objetivos específicos O4, O5 y O6 de la tesis.

A continuación, se describen en detalle las etapas de la metodología seguida en esta tesis:

1.6.1 Etapa 1A: Estudio del estado del arte

Se ha realizado la revisión bibliográfica de libros de referencia y revistas de impacto sobre técnicas no destructivas NDT de las categorías *Physics, Applied; Engineering, Electrical & Electronic; Materials Science, Characterization & Testing, e Instruments & Instrumentation*.

Se ha realizado un análisis general de las técnicas NDT basadas en corrientes inducidas, para evaluar su situación, los fundamentos y las variables principales que

intervienen en los ensayos. Posteriormente, se ha hecho una búsqueda y un análisis más específico, centrándose en las sondas y sensores empleados, y en los equipos de instrumentación actuales. Finalmente, se ha particularizado esta búsqueda en los métodos de postprocesado de señal, aplicaciones y las tendencias de investigación en este ámbito.

Una vez realizada una revisión general de los trabajos de investigación científicos publicados, en primer lugar, se han analizado publicaciones científicas específicas y recientes, orientadas al estudio de las técnicas de NDT de corrientes inducidas y sensores alternativos a los sensores inductivos: los sensores de efecto *Hall* y los sensores magnetorresistivos. En segundo lugar, se han abordado las técnicas de implementación de clasificadores de piezas con corrientes inducidas, que integran redes neuronales como algoritmos de procesamiento.

Con todos estos trabajos de estudio del estado del arte de las técnicas NDT de corrientes inducidas, se ha alcanzado un conocimiento profundo del estado de la tecnología, de las tendencias actuales de las líneas de investigación, y ha sido un punto de partida imprescindible para continuar con los trabajos de esta tesis.

1.6.2 Etapa 2: Formulación de hipótesis y definición de los objetivos

Se ha formulado la hipótesis general y el objetivo general de la tesis. La hipótesis general se ha desglosado en dos hipótesis, la primera relacionada con sondas y la segunda con algoritmos de postprocesado de datos. Cada una de estas dos hipótesis, han permitido definir 3 y 3 objetivos específicos que se pretenden alcanzar en la tesis. Los objetivos específicos se han ido alcanzando con la realización de los diferentes trabajos de investigación de la tesis.

1.6.3 Etapa 3: Diseño y desarrollo de la Sonda 1 y 2 de corrientes inducidas: Detección de discontinuidades y medidas de espesor

Se ha diseñado la *Sonda 1 palpador con generación y captación inductivas*, y la *Sonda 2 palpador con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*, que se utilizan en el **Artículo 2 del compendio**. Estas sondas se han utilizado para la detección de discontinuidades y medidas de espesor no conductor sobre aluminio. El diseño y desarrollo de sondas de corrientes inducidas se ha estructurado en las siguientes etapas:

En el diseño de las sondas se ha tenido en cuenta que el material de ensayo ha sido aluminio, con alta conductividad eléctrica y sin propiedades magnéticas importantes. También se ha tenido en cuenta que la aplicación de estas sondas ha sido dual: discontinuidades y metrología de espesor. Como las discontinuidades que se pretendían detectar estaban presentes en la superficie del aluminio, no ha sido necesario recurrir a frecuencias bajas (<1 kHz), donde el ancho de banda y la sensibilidad se reduce significativamente, sino que se ha recurrido a frecuencias medias en la banda 10 kHz-

1000 kHz. Esta banda de frecuencias ha sido compatible con las aplicaciones de metrología de espesor no conductor.

En el caso de la *Sonda 1 con generación y captación inductivas*, se ha tomado la decisión de diseñar una sonda inductiva de tipo doble función, con una bobina activa y una bobina de compensación con núcleo de ferrita de diámetro 1.6 mm. Se ha tomado la decisión de diseñar una sonda absoluta, válida en la mayoría de aplicaciones de aeronáutica, y comparable con la *Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*. La compensación se ha incluido para el incremento del rango dinámico.

En el caso de la *Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*, se ha diseñado la bobina del primario y se ha calculado el campo magnético secundario inducido $B_{eddy_currents}$ de las corrientes de Foucault, para determinar la validez del sensor de efecto *Hall* elegido. Además, se ha asegurado que la variación del voltaje *Hall* alcanzara al menos el 1 % del rango de medición de la escala completa del conversor analógico/digital (*Analog to Digital Converter*, ADC) presente en el equipo de instrumentación.

Se han definido unos valores de inductancia y resistencia objetivos de las bobinas, de modo que el nivel de campo magnético alterno fuera significativo a las frecuencias de trabajo 10 kHz-1000 kHz. Simultáneamente se ha buscado la mejor adaptación de impedancias con el equipo de corrientes inducidas, para optimizar la transferencia de potencia.

Se han realizado cálculos basados en las *ecuaciones de Maxwell* en materiales, para conocer la potencia disipada P_{dis} por el flujo de las corrientes de Foucault en el seno del material. El resultado se ha comparado con la potencia disipada por el solenoide al aire P_{dis_0} , con el fin de obtener la sensibilidad suficiente. Para ello se ha calculado el ratio $R = P_{dis}/P_{dis_0}$.

Se han sintetizado los valores de inductancia y resistencia, se han fabricado las bobinas, se han montado en los respectivos cuerpos de las sondas y se han conectorizado, para su conexión al equipo de corrientes inducidas por medio de cables específicos apantallados.

1.6.4 Etapa 4A: Ensayo NDT con corrientes inducidas 1: discontinuidades y metrología de espesor no conductor

Se ha realizado un ensayo cuya metodología se ha dividido en tres pasos. Inicialmente, se han caracterizado y se han comparado frecuentemente la *Sonda 1 con generación y captación inductivas* y la *Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*. Después se han realizado ensayos de detección de discontinuidades, y finalmente se han realizado ensayos de metrología de espesor de recubrimiento no conductor sobre aluminio. A continuación, se desglosan cada una de las partes:

1.6.4.1 Caracterización frecuencial de las sondas diseñadas

Para la caracterización en frecuencia de las sondas diseñadas, se ha detectado un agujero de 2.5 mm de diámetro en una placa de aluminio con espesor 1.6 mm. Se ha medido la amplitud de pico *Peak response (f)* y el ruido de la señal promedio *Average noise (f)*, y se han calculado los valores de señal/ruido en decibelios (*signal to noise ratio* SNR) según la Ecuación (4):

$$SNR (dB) = 20 \cdot \log \left(\frac{Peak\ response\ (f)}{Average\ noise\ (f)} \right) \quad (4)$$

1.6.4.2 Ensayos de detección de discontinuidades

Para la realización de ensayos de detección de discontinuidades se han utilizado cuatro placas de aluminio con el mismo espesor 1.6 mm, que tenían cuatro agujeros de diámetros de 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5 mm. Se ha medido la respuesta al defecto *Peak response (hole_diameter)* y la amplitud de ruido de fondo *Average noise* de ambas sondas variando el diámetro, y, a continuación, se han calculado los valores de señal/ruido SNR en decibelios siguiendo la Ecuación (5):

$$SNR (dB) = 20 \cdot \log \left(\frac{Peak\ response\ (hole_diameter)}{Average\ noise} \right) \quad (5)$$

Finalmente, se han calculado un interpolador lineal de mínimos cuadrados con la *Sonda 1 con generación y captación inductiva*, y un interpolador lineal y otro exponencial con la *Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor Hall*. Se ha realizado el análisis de la exactitud de los interpoladores calculados, enfrentándose al problema inverso de predecir diámetro de la discontinuidad en base a la observación de señal/ruido.

1.6.4.3 Ensayos de metrología de espesor de recubrimiento no conductor

Para la realización de ensayos de metrología de espesor de recubrimiento no conductor sobre aluminio, se ha cuantificado la sensibilidad de la medición de espesores y se ha comparado entre ambas sondas. Las mediciones se han basado en el parámetro *lift-off*, que es la distancia entre la sonda y la superficie conductora de la pieza de ensayo. Se han colocado capas no conductoras con espesor de 0.1 mm apiladas, entre una placa de aluminio de 1.6 mm de espesor sin discontinuidades y las sondas.

Se han tomado las coordenadas del plano de impedancia variando el número de capas $Z_i = (X_i, Y_i)$ con $i = 0, \dots, 16$. Después se ha calculado para cada número de capas i apiladas, la distancia euclídea de ambas sondas $|Z_i - Z_0|$ en el plano de impedancia como indica la Ecuación (6):

$$|Z_i - Z_0| = \sqrt{(X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2}; \quad i = 1 \dots N \quad (6)$$

Se ha calculado la sensibilidad de las sondas *Sensibilidad_dist* a la medida de distancia de recubrimiento no conductor sobre aluminio. El cálculo en escala logarítmica se ha referenciado al punto de contacto $|Z_0|$ como muestra la Ecuación (7):

$$Sensibilidad_dist (dB) = 20 \cdot \log \left(\frac{|Z_i - Z_0|}{|Z_0|} \right) \quad (7)$$

Finalmente, se ha resuelto el problema inverso de estimación de medida de espesor, calculando con el juego de datos de ajuste presentado en el **Artículo 2 del compendio**, un interpolador lineal de mínimos cuadrados con la *Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor Hall*, y un interpolador polinómico de orden 3 con la *Sonda 1 con generación y captación inductiva*. Después, con otro juego de muestras distinto al del ajuste, se ha realizado el análisis de la exactitud de la medida respecto al valor real conocido, la precisión o repetitividad de las medidas, y las incertidumbres de resolución del equipo digital de instrumentación.

Las incertidumbres se han calculado a partir del inverso de la pendiente de la función $f = \text{Amplitud (espesor)}$, publicada en el **Artículo 2 del compendio**. En los tramos intermedios 0.3-0.7mm y 1.0-1.5mm, se ha calculado la incertidumbre promediada entre los extremos conocidos utilizando que la tendencia es monótona. De manera general, el espesor se expresa como la predicción \pm incertidumbre.

1.6.5 Etapa 5: Diseño y desarrollo de la Sonda 3 para la clasificación de piezas de acero por su tratamiento térmico

Se ha diseñado la *Sonda 3* para la clasificación de piezas de acero por su tratamiento térmico, cuyos resultados se presentan en el **Artículo 3 del compendio**. Existen decisiones de diseño de la *Sonda 3* derivadas del diseño de las *Sondas 1 y 2* y del ensayo 1 cuyos resultados se han publicado en el **Artículo 2 del compendio**, las cuales se indican a continuación:

La primera decisión ha tenido que ver con el flujo generado de corrientes eddy. Las sondas palpador crean un flujo de corrientes concéntrico en planos paralelos a la superficie, que ha sido adecuado para detectar agujeros en aluminio y para medir distancia por *lift-off*, como se ha realizado en el **ensayo 1**. Para clasificar materiales por su tratamiento como en el **ensayo 2**, es decir para medir conductividad/permeabilidad en materiales el flujo concéntrico también es adecuado. Como ha sido favorable la ferrita en el núcleo de las bobinas del **ensayo 1** para aumentar la generación de campo en las inmediaciones, se ha mantenido para la *Sonda 3*.

La segunda decisión de diseño ha sido elegir el tipo de magnetómetro para capturar el campo de las corrientes inducidas. Como a partir de los resultados del **ensayo 1** se han propuesto bobinas para la captación, se ha mantenido el criterio de diseñar la sonda 3 del **ensayo 2** de tipo inductiva pura. En estos ensayos la propia bobina que genera el campo se ve alterada por el flujo de corrientes, ya que la sonda funciona en modo doble función.

La tercera decisión de diseño de la *Sonda 3* ha sido fijar la banda 1 - 100 kHz como frecuencias de trabajo para discriminar acero UNE F-1310 con distintos tratamientos térmicos, con conductividad eléctrica media y con propiedades magnéticas importantes. Empíricamente a 50kHz y 100kHz se ha obtenido mayor diferencia de impedancias entre piezas con tratamientos distintos. No se ha cumplido la recomendación de la banda de trabajo de la AEND de 1-500Hz de la Figura 8. Con 50kHz se logra una profundidad de penetración estándar de 54.04micras y con 100kHz de 32.41micras. Estas frecuencias de trabajo superficiales son adecuadas suponiendo que las piezas tratadas térmicamente lo están de forma homogénea en todo el volumen. Si la descarburización superficial hubiera sido importante, habría que haber bajado la frecuencia para superar esta capa. La frecuencia óptima de trabajo para detectar discontinuidades pasantes en aluminio con la *Sonda 1* del **ensayo 1** ha sido 100kHz, con una profundidad de penetración de 300micras, en un material con conductividad eléctrica alta y con propiedades magnéticas imperceptibles. Por lo tanto, se repiten frecuencias de trabajo.

La cuarta decisión de diseño ha sido mantener en la *Sonda 3* la bobina de compensación en una rama de un puente de *Wheatstone* utilizada en la Sonda 1 del ensayo. De esta manera se ha logrado el equilibrio del sistema en el punto de aire. Además, la bobina de compensación ha aportado inmunidad al sistema, al estar afectada por las mismas variables nocivas que afectan a la bobina generadora que está en contacto con las piezas, como variaciones de temperatura de la sonda, ruido térmico inherente y captación de ruido eléctrico radiado.

La quinta decisión de diseño ha sido definir unos valores de inductancia y resistencia objetivos de las bobinas de la Sonda 3, de modo que el nivel de potencia magnética alterna Q fuera significativa a las frecuencias de diseño la banda 1 - 100 kHz y se tuviera buena adaptación de impedancias con el equipo de corrientes inducidas. La resistencia del solenoide implica efectos disipativos y es preferible minimizarlos. De manera típica, su valor viene impuesto por la resistencia del hilo utilizado. El diámetro del hilo no puede ser todo lo grande que se desee, pues hay unas dimensiones físicas para bobinar un número determinado de vueltas. También juega en contra la relación de aspecto de las dimensiones de las sondas y el tamaño del defecto que se quiere detectar. Interesa tener una L adecuada para generar el nivel de corrientes inducidas adecuado, y en el caso de que también una misma bobina se encargue de recibir el campo de las corrientes Eddy, interesa que sea capaz de generar una señal de voltaje por encima del nivel de ruido de la cadena de señal del equipo de instrumentación.

Tomadas todas las decisiones de diseño, se han fabricado las bobinas sintetizado los valores de inductancia y resistencia, se han montado en el cuerpo de la sonda palpador, y se ha montado el conector de la marca *Lemo*.

1.6.6 Etapa 6A: Ensayo NDT con corrientes inducidas 2: clasificación de materiales

Se ha realizado un ensayo de resolución del problema inverso, para la clasificación de acero por la microestructura resultante, tras haber sido sometido a dos tratamientos térmicos diferentes según el diagrama de bloques de la Figura 18.

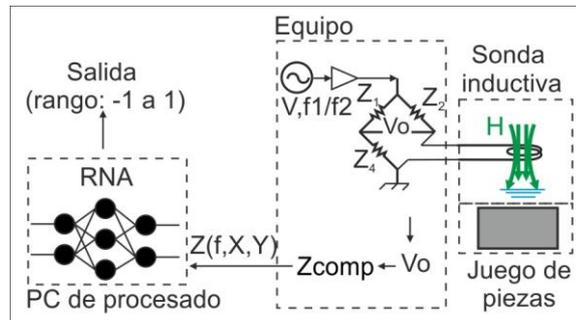


Figura 18. Diagrama de bloques del sistema: Equipo de corrientes, sonda inductiva, juego de piezas de acero y PC de procesado.

La metodología seguida se ha dividido en cuatro pasos. Inicialmente se han tomado los datos de impedancia, después se ha realizado un pre-procesado de los datos adquiridos, posteriormente se han implementado los clasificadores de piezas de acero mediante redes neuronales y finalmente se han analizado los clasificadores implementados. A continuación, se desglosan cada una de las partes de la metodología:

1.6.6.1 Toma de datos

La toma de datos ha consistido en 1) la aproximación de las levas de acero en la zona plana de la misma (Figura 19) al campo magnético primario creado por la sonda inductiva, y 2) en la medida de la impedancia resultante (Z_x, Z_y) a las frecuencias de trabajo 50 kHz y 100 kHz. Se han tomado 40 medidas de impedancia manteniendo una distancia inferior a 0.1 mm entre sonda y pieza. Se ha asegurado tomar las impedancias después del régimen transitorio del *circuito RL serie* que se crea entre el generador y el primario de las sondas $t > 5\tau$; siendo $\tau = \frac{L}{R}$.



Figura 19. Interacción de la sonda palpador con las levas inspeccionadas en el [Artículo 3 del compendio](#).

La profundidad estándar de penetración de las corrientes inducidas, conforme a la Ecuación (8), ha sido 54.04 μm a 50 kHz y 32.41 μm a 100 kHz, por lo que la exploración predominante ha sido superficial. En este tipo de ensayos NDT, el flujo de corrientes inducidas $I(z)$ es máximo en la superficie I_{max} y decrece exponencialmente con la profundidad z . La tasa de decrecimiento con la profundidad viene marcada por la profundidad estándar de penetración δ , a la cual el flujo cae hasta valores del 37 % respecto de la superficie. En la Ecuación (8), σ representa la conductividad eléctrica en $1/(\Omega \cdot m)$, f es la frecuencia en Hz y μ_r es la permeabilidad relativa del material.

$$I(z) = I_{\text{max}} e^{-z/\delta}, \text{ siendo } \delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}} \quad (8)$$

1.6.6.2 Pre-procesado

Se han normalizado las componentes reales (Z_x) e imaginarias (Z_y) de las impedancias adquiridas, con el fin de proporcionar un conjunto de variables de entrada a las redes neuronales con media nula y desviación estándar unitaria, para mejorar los resultados de clasificación y reducir el tiempo de entrenamiento. Se ha aplicado la transformación de la Ecuación (9), siendo $Z_{x/y}$ la componente de la impedancia de entrada, $Z'_{x/y}$ la impedancia preprocesada, $\mu_{x/y}$ el valor medio y $\sigma_{x/y}$ la desviación típica de $Z_{x/y}$.

$$Z_{x/y} \rightarrow Z'_{x/y} = \frac{Z_{x/y} - \mu_{x/y}}{\sigma_{x/y}} \quad (9)$$

1.6.6.3 Procesado mediante redes neuronales

Se han procesado las muestras normalizadas de impedancia para clasificar las piezas según el tratamiento térmico recibido. Para ello, se han diseñado dos redes que han *procesado en modo monofrecuencia* las impedancias tomadas a las frecuencias de trabajo 50 y 100 kHz, y una tercera red que ha realizado un *procesado multifrecuencia* de las impedancias extraídas a 50 kHz y 100 kHz.

En el **Artículo 2 del compendio** se describen detalladamente las características de las redes diseñadas. Las redes utilizadas han estado formadas por perceptrones multicapa *Multi-Layer Perceptron (MLP) feedforward*, y han creado una red totalmente conectada y con una única capa oculta. La capa de salida ha tenido una única neurona de salida. El número de neuronas en la capa de entrada ha sido 2 en el caso del *procesado monofrecuencia* y 4 en el caso del *procesado multifrecuencia*.

El número de neuronas de la capa oculta no ha sido constante, sino que se ha estudiado su influencia y ha variado entre 2 y 10. La función de activación ha sido una función tangente hiperbólica *tanh* con salida entre -1 y 1. Esta función de activación ha estado presente en las neuronas de la capa oculta y de salida y ha aportado el carácter no lineal a cada neurona.

La división de muestras se ha realizado de manera que el 60 % se han asignado al entrenamiento y el 15 % a la validación. En la Figura 20 se muestra un esquema del proceso de entrenamiento empleando un algoritmo iterativo. El criterio de finalización del entrenamiento ha sido doble. El principal ha sido el de la clasificación correcta de todas las muestras de entrenamiento y validación. En caso de entrar en un bucle infinito, se ha establecido un criterio secundario de tiempo máximo del proceso iterativo en 60 segundos.



Figura 20. Esquema del proceso de entrenamiento de una RNA empleando un algoritmo iterativo.

Una vez entrenadas y validadas las redes, se han testado con el 25 % de las muestras restantes. Con estas muestras se han extraído las tasas de acierto y los tiempos de ejecución que las redes han tardado en clasificar piezas de entrada.

1.6.6.4 Análisis de los clasificadores implementados

Por último, se han evaluado los clasificadores de piezas implementados mediante las redes neuronales.

El primer criterio de comparación ha sido la tasa de acierto de clasificación de las redes una vez entrenadas, definida como el ratio entre el número de muestras clasificadas correctamente y el número de muestras totales. El rango de los valores posibles de tasa de acierto ha estado comprendido entre el 0 % y el 100 %.

El segundo criterio de comparación ha sido la carga computacional, calculada de manera teórica como el número de operaciones que ha necesitado cada red para clasificar una pieza. Se ha desglosado en el número de sumas y productos que realizan las neuronas para el cálculo de las combinaciones lineales, y en el número de cómputos de la función de activación no lineal *tanh*. El rango del número de operaciones de cada tipo se ha expresado en unidades naturales.

| Tipo de operación | Operaciones en la capa oculta | Operaciones en la capa de salida | Total operaciones |
|----------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| Sumas/Productos | $N_{oc} * N_{in}$ | N_{oc} | $N_{oc} * (N_{in} + 1)$ |
| Operaciones de <i>tanh</i> | N_{oc} | 1 | $N_{oc} + 1$ |

Tabla III. Carga computacional teórica de las RNAs propuestas con N_{in} neuronas de entrada, N_{oc} neuronas en la capa oculta y una neurona de salida.

El tercer y último criterio de comparación de las redes entrenadas, aproximándose a las condiciones industriales de una línea de producción, ha sido el tiempo de necesario para clasificar una pieza y se ha expresado en microsegundos.

1.6.7 Etapas 1B, 4B, 6B: Redacción y publicación de resultados

De manera transversal a la realización de los trabajos de investigación de la tesis, se ha realizado la redacción y publicación de resultados obtenidos en revistas. Junto a los resultados, se ha difundido la discusión de los mismos, las conclusiones extraídas, las limitaciones de los sistemas presentados siempre con vistas a la aplicabilidad en la industria y las propuestas de líneas futuras de investigación que se han podido derivar.

En consecuencia, todo el trabajo realizado se ha redactado en forma de artículos para revistas, con factor de impacto JCR especializadas en el área de los ensayos NDT. Los **Artículos 1, 2 y 3** se incluyen íntegramente en los Capítulos 2, 3 y 4 de esta memoria de tesis como **compendio de publicaciones**.

1.7 Resultados y discusión

A partir del desarrollo de esta tesis se han obtenido los resultados que se exponen en la presente sección.

1.7.1 Sondas de corrientes inducidas

Del ensayo NDT con corrientes inducidas 1, sobre aplicaciones de discontinuidades y metrología de espesor no conductor, se han obtenido los conjuntos de resultados **R1**, **R2** y **R3** relacionados con sondas de corrientes inducidas:

1.7.1.1 R1: Respuesta en frecuencia

En la Tabla IV y en la Figura 21 se muestran los resultados comparativos de señal/ruido ante la misma discontinuidad en función de la frecuencia, con la *Sonda 1 con generación y captación inductivas*, y con la *Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*.

Los ensayos realizados con la *Sonda 1 con generación y captación inductivas* proporcionaron una relación señal/ruido promedio, en el rango 10-1000 kHz, un 14.95 dB superior en la detección de discontinuidades en aluminio, que ensayos realizados con la *Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*. Se puede comprobar que el ancho de banda de la *Sonda 1* aún no está agotado en la banda 10-1000 kHz y que puede continuar más allá de 1000 kHz, mientras que el ancho de banda de la *Sonda 2* finaliza en 1000 kHz.

| Sonda: | F (kHz) | 10 | 20 | 50 | 100 | 200 | 1000 |
|--|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <i>Sonda 1: Generación y captación inductivas</i> | Amplitud (puntos) | 500 | 1800 | 4000 | 7000 | 10000 | 2500 |
| | Ruido promedio (puntos) | 10 | 40 | 30 | 30 | 50 | 40 |
| | SNR (dB) | 33.98 | 33.06 | 42.50 | 47.36 | 46.02 | 35.92 |
| <i>Sonda 2: Generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall</i> | Amplitud (puntos) | 600 | 750 | 1000 | 1000 | 650 | 200 |
| | Ruido promedio (puntos) | 60 | 25 | 20 | 17 | 20 | 200 |
| | SNR (dB) | 20.00 | 29.54 | 33.98 | 35.39 | 30.24 | 0.00 |

Tabla IV. Resultados de señal/ruido SNR de la *Sonda 1 con generación y captación inductivas* y de la *Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall* en función de la frecuencia

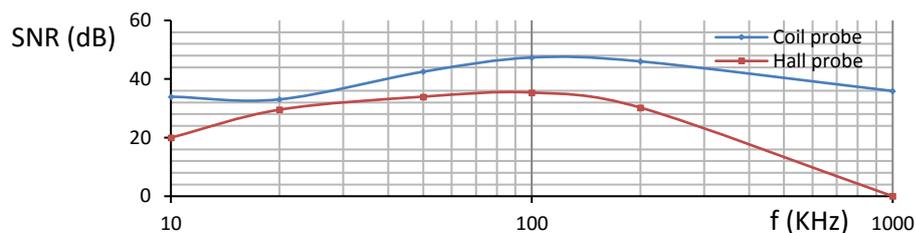


Figura 21: Relación señal/ruido (SNR) de la detección de discontinuidad artificial de 2.5mm con la *Sonda 1 con generación y captación inductivas* y con la *Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall* en la banda 10kHz-1000kHz

El máximo de señal/ruido lo alcanzaron en el entorno de 100 kHz, con valores de 47.36 dB de la *Sonda 1 con generación y captación inductivas*, y 35.39 dB de la *Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*.

Se confirma el apartado (i) de la hipótesis H1, ya que la *Sonda 1 con generación y captación inductiva* funciona en un ancho de banda de frecuencias de inyección mayor y con una relación señal/ruido mayor que de la *Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*.

1.7.1.2 R2: Caracterización de discontinuidades

En la Tabla V y en la Figura 22 se muestran los resultados comparativos de señal/ruido de la detección de una discontinuidad de diámetro creciente, con la *Sonda 1 con generación y captación inductivas*, y con la *Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*.

| | | Diámetro (mm) | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 |
|-----------------|-------------------------|--------------------------|-------|-------|-------|------|
| | | Amplitud (puntos) | 1500 | 3000 | 4000 | 7000 |
| Sonda inductiva | Ruido promedio (puntos) | 30 | 30 | 30 | 30 | |
| | SNR (dB) | 33.98 | 40 | 42.50 | 47.36 | |
| | | Amplitud (puntos) | 200 | 600 | 800 | 1000 |
| Sonda Hall | Ruido promedio (puntos) | 17 | 17 | 17 | 17 | |
| | SNR (dB) | 21.41 | 30.95 | 33.45 | 35.39 | |
| Diferencia | SNR_coil-SNR_Hall (dB) | 12.57 | 9.05 | 9.05 | 11.97 | |
| | | Promedio: 10.66dB | | | | |

Tabla V. Resultados de señal/ruido SNR de la *Sonda 1 con generación y captación inductivas* y de la *Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall* en función de diferentes diámetros

Los ensayos realizados con la *Sonda 1 con generación y captación inductivas* proporcionaron una relación señal/ruido promedio, en el rango 1.0 -2.5 mm, un 10.66 dB superior en la detección de discontinuidades en aluminio, que ensayos realizados con la *Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*. Considerando una relación señal/ruido mínima aceptable de 6dB, ambas sondas detectaron con éxito cuatro agujeros de diámetros de 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5 mm.

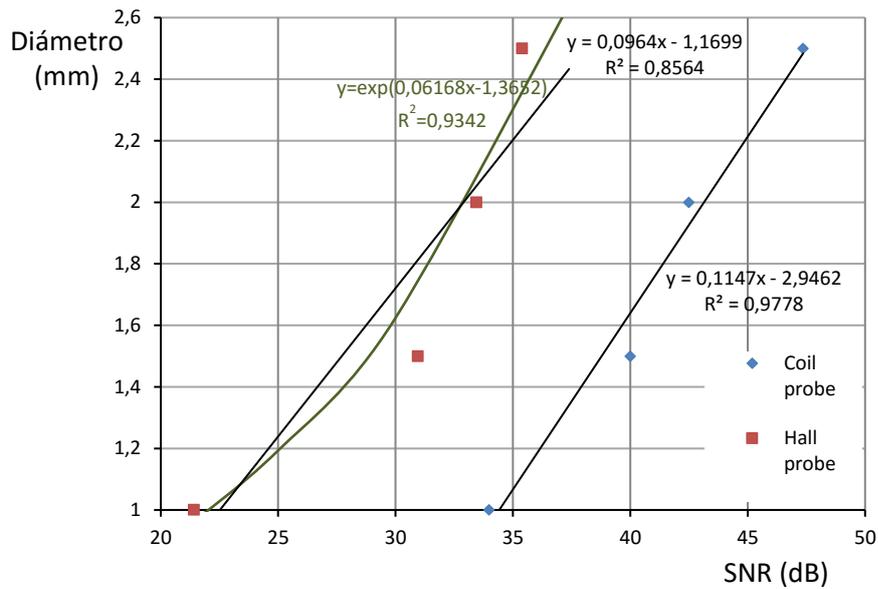


Figura 22: Gráfico de Relación señal/ruido SNR de la detección de agujeros en aluminio de diferentes diámetros, con la Sonda 1 con generación y captación inductivas y la Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall

En la Figura 22 se muestra la gráfica inversa a la presentada en el **Artículo 2 del compendio**, con el fin de mostrar los interpoladores que resuelven el problema inverso de caracterización de discontinuidades a partir de las indicaciones del equipo de instrumentación. Se ha obtenido que la respuesta de la *Sonda 1 con generación y captación inductiva* tiene un comportamiento lineal mucho más ajustado a la recta ($R^2 = 0.9778$), que la *Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall* ($R^2 = 0.8564$). Debido a esta desviación, se ha procedido a calcular el interpolador exponencial sobre los puntos de la sonda con sensor Hall y se ha logrado un $R^2 = 0.9342$.

En la Tabla VI se muestran los errores absolutos y promedio del error absoluto, y el error relativo y el promedio, de cada estimación del tamaño de la discontinuidad, al resolver el problema inverso con los tres interpoladores calculados. Se ha obtenido que el interpolador de la *Sonda 1* tiene un error promedio en la predicción del diámetro de 0.07mm; respecto a 0.13mm del interpolador exponencial, y 0.18mm del interpolador lineal de la *Sonda 2*. Siguiendo el mismo orden, el interpolador lineal de la sonda inductiva tiene un error relativo promedio del 4.62%, seguido del 7.28% del interpolador exponencial y 11.15% del interpolador lineal de la *sonda con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*.

| Diámetro del agujero (mm) | Sonda inductiva (lineal) | | | Sonda Hall (lineal) | | | Sonda Hall (exponencial) | | |
|---------------------------|--------------------------|----------------|--------------|--------------------------|----------------|---------------|--------------------------|----------------|--------------|
| | Predicción diámetro (mm) | Err. Abs. (mm) | Err. rel. | Predicción diámetro (mm) | Err. Abs. (mm) | Err. rel. | Predicción diámetro (mm) | Err. Abs. (mm) | Err. rel. |
| 1 | 0,95 | 0,05 | 4,88% | 0,89 | 0,11 | 10,58% | 0,96 | 0,04 | 4,36% |
| 1,5 | 1,64 | 0,14 | 9,45% | 1,81 | 0,31 | 20,94% | 1,72 | 0,22 | 14,86% |
| 2 | 1,93 | 0,07 | 3,58% | 2,05 | 0,05 | 2,75% | 2,01 | 0,01 | 0,50% |
| 2,5 | 2,49 | 0,01 | 0,56% | 2,24 | 0,26 | 10,33% | 2,27 | 0,23 | 9,39% |
| PROMEDIO: | | 0,07 | 4,62% | | 0,18 | 11,15% | | 0,13 | 7,28% |

Tabla VI. Resultados de exactitud de resolución del problema inverso del interpolador lineal de la *Sonda 1* con generación y captación inductivas, y de los interpoladores lineal y exponencial de la *Sonda 2* con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall

Finalmente se muestra en la Tabla VII se muestran los resultados de incertidumbre de medida debidos a la resolución digital del equipo de instrumentación. Con los interpoladores calculados, el error relativo de la incertidumbre que representa medio punto en la amplitud del interpolador lineal de la sonda inductiva es 1.33E-04%, seguido de 7.46E-4% del interpolador lineal y 3.89E-2% del interpolador exponencial de la *sonda con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*.

| Diámetro del agujero (mm) | Sonda inductiva (lineal) | | | Sonda Hall (lineal) | | | Sonda Hall (exponencial) | | |
|---------------------------|---|-----------------|-----------------|---|-----------------|-----------------|--|-----------------|-----------------|
| | Predicción diámetro+ incertidumbre (mm) | Err. Abs. (mm) | Err. rel. (%) | Predicción diámetro+ incertidumbre (mm) | Err. Abs. (mm) | Err. rel. (%) | Predicción diámetro + incertidumbre (mm) | Err. Abs. (mm) | Err. rel. (%) |
| 1 | 0,95 | 3,32E-04 | 0,0332 | 0,90 | 2,09E-03 | 0,2091 | 0,96 | 6,35E-02 | 6,3546 |
| 1,5 | 1,64 | 1,66E-04 | 0,0111 | 1,81 | 6,97E-04 | 0,0465 | 1,72 | 9,03E-02 | 6,0225 |
| 2 | 1,93 | 1,25E-04 | 0,0062 | 2,06 | 5,23E-04 | 0,0262 | 2,01 | 4,42E-02 | 2,2104 |
| 2,5 | 2,49 | 7,12E-05 | 0,0028 | 2,24 | 4,19E-04 | 0,0167 | 2,27 | 2,41E-02 | 0,9655 |
| PROMEDIO | | 1,73E-04 | 1,33E-04 | | 9,32E-04 | 7,46E-04 | | 5,56E-02 | 3,89E-02 |

Tabla VII. Resultados de incertidumbre digital del interpolador lineal de la *Sonda 1* con generación y captación inductivas, y de los interpoladores lineal y exponencial de la *Sonda 2* con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall

Se confirma el apartado (ii) de la hipótesis H1, ya que la *Sonda 1* con generación y captación inductiva ha resuelto el problema inverso de caracterización de defectos con una exactitud mayor (error absoluto promedio de 0.07mm respecto a 0.13mm) que la *Sonda 2* con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall. También la *Sonda 1* ha caracterizado el tamaño del defecto con un error relativo menor que la *Sonda 2* (4.62% respecto a 7.28%).

1.7.1.3 R3: Metrología de espesor

En la Figura 23 se muestra el gráfico de ajuste de medida de espesor no conductor basado en el parámetro *lift-off*, con la *Sonda 1 con generación y captación inductivas*, y con la *Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*. Se muestra la gráfica inversa a la presentada en el **Artículo 2 del compendio**, con el fin de mostrar los interpoladores que resuelven el problema inverso de estimación del espesor en base a la indicación en el equipo de instrumentación.

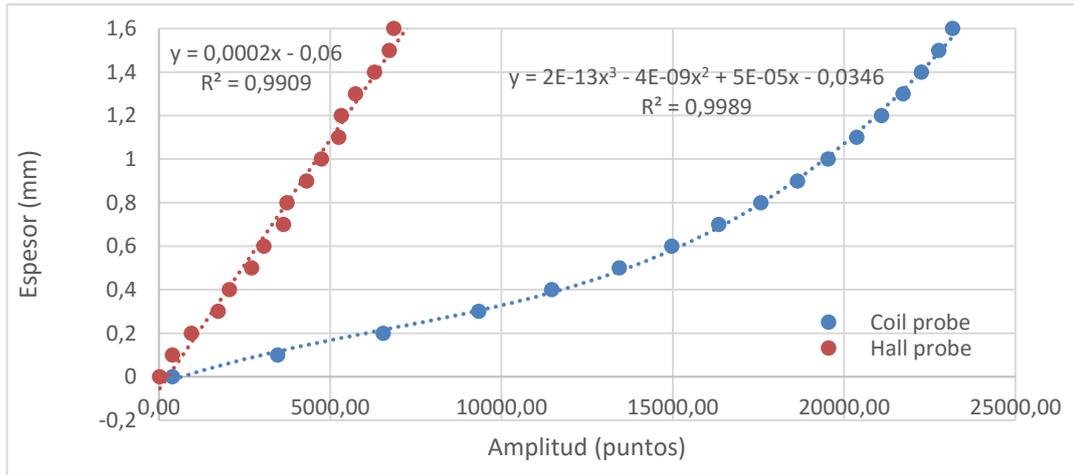


Figura 23: Gráfico de ajuste de medida de espesor no conductor basado en el parámetro *lift-off* con la *Sonda 1 con generación y captación inductivas*, y con la *Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*

Los interpoladores se han calculado con el juego de datos de ajuste de la Tabla VIII presentada en el **Artículo 2 del compendio**. El interpolador de la *Sonda 1* ha sido un polinomio de orden 3, con un $R^2 = 0.9989$. El interpolador de la *Sonda 2* ha sido lineal, con un $R^2 = 0.9909$.

| Espesor (mm) | Sonda 1 | | Sonda 2 | |
|------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|
| | Amplitud (Puntos) | Desviación estándar (Puntos) | Amplitud (Puntos) | Desviación estándar (Puntos) |
| 0 | 396,09 | 97,22 | 26,26 | 16,89 |
| 0,1 | 3472,95 | 76,10 | 394,30 | 50,06 |
| 0,2 | 6547,40 | 4,12 | 956,41 | 74,90 |
| 0,3 | 9336,81 | 80,98 | 1735,93 | 350,73 |
| 0,4 | 11466,31 | 27,00 | 2063,11 | 212,33 |
| 0,5 | 13446,43 | 101,94 | 2704,57 | 40,44 |
| 0,6 | 14970,81 | 5,92 | 3064,72 | 33,32 |
| 0,7 | 16342,91 | 5,42 | 3636,40 | 139,43 |
| 0,8 | 17571,58 | 19,65 | 3737,11 | 107,40 |
| 0,9 | 18641,61 | 11,32 | 4311,63 | 5,60 |
| 1 | 19539,83 | 105,39 | 4745,33 | 12,85 |
| 1,1 | 20373,94 | 254,10 | 5254,76 | 58,37 |
| 1,2 | 21096,68 | 10,04 | 5331,02 | 23,73 |
| 1,3 | 21722,08 | 6,38 | 5746,33 | 44,49 |
| 1,4 | 22264,77 | 1,39 | 6299,67 | 0,73 |
| 1,5 | 22768,65 | 10,25 | 6731,93 | 54,48 |
| 1,6 | 23170,75 | 7,11 | 6855,24 | 27,42 |
| PROMEDIO: | 48,49 | 48,49 | PROMEDIO: | 73,72 |

Tabla VIII. Juego de datos de ajuste para la medida de espesor con interpoladores

En la Tabla IX se muestran, a partir de un segundo juego de datos, las predicciones de espesor y la exactitud¹ de cada medida. El error promedio, como medida de exactitud respecto al espesor real, ha sido 0.09mm en el caso de la *Sonda 1 con generación y captación inductiva*, y 0.12mm en el caso de la *Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*. Se puede apreciar que el error con signo de los interpoladores es positivo, y los interpoladores tienden a predecir una medida inferior al valor real de la medida. Esto causa que los errores relativos de las medidas en el rango 0.0-0.4mm se disparan.

| Sonda con generación y captación inductiva | | | | | Sonda con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall | | | |
|--|-------------------|-------------------------|---------------------|----------------|--|-------------------------|---------------------|----------------|
| Espesor (mm) | Amplitud (puntos) | Medida interpolada (mm) | Error absoluto (mm) | Error relativo | Amplitud (puntos) | Medida interpolada (mm) | Error absoluto (mm) | Error relativo |
| 0 | 258,599 | -0,02 | 0,02 | --- | 2,371 | -0,06 | 0,06 | --- |
| 0,1 | 3580,57 | 0,10 | 0,00 | 2,33% | 323,51 | 0,00 | 0,10 | 95,30% |
| 0,2 | 6541,567 | 0,18 | 0,02 | 11,35% | 850,481 | 0,11 | 0,09 | 44,95% |
| 0,3 | 9222,29 | 0,24 | 0,06 | 18,94% | 1239,92 | 0,19 | 0,11 | 37,34% |
| 0,4 | 11428,13 | 0,31 | 0,09 | 21,77% | 2363,388 | 0,41 | 0,01 | 3,17% |
| 0,5 | 13302,267 | 0,39 | 0,11 | 21,30% | 2647,377 | 0,47 | 0,03 | 6,10% |
| 0,6 | 14979,191 | 0,49 | 0,11 | 18,49% | 3111,837 | 0,56 | 0,04 | 6,27% |
| 0,7 | 16335,239 | 0,59 | 0,11 | 16,20% | 3439,218 | 0,63 | 0,07 | 10,31% |
| 0,8 | 17599,365 | 0,70 | 0,10 | 12,92% | 3889,001 | 0,72 | 0,08 | 10,27% |
| 0,9 | 18657,624 | 0,80 | 0,10 | 10,58% | 4303,707 | 0,80 | 0,10 | 11,03% |
| 1 | 19390,784 | 0,89 | 0,11 | 11,09% | 4763,51 | 0,89 | 0,11 | 10,73% |
| 1,1 | 20014,582 | 0,97 | 0,13 | 12,06% | 5172,219 | 0,97 | 0,13 | 11,41% |
| 1,2 | 21082,477 | 1,12 | 0,08 | 7,02% | 5297,467 | 1,00 | 0,20 | 16,71% |
| 1,3 | 21713,055 | 1,21 | 0,09 | 6,72% | 5809,247 | 1,10 | 0,20 | 15,24% |
| 1,4 | 22262,801 | 1,30 | 0,10 | 6,94% | 6300,705 | 1,20 | 0,20 | 14,28% |
| 1,5 | 22754,158 | 1,39 | 0,11 | 7,45% | 6654,89 | 1,27 | 0,23 | 15,27% |
| 1,6 | 23160,704 | 1,46 | 0,14 | 8,59% | 6816,46 | 1,30 | 0,30 | 18,54% |
| Desviación estándar del error absoluto (mm) | | | 0,04 | | Desviación estándar del error absoluto (mm) | | | 0,08 |
| Error promedio (mm) | | | 0,09 | | Error promedio (mm) | | | 0,12 |

Tabla IX. Juego de datos 2: Espesor real, amplitud, predicción de espesor, error absoluto y error relativo con la *Sonda 1 con generación y captación inductiva*, y la *Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*.

En la Tabla VIII, se muestra la precisión² del espesor estimado, medida con la desviación estándar de la amplitud de los juegos de datos de ajuste y de predicción de espesor. La desviación estándar promedio de la *Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall* de las medidas de amplitud es un 52.02% superior que la de la *Sonda 1 con generación y captación inductiva*.

¹ Exactitud: proximidad de la medición con respecto al valor verdadero.

² Precisión: medida de repetitividad o reproductibilidad de la medida.

Finalmente, en la Tabla X se muestran las medidas de la incertidumbre³ de cada medida y el error relativo que representan, equivalentes al espesor de medio punto digital de amplitud del equipo de corrientes inducidas (resolución del equipo). La incertidumbre de la *Sonda 1 con generación y captación inductiva* está en el rango 16.1-124nm. Además, es creciente debido a la convexidad de la curva Amplitud (espesor). Sin embargo, la incertidumbre debido a la resolución del equipo con la *Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall* es 117nm, y constante en todo el rango 0.0-1.6mm debido a su carácter lineal.

| Sonda | Rango de medida (mm) | Pendiente f (p/mm) | Pendiente f^{-1} (mm/p) | Incertidumbre (mm) | Error relativo (%) |
|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|
| 1 Inductiva | 0.0-0.3 | 31130 | 3,21E-05 | 1,61E-05 | 1,07E-02 |
| | 0.3-0.7 | | | 3,15E-05 | 8,11E-03 |
| | 0.7-1.0 | 10660 | 9,38E-05 | 4,69E-05 | 5,52E-03 |
| | 1.0-1.5 | | | 8,56E-05 | 6,77E-03 |
| | 1.5-1.6 | 4020 | 0,000249 | 1,24 E-04 | 8,02E-03 |
| 2 Con sensor Hall | 0.0-1.6 | 4280 | 0,000234 | 1,17E-04 | 1,46E-02 |

Tabla X. Incertidumbres de medida de espesor a partir de la equivalencia de espesor de medio punto del equipo de corrientes inducidas

Se confirma el apartado (iii) de la hipótesis H1, ya que la *Sonda 2 con generación y captación inductiva* ha resuelto el problema inverso de medida de gap entre sonda y metal con una exactitud mayor (error absoluto promedio de 0.09mm respecto a 0.12mm) que la *Sonda 2 con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*.

³ Incertidumbre: resolución igual a medio punto digital del equipo de corrientes inducidas.

1.7.2 Redes neuronales aplicadas al postprocesado de datos de corrientes inducidas

A continuación, se procedió al ensayo NDT con corrientes inducidas 2 sobre resolución del problema inverso, para la clasificación de materiales por sus propiedades. De este ensayo se han obtenido las impedancias XY del equipo de corrientes inducidas de las muestras tratadas correcta e incorrectamente (Tabla XI).

| LEVAS CON TRATAMIENTO CORRECTO | | | | | LEVAS CON TRATAMIENTO INCORRECTO | | | | |
|--------------------------------|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------------------|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| FREC. (KHz) | 50 | | 100 | | FREC. (KHz) | 50 | | 100 | |
| # LEVA (medida n) | X | Y | X | Y | # LEVA (medida n) | X | Y | X | Y |
| 1 (medida 1) | -4021 | -9602 | -3864 | -3168 | 5 (medida 1) | -3439 | -13087 | -3928 | -4686 |
| 2 (medida 1) | -3112 | -8641 | -2901 | -2789 | 6 (medida 1) | -3138 | -11242 | -3468 | -3884 |
| 3 (medida 1) | -4255 | -11327 | -3874 | -3475 | 7 (medida 1) | -3564 | -13220 | -3985 | -4597 |
| 4 (medida 1) | -4143 | -11872 | -3911 | -3767 | 8 (medida 1) | -3191 | -12031 | -3602 | -4227 |
| 1 (medida 2) | -3685 | -8575 | -3171 | -2475 | 5 (medida 2) | -3178 | -11916 | -3588 | -4178 |
| 2 (medida 2) | -4070 | -12397 | -3961 | -4051 | 6 (medida 2) | -3492 | -12935 | -3923 | -4494 |
| 3 (medida 2) | -4420 | -11845 | -4036 | -3635 | 7 (medida 2) | -3458 | -12750 | -3861 | -4439 |
| 4 (medida 2) | -3852 | -10809 | -3609 | -3430 | 8 (medida 2) | -3478 | -13395 | -3979 | -4722 |
| 1 (medida 3) | -4599 | -11489 | -4093 | -3395 | 5 (medida 3) | -3052 | -11264 | -3424 | -3948 |
| 2 (medida 3) | -3469 | -10014 | -3301 | -3241 | 6 (medida 3) | -3661 | -13720 | -4154 | -4783 |
| 3 (medida 3) | -3652 | -9234 | -3259 | -2795 | 7 (medida 3) | -3446 | -12660 | -3850 | -4411 |
| 4 (medida 3) | -4001 | -11360 | -3763 | -3613 | 8 (medida 3) | -3235 | -12262 | -3677 | -4324 |
| 1 (medida 4) | -3725 | -9287 | -3304 | -2794 | 5 (medida 4) | -2829 | -10757 | -3212 | -3822 |
| 2 (medida 4) | -3218 | -9252 | -3040 | -3008 | 6 (medida 4) | -3032 | -11352 | -3423 | -3988 |
| 3 (medida 4) | -3602 | -9561 | -3272 | -3971 | 7 (medida 4) | -2814 | -10106 | -3092 | -3541 |
| 4 (medida 4) | -3376 | -9435 | -3153 | -3032 | 8 (medida 4) | -2827 | -10763 | -3210 | -3853 |
| 1 (medida 5) | -3827 | -9502 | -3389 | -2841 | 5 (medida 5) | -3773 | -10495 | -3143 | -3732 |
| 2 (medida 5) | -3346 | -9812 | -3197 | -3208 | 6 (medida 5) | -3007 | -11320 | -3405 | -3986 |
| 3 (medida 5) | -3525 | -9320 | -3197 | -2896 | 7 (medida 5) | -2868 | -10470 | -3179 | -3678 |
| 4 (medida 5) | -3435 | -9729 | -3223 | -3130 | 8 (medida 5) | -2887 | -11012 | -3277 | -3914 |
| PROMEDIO | -3766,65 | -10153,2 | -3475,9 | -3235,7 | PROMEDIO | -3218,45 | -11837,9 | -3569 | -4160,35 |
| DESVIACIÓN | | | | | DESVIACIÓN | | | | |
| ESTÁNDAR | 403,0890296 | 1162,776 | 371,4831 | 426,6421 | ESTÁNDAR | 302,6424806 | 1105,979 | 332,2217 | 377,2742 |

Tabla XI. Resultados de datos de impedancia del equipo de corrientes inducidas de las muestras tratadas correcta e incorrectamente

Los gráficos de las impedancias XY del equipo de corrientes inducidas de la *Figura 24 (a)* a 50kHz y de la *Figura 24(b)* a 100kHz permiten analizar la morfología de la serie de puntos que conforman los centroides. Atendiendo a los resultados de $(X_{promedio}, Y_{promedio})$ mostrados en la Tabla XI, se obtiene que la distancia euclídea entre centroides a 50kHz es de 1771.65 puntos y a 100kHz es de 929.36puntos. Por tanto, a priori, los centroides entre tratamiento correcto e incorrecto, están más separados cuanto más baja es la frecuencia. En lo que respecta a la precisión de las medidas, caracterizada

con las desviaciones estándar, es mayor en el caso de las piezas con tratamiento incorrecto que en el caso de las piezas con tratamiento correcto (ratios > 1 de la Tabla XII).

| Coordenada | F 50kHz | | F 100kHz | |
|---|------------|----------|----------|----------|
| | X | Y | X | Y |
| Ratio de STD entre levas tratadas. OK/NOK | 1,33189838 | 1,051354 | 1,118178 | 1,130854 |

Tabla XII. Resultados comparativos de precisión de medidas entre muestras tratadas correctamente e incorrectamente, a las frecuencias de trabajo 50kHz y 100kHz

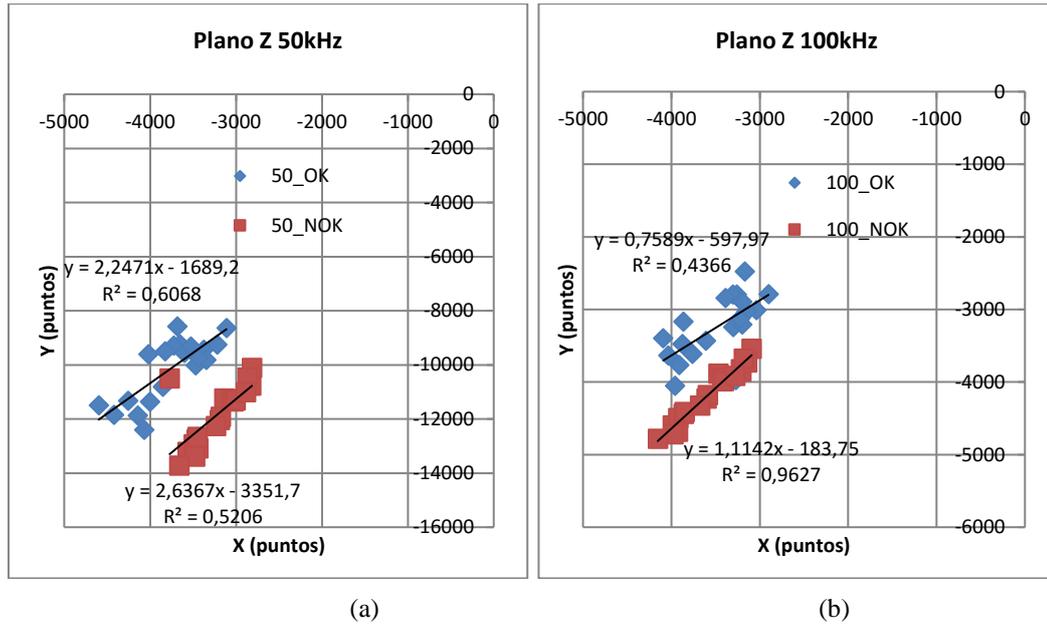


Figura 24: Gráfico de impedancia del equipo de corrientes inducidas de las muestras tratadas correctamente e incorrectamente y líneas de tendencia. Frecuencia de inyección: (a) 50kHz, (b) 100kHz.

Posteriormente, estas impedancias XY se introdujeron en las redes neuronales descritas en la Sección 1.6.6.3 de la presente memoria. Se han obtenido los conjuntos de resultados **R4**, **R5** y **R6**:

1.7.2.1 R4: Tasa de acierto

En la Tabla XIII y en la Figura 25 se muestran las tasas de acierto de la RNA monofrecuencia de 50 kHz, de la RNA monofrecuencia de 100 kHz y de la RNA multifrecuencia de 50 kHz y 100 kHz.

| Neuronas capa oculta | Tasa de aciertos 50 kHz | Tasa de aciertos 100 kHz | Tasa de aciertos método multifrecuencia |
|----------------------|-------------------------|--------------------------|---|
| 2 | 82,80 | 88,80 | 99,90 |
| 3 | 88,20 | 86,10 | 99,70 |
| 4 | 88,40 | 88,30 | 99,10 |
| 5 | 88,50 | 89,80 | 98,90 |
| 6 | 90,00 | 89,90 | 98,10 |
| 7 | 88,80 | 87,50 | 98,70 |
| 8 | 90,10 | 90,10 | 98,50 |
| 9 | 88,30 | 88,00 | 98,40 |
| 10 | 88,90 | 89,80 | 98,70 |

Tabla XIII. Resultados de tasa de acierto de clasificación monofrecuencia a 50kHz, monofrecuencia a 100kHz y multifrecuencia a 50 y 100kHz, en función del número de neuronas de la capa oculta

Los ensayos realizados con una red neuronal, que realiza clasificación *multifrecuencia* de piezas de acero UNE F-1310 sometidas a tratamientos térmicos diferentes, proporcionaron una tasa de acierto un 10.4 % superior, que ensayos realizados con dos redes que realizan *clasificación monofrecuencia*.

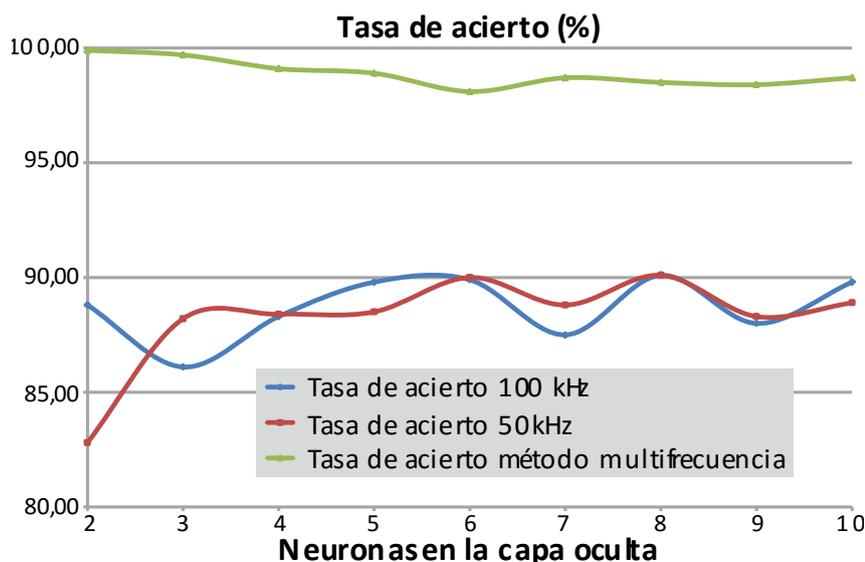


Figura 25: Tasa de acierto de la RNA monofrecuencia de 50 kHz, de la RNA monofrecuencia de 100 kHz y de la RNA multifrecuencia de 50 kHz y 100 kHz.

En la Figura 25 se puede observar la estabilización o empeoramiento de la tasa de acierto de las RNAs diseñadas a partir de un cierto número de neuronas en la capa oculta. De esta manera, la tasa de acierto del procesado multifrecuencia fue siempre decreciente con el número de neuronas ocultas, mientras que las RNAs de clasificación monofrecuencia no mostraron mejoras significativas en su tasa de acierto a partir de cinco neuronas. Este hecho se justifica con el sobre-entrenamiento de la red que se produce al aumentar el número de neuronas ocultas. Cuando hay un exceso de parámetros de ajuste libres se produce una adaptación excesiva de las RNAs a los datos de entrenamiento y, debido a esto, la capacidad de generalización de la RNA, y por tanto de clasificar, empeora. Para evitar el sobre-entrenamiento ha sido adecuado seguir la estrategia de la metodología en este ensayo, que consistió en elegir el número de neuronas en la capa oculta mínimo a partir del cual se estabilizó o comenzó a disminuir la tasa de acierto.

A nivel microestructural del acero, la microestructura martensítica de las piezas correctas ha marcado la pauta para la desviación de las curvas de *lift-off* hacia la formación de una nube de puntos cercanos, mientras que la microestructura de perlita predominante de las piezas no correctas ha marcado la pauta para la desviación de las colas de las curvas de *lift-off* hacia otra región del plano de impedancia. La microestructura común de bainita presente en los dos grupos de piezas ha tendido a desviar las nubes de puntos hacia la misma región, si bien las microestructuras no comunes han permitido diferencia suficiente entre los dos grupos de piezas para permitir el funcionamiento del método de clasificación.

Se confirma el apartado (i) de la hipótesis H2, pues las redes neuronales artificiales MLP que procesan impedancias multifrecuencia han ofrecido una tasa de acierto mejor que las redes MLP entrenadas que procesan impedancias monofrecuencia. Y, además, con el incremento del número de neuronas de la capa oculta (de 2 a 10), las redes con procesamiento monofrecuencia no han superado en ningún caso, por mucha complejidad que se añada en la capa oculta, a la red con procesamiento multifrecuencia más simple con 2 neuronas en dicha capa.

1.7.2.2 R5: Carga computacional

Los resultados relativos a la carga computacional de cada red neuronal se muestran en la Tabla XIV y en la Figura 26.

| Nº frecuencias de entrada | Nº de neuronas de la capa oculta | Sumas | productos | Computación <i>tanh</i> | Total operaciones |
|---------------------------|----------------------------------|-----------|-----------|-------------------------|-------------------|
| 1 | 2 | 6 | 6 | 3 | 15 |
| 1 | 3 | 9 | 9 | 4 | 22 |
| 1 | 4 | 12 | 12 | 5 | 29 |
| 1 | 5 | 15 | 15 | 6 | 36 |
| 1 | 6 | 18 | 18 | 7 | 43 |
| 1 | 7 | 21 | 21 | 8 | 50 |
| 1 | 8 | 24 | 24 | 9 | 57 |
| 1 | 9 | 27 | 27 | 10 | 64 |
| 1 | 10 | 30 | 30 | 11 | 71 |
| 2 | 2 | 10 | 10 | 3 | 23 |
| 2 | 3 | 15 | 15 | 4 | 34 |
| 2 | 4 | 20 | 20 | 5 | 45 |
| 2 | 5 | 25 | 25 | 6 | 56 |
| 2 | 6 | 30 | 30 | 7 | 67 |
| 2 | 7 | 35 | 35 | 8 | 78 |
| 2 | 8 | 40 | 40 | 9 | 89 |
| 2 | 9 | 45 | 45 | 10 | 100 |
| 2 | 10 | 50 | 50 | 11 | 111 |

Tabla XIV. Resultados de carga computacional de clasificación monofrecuencia a 50/100kHz y multifrecuencia a 50 y 100kHz, en función del número de neuronas de la capa oculta

Los ensayos realizados con una red neuronal, que realiza *clasificación multifrecuencia* de piezas de acero UNE F-1310 sometidas a tratamientos térmicos diferentes, proporcionaron un número de sumas y productos un 33.3 % inferior y un 50.0 % inferior de cálculos de la función de activación *tanh*, que ensayos realizados con dos redes que realizan *clasificación monofrecuencia*.

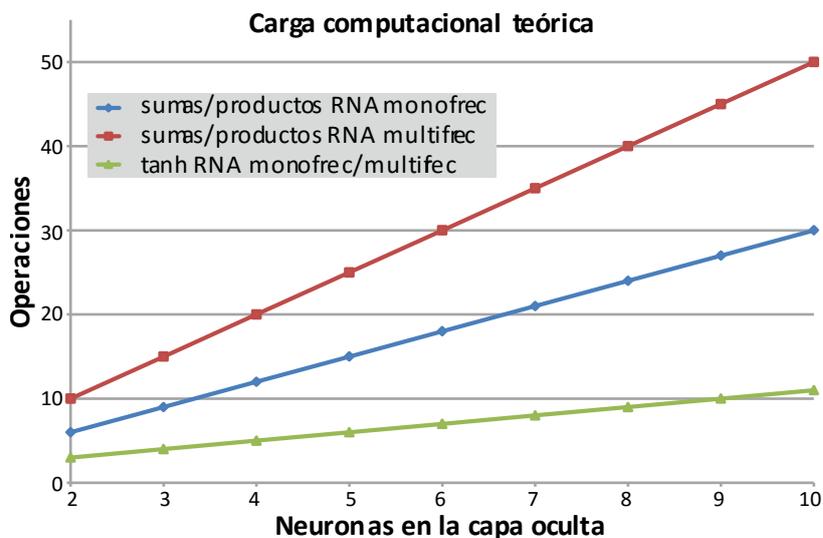


Figura 26: Carga computacional de las RNAs propuestas en función del número de neuronas ocultas. Número de sumas/productos y cómputos de la *tanh* de las RNAs monofrecuencia y de las RNAs multifrecuencia.

A partir de los resultados obtenidos, se cumple el apartado (ii) de la hipótesis H2, ya que las redes MLP con procesado multifrecuencia con mejor tasa de acierto que las de procesado monofrecuencia, tienen además una carga computacional menor. La hipótesis se cumple porque cuanto mayor es el número de entradas, las redes neuronales necesitan menor complejidad interna para lograr resultados similares de tasa de acierto.

1.7.2.3 R6: Tiempo de ejecución

En la *Tabla XV* se muestran los tiempos de ejecución medio y máximo que necesitaron las RNAs una vez entrenadas para clasificar piezas de acero UNE F-1310 sometidas a tratamientos térmicos diferentes. Se incluyen los tiempos de las cuatro RNAs propuestas más representativas, que fueron en el caso del procesado monofrecuencia las RNAs con 5 y 6 neuronas en la capa oculta y en el caso multifrecuencia las RNAs con 2 y 3 neuronas ocultas.

| Tipo de RNA | Neuronas en la capa oculta | Tiempo medio (μ s) | Tiempo máximo (μ s) |
|-----------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Monofrecuencia | 5 | 0.3197 | 0.3613 |
| Monofrecuencia | 6 | 0.3864 | 0.4138 |
| Multifrecuencia | 2 | 0.2492 | 0.2787 |
| Multifrecuencia | 3 | 0.2896 | 0.3201 |

Tabla XV. Tiempo de ejecución promedio y máximo requerido por cuatro configuraciones de las RNAs propuestas para clasificar levas de acero

Los resultados muestran que la RNA más rápida fue la de procesado multifrecuencia con 2 neuronas ocultas con 0.2492 μ s promedio. En segundo lugar, se situó el procesado multifrecuencia de 3 neuronas, seguido del procesado monofrecuencia de 5 neuronas ocultas. En último lugar, se situó el procesado monofrecuencia con 6 neuronas ocultas y 0.3864 μ s promedio, un 55.1% más que en el mejor caso. El tiempo de ejecución de la clasificación multifrecuencia de 2 neuronas ocultas fue un 22.1% inferior al necesario por la clasificación monofrecuencia de 5 neuronas ocultas.

A partir de los resultados obtenidos, se cumple el apartado (iii) de la hipótesis H2:

1-Las redes MLP con procesado multifrecuencia con mejor tasa de acierto que las que procesan impedancias monofrecuencia, han tenido un tiempo de ejecución promedio para clasificar una pieza. La hipótesis se cumple porque cuanto mayor es el número de entradas (paso de mono a multifrecuencia), las redes neuronales necesitan menor complejidad interna para lograr resultados similares de tasa de acierto.

2-La carga computacional teórica ha estado correlada con el tiempo de ejecución medido de manera experimental. Ordenando de menor a mayor los resultados de las cuatro RNAs analizadas en términos de carga computacional y en términos de tiempo de ejecución se obtuvo la misma clasificación: los dos mejores casos se obtuvieron en

la clasificación multifrecuencia con dos y tres neuronas ocultas respectivamente, mientras que el tercer y el cuarto caso son para las RNAs relativas al procesado monofrecuencia con cinco y seis neuronas ocultas respectivamente.

3-Es viable el procesado multifrecuencia de impedancias de corrientes inducidas con redes MLP en una planta industrial con una cadencia de fabricación y control de un segundo. Con una tasa de acierto conseguida del 99.9%, se ha logrado un tiempo de ejecución promedio de 0.2492 μ s, por lo que no sería un factor limitante en el proceso de control de calidad.

1.8 Conclusiones

A partir del desarrollo de esta tesis, centrada en el ámbito de sondas y algoritmos de técnicas NDT basadas en corrientes inducidas, se han obtenido las conclusiones que se exponen en la presente sección.

Del ensayo NDT con corrientes inducidas 1: discontinuidades y metrología de espesor no conductor se han obtenido las siguientes conclusiones sobre sondas:

- **C1:** El conjunto de resultados **R1** sugiere utilizar *sondas con generación y captación inductivas*, entre *sondas con generación y captación inductivas* y *sondas con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*, para detectar discontinuidades en la banda 10-1000 kHz y con mayor relación señal/ruido. Con esta propuesta de sonda se ha alcanzado el **objetivo O1 de la tesis**.
- **C2:** El conjunto de resultados **R2** sugiere utilizar *sondas con generación y captación inductivas*, entre *sondas con generación y captación inductivas* y *sondas con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*, para resolver el problema inverso de caracterización de discontinuidades con mayor exactitud respecto al valor real. Con esta propuesta de sonda se ha alcanzado el **objetivo O2 de la tesis**.
- **C3:** El conjunto de resultados **R3** sugiere utilizar *sondas con generación y captación inductivas*, entre *sondas con generación y captación inductivas* y *sondas con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*, para resolver el problema inverso de metrología espesor no conductor sobre aluminio con mayor exactitud en el rango 0.0-1.6mm. Con esta propuesta de sonda se ha alcanzado el **objetivo O3 de la tesis**.

Del ensayo NDT con corrientes inducidas 2: clasificación de materiales se han obtenido las siguientes conclusiones sobre redes neuronales aplicadas a las técnicas no destructivas de corrientes inducidas mono y multifrecuencia:

- **C4:** El conjunto de resultados **R4** sugiere utilizar como red neuronal MLP óptima para *clasificación de* levas de acero por su tratamiento térmico, la que realiza procesado multifrecuencia, con 4 neuronas en la capa de entrada y 2 neuronas en la capa oculta, por tener mejores tasas de acierto que otras redes que realizan *clasificación monofrecuencia*. La justificación de esta propuesta, radica en que el procesado multifrecuencia permite extraer más información de las piezas y poder restar la parte común entre las microestructuras resultantes de los tratamientos térmicos diferentes. Con esta propuesta de red neuronal, se ha alcanzado el **objetivo O4 de la tesis**.
- **C5:** El conjunto de resultados **R5** sugiere utilizar como red neuronal MLP óptima para *clasificación de* levas de acero por su tratamiento térmico, la que

realiza procesado multifrecuencia, con 4 neuronas en la capa de entrada y 2 neuronas en la capa oculta, por tener mejor carga computacional que otras redes que realizan *clasificación monofrecuencia*. El incremento del número de variables de entrada del procesado multifrecuencia, puede simplificar la complejidad de la capa oculta de la red neuronal MLP, y no tiene por qué suponer un incremento en la carga computacional del clasificador respecto de los casos monofrecuencia. Con esta propuesta de red neuronal, se ha alcanzado el **objetivo O5 de la tesis**.

- **C6:** El conjunto de resultados **R6**, sugiere utilizar como red neuronal MLP óptima para *clasificación de levas de acero* por su tratamiento térmico, la que realiza procesado multifrecuencia, con 4 neuronas en la capa de entrada y 2 neuronas en la capa oculta, por tener menor tiempo promedio de clasificación que otras redes que realizan *clasificación monofrecuencia*. El tiempo de ejecución necesario para realizar una *clasificación multifrecuencia* no tiene que ser necesariamente mayor que el empleado en un *procesado monofrecuencia*, a pesar de la mayor complejidad que tienen a priori las redes neuronales con mayor número de entradas. Con esta propuesta de red neuronal, se ha alcanzado el **objetivo O6 de la tesis**.

De forma general, **los resultados** confirman la hipótesis general, y **sugieren utilizar las sondas con generación y captación inductivas** para detectar discontinuidades, y resolver los problemas inversos de caracterización de discontinuidades y de metrología espesor no conductor sobre aluminio. **Los resultados** también **sugieren**, con una *sonda con generación y captación inductiva* en la cadena de señal, utilizar **una red neuronal MLP para clasificación de levas de acero por su tratamiento térmico con procesado multifrecuencia, 4 neuronas en la capa de entrada y 2 neuronas en la capa oculta**. Con esta propuesta de sondas y de redes neuronales, se ha alcanzado el **objetivo general de la tesis**.

1.9 Líneas futuras

A la partir de los resultados obtenidos se plantean una serie de posibles trabajos futuros que pueden enriquecer el campo de las tecnologías NDT de corrientes inducidas. Se propone (i) analizar sondas en tecnología de circuito impreso y/o con sensores magnéticos integrados, (ii) aplicar las sondas con sensores de efecto *Hall* a los cabezales rotatorios para barra calibrada, (iii) aplicar sondas con sensor de efecto *Hall* a sondas distribuidas, (iv) analizar el comportamiento de otros tipos de redes neuronales distintas a *Multilayer Perceptron* para la caracterización de materiales por su tratamiento térmico, (v) analizar el comportamiento de las redes neuronales *Multilayer Perceptron* para la detección de piezas sometidas a descarburización, (vi) aplicar las redes neuronales al postprocesado de señal para la detección de defectología periódica en los trenes de laminación, y (vii) integrar sistemas NDT multitécnica.

- **Línea futura 1: Análisis de sondas de corrientes inducidas en tecnología de circuito impreso y/o con sensores magnéticos integrados.** El trabajo de diseño de sondas del Artículo 2 del compendio puede ser un punto de partida para la investigación de sondas integradas en placas de circuito impreso (*Printed Circuit Board*, PCB) [56] y/o con sensores magnéticos integrados. Estas sondas pueden integrar espirales en varias capas de la placa, que actúan como generadores o receptores de campo magnético, y sensores magnéticos integrados como los de efecto *Hall* [57, 58] o magnetorresistivos [59, 60], o específicos como el de Gomez *et al.* [61], analizados en el Artículo 1 del compendio. Este tipo de sondas son mucho más repetibles que las elaboradas a mano, tienen unas tolerancias de fabricación mucho menores, y en principio, abaratan costes respecto a las manuales debido a los bajos costes de las PCBs y a las economías de escala de los sensores de estado sólido. Teniendo en cuenta que existe una relación de aspecto insalvable entre tamaño de la sonda y tamaño del defecto, estas sondas contribuyen a miniaturizar sondas para detectar microdefectos. Los límites de estas sondas se encuentran en las reglas de diseño de los fabricantes de PCBs y en los tamaños mínimos de los sensores magnéticos integrados.
- **Línea futura 2: Aplicación de sonda con generación inductiva y captación con sensor de efecto *Hall* a los sistemas de control de *lift-off* de los cabezales rotatorios.** En el Artículo 2 del compendio se ha trabajado en las tareas de metrología de distancia entre sonda y probeta de aluminio. Los resultados pueden aplicarse a los sistemas de inspección rotatoria, que se diseñan para la detección de defectos largos en barras calibradas (*bright steel bars*) en frío, de profundidad W superior a 10 μm .

En estos rotatorios, los palpadores se adaptan a un sistema mecánico complejo de ultraprecisión para describir hélices cilíndricas alrededor de las barras calibradas (Figura 27-a). Normalmente estos sistemas incorporan un canal absoluto para medir distancia $d1, d2$ y aplicar correcciones de ganancia $G1, G2$ en caso de que la barra

entre descentrada (Figura 27-b) o presente algún tipo de ovalidad. El fin de este canal es que defectos con la misma profundidad generen la misma respuesta en el equipo de corrientes inducidas, independientemente de la distancia sonda-barra calibrada.

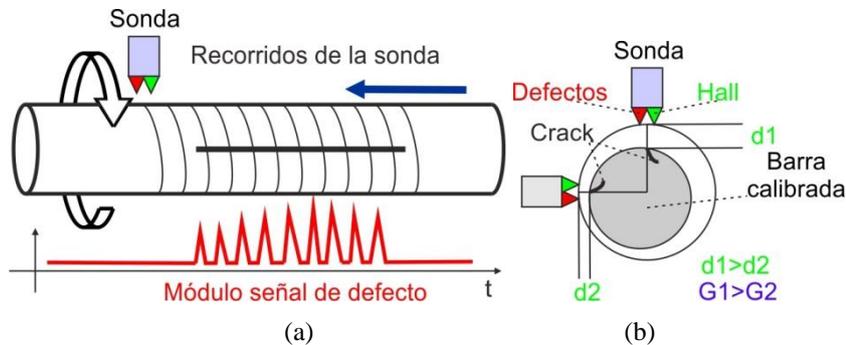


Figura 27. (a) Diagrama de inspección rotatoria para la detección de defecto largo. (b) Corrección electrónica de ganancia con canal absoluto con sensor de efecto Hall.

Normalmente las sondas del canal absoluto tienen *generación y captación inductivas*, son costosas y se suelen romper con el mínimo contacto con el producto. La propuesta es investigar las contribuciones de las sondas con sensores de efecto Hall como captadores en la cadena de señal del sistema, que abaraten costes y den medidas exactas en el rango de 0.5- 1.5 mm.

- **Línea futura 3: Aplicación de sonda con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall a sondas distribuidas.** La tendencia de investigación es clara, ante los límites insalvables de la física. Como existe relación entre el tamaño de la sonda y el defecto mínimo, para llegar más lejos, una tendencia es el diseño de sondas distribuidas como la de la Figura 28, formadas por arrays de sondas de reducidas dimensiones [62, 63]. En el **Artículo 2 del compendio** se ha trabajado en las tareas de metrología de distancia entre sonda y probeta de metal. Los resultados pueden aplicarse a **sondas envolventes segmentadas con control de ganancia**, que tienen una corrección electrónica para que defectos iguales se detecten con la misma relación señal/ruido, en caso de descentrado de la barra o tubo respecto a la sonda.

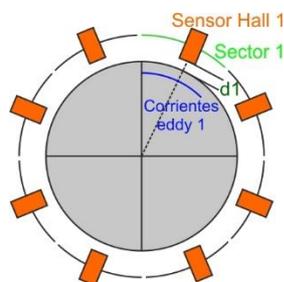


Figura 28. Sonda envolvente distribuida en 8 sectores con control de distancia con sensores de efecto Hall

- **Línea futura 4: Análisis del comportamiento de otros tipos de redes neuronales distintas a *Multilayer Perceptron* para la caracterización de materiales por su tratamiento térmico.** Otro trabajo futuro que puede surgir a partir de los resultados presentados en el **Artículo 3 del compendio** es el análisis del comportamiento de otros tipos de redes neuronales que procesan impedancias procedentes de ensayos NDT con corrientes inducidas. Las redes probadas de tipo *Multilayer Perceptron* MLP han arrojado resultados interesantes de clasificación y de rendimiento en lo que respecta a piezas clasificadas por segundo. Pueden probarse otros tipos de redes neuronales que pueden resultar más apropiadas, como las de función de base radial (*Radial Basis Function Neural Network*, RBFNN) [64, 65], que quizá incrementen la tasa de acierto de clasificación de piezas y que disminuyan los tiempos de clasificación. Además puede resultar muy interesante poder evaluar las tasas de falsos positivos y negativos de los clasificadores y poder mover los umbrales mediante análisis *Receiver Operating Characteristic* ROC, para minimizar la tasa de que piezas malas sean clasificadas como buenas. Como desventaja, el análisis ROC puede incrementar del número de piezas buenas que son rechazadas.
- **Línea futura 5: Análisis del comportamiento de las redes neuronales *Multilayer Perceptron* para la clasificación de piezas sometidas a descarburización.** Se podría extender la metodología de trabajo del **Artículo 3 del compendio**, a clasificar piezas descarburadas en distinto grado. Esta pérdida de carbono en superficie causa la degradación de las propiedades mecánicas [66, 67]. Incluso, en base a piezas patrón con descarburación conocida se podría estimar, por interpolación, el grado de descarburación de piezas.
- **Línea futura 6: Aplicación de las redes neuronales al postprocesado de señal para la detección de defectología periódica en los trenes de laminación.** Los trabajos de incorporar redes neuronales para el postprocesado de los datos en bruto, que generan los equipos de corrientes inducidas, pueden continuarse. En el **Artículo 3 del compendio** se han aplicado las redes neuronales a la clasificación de piezas, pero se puede valorar su aplicación al análisis predictivo del estado de los trenes de laminación. El mercado actual demanda sistemas sin falsas alarmas que sean capaces de detectar roturas de rodillos de laminación que generan marcas periódicas en los productos laminados (Figura 29). La necesidad es clara, ya que los productos siderúrgicos defectuosos se achatarran o pierden valor de venta, y cualquier parada de línea producida por la rotura de rodillos es económicamente muy costosa.

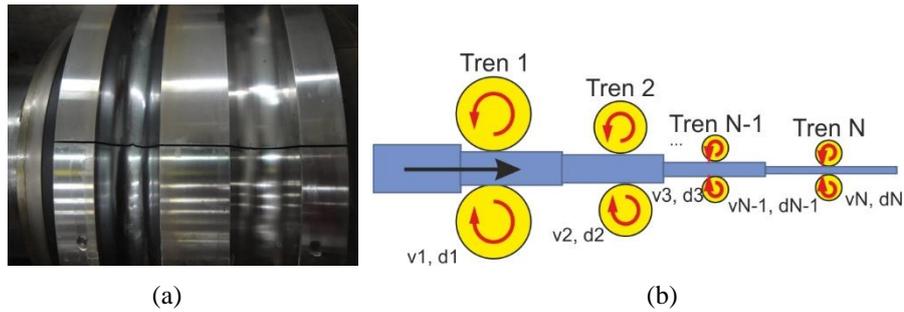


Figura 29. (a) Rodillo de laminación fracturado que imprime defectología periódica. (b) Esquema de laminación de N trenes de rodillos, velocidades de producto v_i y diámetros de producto d_i . $i=1 \dots N$.

Detectar problemas en la línea, a partir de la señal con ruido de fondo captada por la sonda no es fácil, pues la potencia promedio [68] de estas señales T-periódicas $x(t)$, suele ser muy baja, y menor cuanto más al principio se encuentre el tren de laminación con fallo.

Algunos autores como Jin-Su *et al.* han tratado el problema de impresión de defectología periódica en la producción siderúrgica con técnicas basadas en la transformada rápida de *Fourier* FFT [69]. La aplicación de redes neuronales con un aprendizaje autónomo y predictivo puede contribuir a mejorar el sistema preventivo de detección de rotura de rodillos.

- **Línea futura 7: Fusión de sistemas NDT multitécnica.** La tendencia de la tecnología para salvar las limitaciones de los sistemas de corrientes inducidas, es la fusión con otras técnicas NDT.

Línea futura 7.1: Corrientes inducidas+Ultrasonidos. Una posibilidad es la fusión de las técnicas de corrientes inducidas con ultrasonidos, como realizan Habibalahi *et al.* [70]. Con ultrasonidos se salvan las limitaciones de espesor, pudiéndose lograr penetración de ensayo hasta 1000 mm. Si bien, los ultrasonidos tienen dificultad para detectar discontinuidades próximas a la superficie. Con corrientes inducidas, los ensayos son superficiales y en la práctica subsuperficiales hasta 5 mm. Como desventaja de peso, los ultrasonidos tienen necesidad de líquido o grasa acoplante entre pieza y sensor, mientras que las corrientes inducidas permiten ensayos sin contacto. Sobre la discontinuidad mínima típica, en ultrasonidos es de 0.1 mm aunque depende de la longitud de onda y el espesor. En corrientes inducidas la discontinuidad mínima depende de las dimensiones de la sonda y del acabado del material. Si bien con buenos acabados en barras calibradas se detectan defectos largos desde 0.01 mm de profundidad.

Línea futura 7.2: Corrientes inducidas+Visión artificial. Otra posibilidad es la fusión de las técnicas de corrientes inducidas con visión artificial. El principio de funcionamiento de las técnicas de visión consiste en iluminar la superficie del producto que se va a inspeccionar, y tomar imágenes utilizando cámaras digitales con sensores CCD (*charge-coupled device*) [71-73]. Estas imágenes (son datos computacionalmente de tipo no estructurados) se procesan en tiempo real para determinar la presencia de defectos, y su clasificación por aspectos como tipo, posición, gravedad y dimensiones. Las técnicas *Deep Learning* y en concreto las que utilizan redes neuronales son apropiadas para la clasificación de imágenes [74]. En la fusión de técnicas NDT, un sistema de corrientes inducidas con sonda palpador, envolvente o sectorial en la línea, dispara un sistema de visión que captura las imágenes y las analiza [75]. La visión artificial aporta a los sistemas de *eddy current*, la localización precisa angular de discontinuidades en barra y la caracterización de defectos en función de su tamaño, forma, tipo y origen, lo que viene a ser la resolución del *problema inverso*.

1.10 Contribuciones originales

En esta sección se detallan las dos contribuciones al estado del arte procedentes del trabajo de investigación de la tesis. Estas contribuciones originales se presentan en los dos apartados siguientes, explicándose las diferencias entre el trabajo desarrollado en la tesis y el trabajo presentado en otros artículos publicados.

1.10.1 Sonda con sensor de efecto Hall fuera del radio del solenoide generador de campo

La primera contribución al estado del arte es el diseño de una *sonda con generación inductiva y captación con sensor de efecto Hall*, en la que se posiciona el sensor fuera del radio del solenoide generador de campo. Esta contribución ha sido propuesta en el **Artículo 2 del compendio** [2]. El problema planteado, la solución propuesta, las ventajas de la contribución y la comparación entre la contribución y otros trabajos se presentan a continuación.

- **Problema planteado:** Necesidad de sondas tipo palpador (*i*) con un sensor magnético de estado sólido, (*ii*) con baja tolerancia entre diferentes unidades fabricadas, (*iii*) con dimensiones reducidas, (*iv*) con rango dinámico y sensibilidad adecuada para detectar discontinuidades en aluminio, y (*v*) con rango dinámico y sensibilidad adecuada para realizar medidas de espesor de capas no conductoras sobre aluminio.
- **Solución propuesta:** Sonda de la Figura 30 caracterizada por (*i*) tener generación con una bobina con núcleo de ferrita con diámetro 1.6 mm, (*ii*) tener captación con sensor de efecto Hall Honeywell S SS94A1 con sensibilidad 5 mV/G, (*iii*) tener un voltaje de alimentación de 8 VDC, y (*iv*) estar diseñada con la parte activa del sensor de efecto Hall posicionado a 2 mm de la bobina generadora de campo. Bajo mi conocimiento, el **Artículo 2 del compendio** es el primero de la literatura científica en el que se diseña y se testea una sonda palpador con el sensor de efecto Hall fuera del núcleo de la bobina generadora.

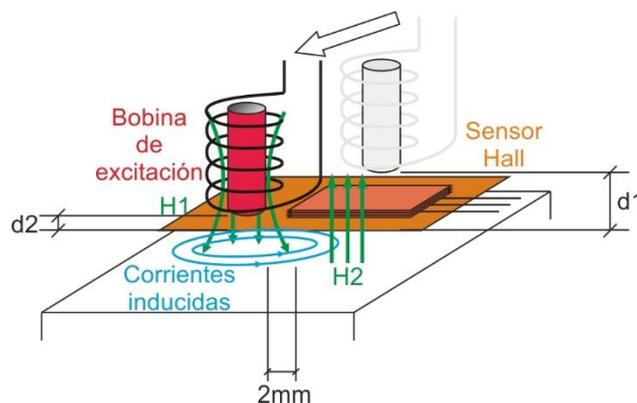


Figura 30. Posición relativa de la bobina y el sensor de efecto Hall de la sonda utilizada en el **Artículo 2 del compendio**.

- Beneficios de la contribución: La decisión de diseño de la posición relativa entre bobina generadora y sensor de efecto *Hall* tiene dos ventajas. La primera ventaja es evitar captar con el sensor de efecto *Hall* la inyección intensa que enmascara la señal de las corrientes *eddy* de la pieza. Como el chip del sensor de efecto *Hall* tiene un espesor no despreciable, la segunda ventaja es aproximar la bobina generadora a la pieza de inspección a la distancia d_2 , y así lograr un campo magnético primario abundante en el metal.
- Comparación: Se han consultado diversas fuentes bibliográficas que utilizan sondas parecidas, y se han encontrado estudios con distintas posiciones relativas entre la bobina generadora y el sensor de efecto *Hall*:

- Li *et al.* modelan el campo magnético en probetas multicapa, y posicionan el sensor de efecto *Hall* en el centro de la bobina que genera el campo [76]. Con respecto a este estudio, la contribución presentada tiene las diferencias de tener: (i) una bobina primaria con núcleo de ferrita respecto a núcleo de aire, (ii) 100 vueltas respecto a 804, (iii) 1.6 mm de diámetro del primario respecto a 22.6mm, (iv) rango de operación de frecuencias medias 10kHz-1000kHz respecto a frecuencias bajas 20 Hz-10 kHz, y (v) inductancia 70.3 μ H respecto 19.4 mH.

La contribución presentada tiene las ventajas de (i) tener un rango de frecuencias de trabajo mucho más amplio, (ii) a priori ser mucho más sensible a los defectos pequeños porque focaliza más el campo del primario, y (iii) captar menos ruido en el sensor de efecto *Hall* debido a la menor influencia del primario.

- Yun *et al.* estudian la inmunidad del sensor al *lift-off*, con el sensor de efecto *Hall* ubicado en varias posiciones dentro de la bobina que genera el campo [22].

Con respecto a este estudio, la contribución presentada tiene las diferencias de tener: (i) una bobina primaria con núcleo de ferrita respecto a núcleo de aire, (ii) 100 vueltas respecto a 230, (iii) 1.6 mm de diámetro del primario respecto a 4.8 mm, (iv) modo sinusoidal respecto a modo pulsado, y (v) sensor de efecto *Hall* fuera de la bobina del primario respecto a la variación desde el centro hasta el 90% del radio.

La contribución presentada tiene las ventajas de (i) presentar resultados y conclusiones procedentes de estudios empíricos, respecto a presentar sólo los resultados de una modelización, y (ii) a priori captar menos ruido en el sensor de efecto *Hall* debido a la menor influencia del primario.

- Cordier *et al.* investigan el centrado de un tubo en el interior de una sonda envolvente, provista de 8 sensores de efecto *Hall* que miden distancia [77]. Es una alternativa a las correcciones de ganancia para reducir el efecto de descentrados mecánicos del tubo en el hueco de sondas envolventes. Con respecto a este estudio, la contribución presentada tiene las diferencias de: (i) tener generación con bobina específica del primario

respecto a captar el campo de un yugo de magnetización, y (ii) utilizar sensores de efecto *Hall* con sensibilidad 5 mV/G respecto a 3.125 mV/G. La contribución presentada tiene en común con el trabajo de Cordier *et al.*, haber alcanzado precisión de medida de distancia sensor-pieza de 100 μm en casos prácticos.

La contribución presentada, aplicada a cada uno de los 8 sistemas de medición de distancia del trabajo de Cordier *et al.*, tiene la ventaja de (i) individualizar la generación de campo, pudiéndose recibir con mayor intensidad y menos ruido, y (ii) poder evitar interferencias cruzadas con multiplexación por medio de técnicas de división en 8 frecuencias (*Frequency-Division Multiplexing, FDM*).

1.10.2 Fusión de técnica multifrecuencia y redes neuronales para la clasificación de piezas de acero por su tratamiento térmico

La segunda contribución al estado del arte es la fusión de técnica NDT de corrientes inducidas multifrecuencia, y redes neuronales para la clasificación de piezas de acero por su tratamiento térmico. Esta contribución ha sido propuesta en el **Artículo 3 del compendio** [3]. El problema planteado, la solución propuesta, las ventajas de la contribución y la comparación entre la contribución y otros trabajos se presentan a continuación.

- **Problema planteado:** la clasificación de piezas de acero por su tratamiento térmico, de forma automática, con un sistema lo suficientemente rápido para las condiciones industriales (al menos una pieza por segundo), y sin intervención de ningún operador humano.
- **Solución propuesta:** una técnica NDT de corrientes inducidas multifrecuencia, que emplea redes neuronales para la clasificación de piezas de acero por su tratamiento térmico. Bajo mi conocimiento, el **Artículo 3 del compendio** es el primero de la literatura científica en el que se clasifican piezas en función de su tratamiento térmico, con fusión de técnicas de corrientes inducidas NDT multifrecuencia y redes neuronales. Adicionalmente, se considera original la comparación de los resultados de clasificación entre redes neuronales que procesan datos de tipo monofrecuencia y multifrecuencia.
- **Beneficios de la contribución:** La contribución aporta tres beneficios sobre los métodos tradicionales de indentación de dureza:
 - El primer beneficio lo aporta la técnica NDT de corrientes inducidas, ya que permite ensayos sin contacto, de alta sensibilidad a los diferentes tratamientos térmicos, de muy alta velocidad, automatizados, y sin retardos significativos que permiten el análisis de la totalidad de la producción.
 - El segundo beneficio lo aporta la utilización de una técnica multifrecuencia, ya que incrementa la robustez del ensayo a las diferentes

fuentes de ruido y a otras variables nocivas del ensayo, y aumenta de la tasa de acierto de clasificación de piezas.

- El tercer beneficio lo aporta la utilización de las redes neuronales, ya que permiten trabajar con un número elevado de entradas y salidas, sin incrementos en la complejidad y la posibilidad de clasificación de datos no lineales.
- Comparación: Se han consultado diversas fuentes bibliográficas, y se han encontrado aplicaciones de redes neuronales en el campo de los ensayos de corrientes inducidas, pero orientados a la detección y caracterización de defectos en piezas.
 - Chady *et al.* estudian modelos de redes neuronales que procesan datos multifrecuencia, de ensayos con corrientes inducidas, para la detección de defectología en piezas, y basados en espectrogramas [53].

Con respecto a este estudio, la contribución presentada tiene las diferencias de: (i) estar orientada a la clasificación de piezas por su composición o la microestructura resultante de los tratamientos térmicos, respecto a la resolución del problema inverso de defectos, (ii) tener un tiempo de clasificación de 0.2492 μ s para clasificar una pieza respecto a 200 ms con buena señal/ruido, y (iii) clasificar por tratamiento con una o dos frecuencias respecto a utilizar 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120 kHz.

La contribución presentada es muy diferente a los modelos basados en espectrogramas, si bien: (i) una vez entrenadas las redes tiene la ventaja de clasificar en mucho menos tiempo, y (ii) las mejores redes empleadas han tenido 4 entradas, 2 neuronas ocultas y una de salida, respecto al caso inverso de Chady *et al.* que tenían 40 entradas, 3 ocultas y una salida.

- Wrzuszczak *et al.* resuelven el *problema inverso*, de inferencia de defectos, por medio de redes neuronales de tipo *Multi-Layer Perceptron* (MLP), como la presentada en el **Artículo 3 del compendio**, y otra de tipo *Radial Basis Function* (RBF) [54].

Con respecto a este estudio, la contribución presentada tiene las diferencias de: (i) estar orientada a la clasificación de piezas por su composición o la microestructura resultante de los tratamientos térmicos, respecto a la resolución del problema inverso de defectos por su tamaño y profundidad, (ii) introducir las coordenadas X,Y del plano Z a cada una de las frecuencias de trabajo 50, 100 kHz, respecto a introducir la amplitud y fase normalizadas (-1 a 1) y la frecuencia de trabajo explícita 10, 14 o 20 kHz, (iii) utilizar piezas de acero forjadas respecto a utilizar probetas de aluminio, cobre y acero con defectos artificiales realizados con electroerosión, (iv) utilizar redes *Multi-Layer Perceptron* (MLP), respecto a redes MLP y redes de base radial RBF que tienen la característica de un

menor tiempo de entrenamiento, y (v) dividir las muestras en entrenamiento-validación-test con una parte importante de entrenamiento EVT=60%-15%-25%, respecto a una distribución de muestras uniforme EVT=1/3-1/3-1/3.

La contribución presentada es muy diferente a los modelos de resolución del problema inverso de caracterización de defectos con redes de base radial RBF. Las redes MLP de la contribución tienen: (i) capa de entrada, (ii) una oculta (pudiendo ser varias), y (iii) una capa de salida con tantas neuronas como variables independientes de salida del sistema. Las neuronas de las capas ocultas y de salida tienen conexiones de la capa previa, pero no hay conexiones de neuronas de la misma capa. Por el contrario, las redes de base radial RBF tienen siempre tres capas, como explican los autores Longoni *et al.* [52]: (i) la capa de entrada tiene neuronas que dejan pasar el patrón de entrada, (ii) la capa oculta con neuronas que se activan según las funciones de base radial alojadas, y que miden la distancia entre el patrón de entrada y el vector de pesos (centroide), y (iii) la capa de salida que realiza una combinación lineal de la salida de las neuronas de la capa oculta.

- Lunin *et al.* estudian un clasificador geométrico de defectos en tubos intercambiadores de calor para la industria nuclear, implementado con redes neuronales que procesan datos multifrecuencia [41], con una red MLP aunque no se diga expresamente.

Con respecto a este estudio, la contribución presentada tiene las diferencias de tener: (i) sonda palpador absoluta respecto a sonda diferencial envolvente interna, (ii) clasificación de piezas por su tratamiento térmico, respecto a clasificación de tubos de intercambiadores de calor de la industria nuclear en función de la localización longitudinal en el tubo, tipo interno/externo/pasante y geometría de los defectos, (iii) desarrollo de sondas con cálculos teóricos respecto a simulación por elementos finitos con *MagNum3D*, (iv) frecuencias de trabajo 50 y 100 kHz respecto a 60, 130, y 280 kHz, y (v) muestras en entrenamiento-validación-test con una proporción mayor de entrenamiento EVT=60%-15%-25%, respecto a una distribución de muestras E+V-T=62%-38%.

La contribución presentada es muy diferente al modelo de clasificación de defectos con redes neuronales y técnica *eddy current* multifrecuencia, si bien tiene la ventaja de analizar parámetros funcionales como el tiempo de ejecución de clasificación de las redes empleadas, que en el artículo de Lunin *et al.* no se comenta. El lapso de tiempo que el sistema necesita para realizar una clasificación es clave con vistas a una implementación práctica. Un sistema lento y sobrecargado es difícilmente viable para su uso industrial.

SEGUNDA PARTE:
ARTÍCULOS DEL
COMPENDIO

Capítulo 2: Artículo 1 del compendio

En el presente capítulo se incluyen los datos bibliográficos del Artículo 1 del compendio y el texto íntegro del mismo.

2.1 Datos bibliográficos

TÍTULO: *Non-Destructive techniques based on eddy current testing.*

AUTORES: Javier García-Martín, Jaime Gómez-Gil, Ernesto Vázquez-Sánchez.

REVISTA: *Sensors.*

CATEGORÍAS DE LA REVISTA: *Instruments & Instrumentation; Chemistry, Analytical; y Electrochemistry.*

EDITOR: MDPI, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute* (Basel, Suiza).

AÑO DE PUBLICACIÓN: 2011.

ISSN: 1424-8220.

DOI: 10.3390/s110302525

VOLUMEN: 11.

NÚMERO: 3.

PÁGINAS: 2525-2565.

REFERENCIA: [1].

2.2 Texto íntegro del artículo

A continuación, se incluye el Artículo 1 del compendio, tal y como aparece publicado en la revista *Sensors*. El factor de impacto de la revista en 2011 fue 1.739 según el JCR.

Review

Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing

Javier García-Martín^{1,2,*}, Jaime Gómez-Gil¹ and Ernesto Vázquez-Sánchez¹

¹ Department of Signal Theory, Communications and Telematic Engineering, University of Valladolid (UVA), 47011 Valladolid, Spain; E-Mails: jgomez@tel.uva.es (J.G.-G.); ernesto.vazquez@uva.es (E.V.-S.)

² Ingeniería y Sistemas de Ensayos no Destructivos (ISEND), Ed. Galileo Azul, 103, 47151 P. T. Boecillo Valladolid, Spain

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: jgarmar@ribera.tel.uva.es or javier.garcia@isend.es; Tel.: +34-620-778-291; Fax: +34-983-423-667.

Received: 5 January 2011; in revised form: 19 January 2011 / Accepted: 9 February 2011 /

Published: 28 February 2011

Abstract: Non-destructive techniques are used widely in the metal industry in order to control the quality of materials. Eddy current testing is one of the most extensively used non-destructive techniques for inspecting electrically conductive materials at very high speeds that does not require any contact between the test piece and the sensor. This paper includes an overview of the fundamentals and main variables of eddy current testing. It also describes the state-of-the-art sensors and modern techniques such as multi-frequency and pulsed systems. Recent advances in complex models towards solving crack-sensor interaction, developments in instrumentation due to advances in electronic devices, and the evolution of data processing suggest that eddy current testing systems will be increasingly used in the future.

Keywords: non-destructive testing; eddy current; magnetic field; sensor; coil probe; impedance; crack; impedance plane; conductivity

1. Introduction

Non-destructive techniques are used in the metal industry and science in order to evaluate the properties of a wide variety of materials without causing damage. Some of the most common non-destructive techniques are electromagnetic, ultrasonic and liquid penetrant testing. One of the

conventional electromagnetic methods utilized for the inspection of conductive materials such as copper, aluminum or steel is eddy current non-destructive testing [1].

Electromagnetic methods such as eddy current, magnetic particle or radiographic and ultrasonic methods all introduce electromagnetic or sound waves into the inspected material in order to extract its properties. Penetrant liquid techniques can detect cracks in the test material by using either fluorescent or non-fluorescent dyes. In addition to these methods, scientists such as Shujuan *et al.* [2], Noorian *et al.* [3] and Aliouane *et al.* [4] have researched non-destructive testing based on a combination of electromagnetic and sound waves using electromagnetic acoustic transducers, best known as EMATs.

The principle of the eddy current technique is based on the interaction between a magnetic field source and the test material. This interaction induces eddy currents in the test piece [1]. Scientists can detect the presence of very small cracks by monitoring changes in the eddy current flow [5].

This paper reviews non-destructive eddy current techniques that permit high-speed testing [6] of up to 150 m/s [7] under harsh operating conditions where other techniques cannot be used. Eddy current testing is especially fast at automatically inspecting semi-finished products such as wires, bars, tubes or profiles in production lines. The results of eddy current testing are practically instantaneous, whereas other techniques such as liquid penetrant testing or optical inspection require time-consuming procedures that make it impossible [8], even if desired, to inspect all production.

Eddy current testing permits crack detection in a large variety of conductive materials, either ferromagnetic or non-ferromagnetic, whereas other non-destructive techniques such as the magnetic particle method are limited to ferromagnetic metals. Another advantage of the eddy current method over other techniques is that inspection can be implemented without any direct physical contact between the sensor and the inspected piece.

In addition, a wide variety of inspections and measurements may be performed with the eddy current methods that are beyond the scope of other techniques. Measurements of non-conductive coating thickness [9] and conductivity can be done. Conductivity is related to the composition and heat treatment of the test material. Therefore, the eddy current method can also be used to distinguish between pure materials and alloy compositions and to determine the hardness of test pieces after heat treatments [8].

Since the 1950s the role of eddy current testing has developed increasingly in the testing of materials, especially in the aircraft [10] and nuclear industries [11]. The extensive research and development in highly sensitive eddy current sensors and instruments over the last sixty years indicates that eddy current testing is currently a widely used inspection technique.

This paper presents the basis of non-destructive eddy current testing and provides an overview of the research conducted by many authors who continue to develop this technique. The fundamentals of eddy current inspection and the main variables of this technique are presented in Sections 2 and 3. Section 4 reviews the state-of-the-art sensors and research. Section 5 reviews the state of modern equipment, and Section 6 presents the applications and research trends of eddy current inspection. Finally, Section 7 presents a discussion of eddy current testing.

2. Principles of Operation of Eddy Current Testing

The objective of this section is to describe the principles of eddy current testing. A transformer model is presented to demonstrate the fundamentals of eddy current induction and the impedance changes that occur in coil sensors. After presenting operating principles, we present a block diagram of the constituent parts of eddy current testing equipment.

2.1. Electromagnetic Induction and Eddy Current Inspection

Every coil is characterized by the impedance parameter Z_0 , which is a complex number defined as in Equation (1) and which represents the voltage-current ratio (V_0/I_0) for a single frequency sinusoidal excitation f . Impedance Z_0 has a magnitude $|Z|$ and a phase φ :

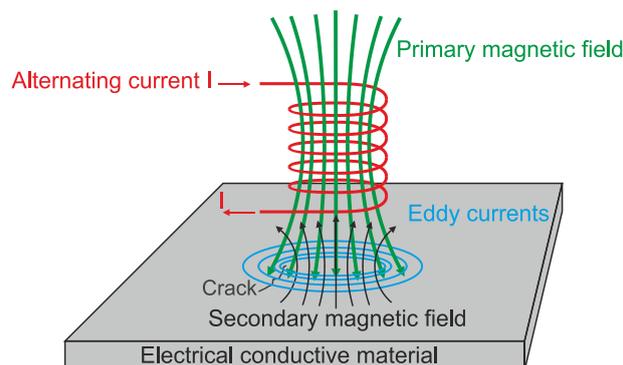
$$Z_0 = \frac{V_0}{I_0} = R_0 + jX_0 = R_0 + j2\pi fL_0 = \sqrt{R_0^2 + X_0^2} \angle_{\varphi=\text{atan2}(X_0/R_0)} = |Z| \angle \varphi \quad (1)$$

When an alternating current energizes a coil, it creates a time-varying magnetic field. The magnetic lines of flux tend to be concentrated at the center of the coil. Eddy current inspection is based on Faraday's electromagnetic induction law as demonstrated in Equation (2). Faraday discovered that a time-varying magnetic induction flux density induces currents in an electrical conductor. The electromotive force ε is proportional to the time-rate change of the magnetic induction flux density Φ_B :

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2)$$

When an alternating energized coil of impedance Z_0 approaches an electrically conductive non-ferromagnetic material, the primary alternating magnetic field penetrates the material and generates continuous and circular eddy currents. The induced currents flowing within the test piece generate a secondary magnetic field that tends to oppose the primary magnetic field, as shown in Figure 1. This opposing magnetic field, coming from the conductive material, has a weakening effect on the primary magnetic field. In effect, the new imaginary part of the coil impedance decreases proportionally when the eddy current intensity in the test piece increases [12]. Eddy currents also contribute to the increasing of the power dissipation of energy that changes the real part of coil impedance. Measuring this coil impedance variation from Z_0 to Z_c , by monitoring either the voltage or the current signal, can reveal specific information such as conductivity and chemical composition of the test piece [13].

Figure 1. Primary and secondary magnetic field. Eddy current on the test piece (adapted from [14]).



2.2. Complex Impedance Plane

This subsection describes the coil impedance changes that occur when a coil probe interacts with materials and presents the normalized impedance plane. When there is no test piece close to the coil sensor, its impedance Z_0 is a complex value, as Equation (3) shows:

$$Z_0 = R_0 + jX_0 \tag{3}$$

where R_0 and jX_0 are the real and the imaginary part of Z_0 . The component $X_0 = 2\pi fL_0$ is proportional to frequency f and the induction coefficient L_0 .

When a conductive test material approaches the energized coil probe, eddy currents appear on the test piece. Eddy currents create a secondary field that interacts with the primary field. As a result, the new impedance is Z_c as Equation (4) demonstrates:

$$Z_c = R_c + jX_c \tag{4}$$

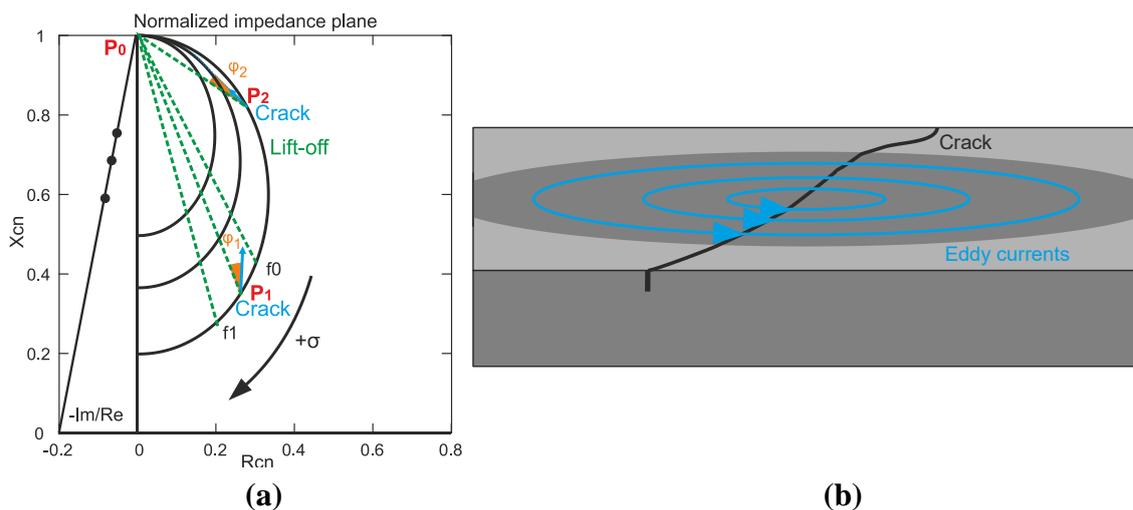
where R_c and jX_c represent the real and the imaginary parts of Z_c , then $X_c = 2\pi fL_c$ is proportional to frequency f and the induction coefficient L_c when a test piece is close to the coil.

Coil impedance is a two-dimensional variable, and the real and imaginary parts can be represented on an impedance plane. The X-axis plots the real part of impedance, and the Y-axis represents the imaginary part. Real and imaginary impedance parts of Z_c can be redefined as R_{cn} and X_{cn} to obtain the normalized impedance as Figure 2(a) shows [12,15]. Equation (5) indicates the transformation:

$$R_{cn} = \frac{R_c - R_0}{X_0}; X_{cn} = \frac{X_c}{X_0} \tag{5}$$

The normalized real part of the new impedance R_{cn} is 0 when there is no change in the real part of the impedance. R_{cn} is divided by the imaginary part of the impedance X_0 when there is no metal near the sensor. X_{cn} represents the number of times that the new imaginary part of Z_c is bigger or smaller than the imaginary part when there is no target X_0 . To summarize, this transformation means that when there is no test piece near the coil the new impedance values become $R_{cn} = 0$ and $X_{cn} = 1$. This point is called “air point” P_0 .

Figure 2. (a) Normalized impedance plane. Lift-off curves and crack displacement at impedance plane for two values of conductivity P1 and P2 (adapted from [12]). (b) Altered eddy current flow by a crack on the surface.



2.2.1. Non-ferromagnetic Material Approach

When a non-ferromagnetic material of conductivity σ_1 approaches the coil probe, encircling eddy currents appear. The displacement of the normalized impedance plane is the line from the air point P_0 to P_1 . This is the lift-off line for this material, in which conductivity is σ_1 . At P_1 $R_{cn1} > 0$ as eddy currents create additional power dissipation on the test piece. However, $X_{cn1} < 1$, which means that $X_c < X_0$. This is the effect of weakening the total field inside the coil core due to the secondary magnetic field from eddy currents.

If less conductive material (σ_2) is approached, $\sigma_1 > \sigma_2$, the displacement is along another lift-off line from air point P_0 to P_2 . Eddy current flow decreases with respect to P_1 . Thus, the change of resistivity of the coil is smaller than P_1 as $0 < R_{cn2} < R_{cn1}$. The secondary magnetic field, due to eddy currents, is not as strong as P_1 so that $X_{cn1} < X_{cn2} < 1$.

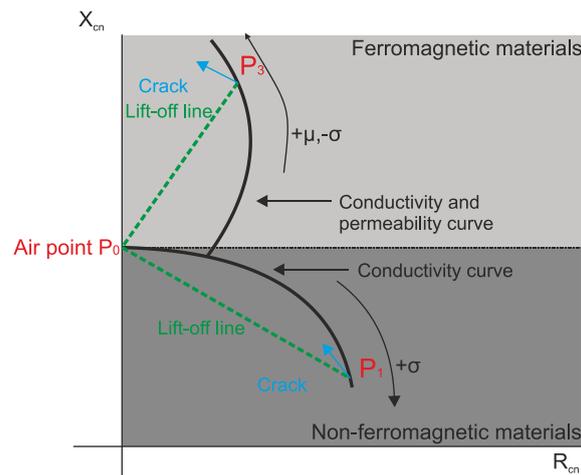
When a crack is present in the test piece, it obstructs the eddy current flow, as Figure 2(b) illustrates. There is a displacement from P_1 or P_2 . This causes the eddy current path to become longer, and the secondary magnetic field from the eddy currents is reduced. In conclusion, the real part of impedance $R_{cn+crack}$, which is related to eddy current dissipation, decreases $R_{cn} > R_{cn+crack}$. In addition to that, the sum of the primary magnetic field and secondary magnetic field increases, which means that the inductive part of impedance $X_{cn+crack}$ increases $X_{cn} < X_{cn+crack}$.

When approaching low conductive materials, differences between the lift-off direction and defect direction are less significant when compared to point P_1 ; therefore, it is more difficult to distinguish between lift-off and defect indications.

2.2.2. Ferromagnetic Material Approach

When a coil probe is in close proximity to a ferromagnetic material, such as steel or pure iron, the reactance $X_{cn} > 1$ increases instead of decreases. Ferromagnetic materials, whose magnetic permeability is greater than the value of non-ferromagnetic materials, concentrate the primary magnetic field of the coil. The increase in the primary magnetic field overshadows the secondary magnetic field of the eddy currents. The displacement is from P_0 to P_3 and occurs in the impedance semi-plane $X_{cn} > 1$, as illustrated in Figure 3.

Figure 3. Impedance plane for ferromagnetic and non-ferromagnetic materials.



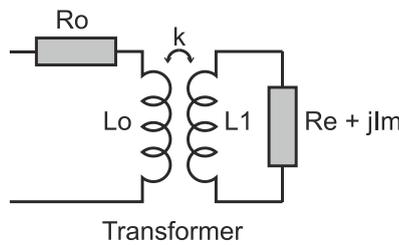
This demonstrates that the impedance plane is divided into two semi-planes as seen in Figure 3. The normalized imaginary part of impedance $X_{cn} < 1$ is the operating area of non-ferromagnetic materials. Lift-off and defects occur in this part of the plane. The normalized imaginary part of impedance $X_{cn} > 1$ is the half part of the plane in which ferromagnetic materials occur.

When a crack appears, it produces the same impedance effects as non-ferromagnetic materials. A decrease in power dissipation $R_{cn} > R_{cn+crack}$ and an increase in the imaginary part of the impedance $X_{cn} < X_{cn+crack}$ occur.

2.3. Eddy Current Transformer Model

The transformer model of Figure 4 presents a diagram of the basic probe-flaw interaction. Some authors such as Placko *et al.* and Peng *et al.* have proposed this model to explain what occurs when the space between a coil probe and a test piece varies [12,16]. The primary circuit, whose impedance is the ratio $Z_c = \frac{U}{I}$, represents the coil sensor. The secondary circuit represents the test piece. The real impedance R_e represents the resistance of the loops described by the flow of eddy currents. The resistor R_e is consequently proportional to the resistivity of the test piece. The imaginary term jI_m represents the leakage inductance of the circuit. Finally, the coupling coefficient k is linked to the distance between the sensor and the test piece. The coefficient k decreases when the distance increases.

Figure 4. Model of coil-target interaction based on a transformer (adapted from [12]).



The following Equations (6) and (7) are obtained from Kirchoff's Voltage Law to describe the transformer in Figure 4:

$$R_0 I + j\omega L_0 I - j\omega M_2 I_e = V \tag{6}$$

$$R_e I_e + jI_m I_e + j\omega L_1 I_e - j\omega M_1 I = 0 \tag{7}$$

where the pulsation ω is related to frequency f as $\omega = 2\pi f$, R_0 and L_0 are the resistance and inductance of the primary coil when no test piece is near the coil, R_e and L_1 are respectively the resistance and inductance of the induced eddy current loop and $M_1 = kL_0$ and $M_2 = kL_1$ are the mutual inductance between the two loops.

When there is no test piece near the coil sensor, the coupling factor k is zero and the measured impedance is Z_0 of the primary circuit as presented in Equation (1). When a conductive test piece is approached, the complex impedance of the primary circuit becomes Z_c as formulated in Equation (8):

$$Z_c = R_0 + jL_0\omega + \frac{k^2 L_0 L_1 \omega^2}{R_e + jL_1\omega + jI_m} \tag{8}$$

The inductance and resistivity of the primary circuit can be identified from Equation (8) as demonstrated in Equations (9) and (10) respectively. The equivalent inductance L decreases due to the induced eddy currents. In contrast, the resistivity increases:

$$L_c = L_0 - \frac{(\omega k)^2 L_0 L_1 (L_1 + I_m / \omega)}{R_e^2 + (\omega L_1 + I_m)^2} \quad (9)$$

$$R_c = R_0 + \frac{(\omega k)^2 L_0 L_1 R_e}{R_e^2 + (\omega L_1 + I_m)^2} \quad (10)$$

From Equation (8) the normalized real and imaginary parts of impedance R_{cn} and X_{cn} are presented in Equations (11) and (12) [12,16]:

$$R_{cn} = \frac{R_c - R_0}{X_0} = \frac{k^2 L_1 \omega R_e}{R_e^2 + (L_1 \omega + I_m)^2} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} X_{cn} = \frac{X_c}{X_0} &= 1 - \frac{k^2 \omega L_1 (L_1 \omega + I_m)}{R_e^2 + (L_1 \omega + I_m)^2} = 1 - \frac{L_1 \omega + I_m}{R_e} \frac{k^2 L_1 \omega R_e}{R_e^2 + (L_1 \omega + I_m)^2} \\ &= 1 - \frac{L_1 \omega + I_m}{R_e} R_{cn} \end{aligned} \quad (12)$$

Assuming that I_m , R_e and L_1 do not depend on the distance between the sensor and the target, the lift-off line for a fixed frequency in the normalized impedance plane can be plotted when the coupling factor k changes.

2.4. Magnetic Field Sensors for Eddy Current Testing

These non-destructive techniques need to pick up the magnetic flux from eddy currents. Many important developments have been made in magnetic sensors during the past 60 years [17]. Novkovski has researched the recent progress of state-of-the-art magnetic field sensors such as inductive coils, fluxgate magnetometers, proton precession magnetometers, superconducting quantum interference devices SQUID, Hall effect devices and magnetoresistors [17]. Nowadays, the trend in magnetometer development is toward miniaturization, and researchers are looking for new ways to reduce the size of these sensors. Section 4 reviews the most common, state-of-the-art sensors used in eddy current testing.

The magnetic field is the result of distributed currents and the distribution of ferromagnetic materials around the sensor [17]. In regions where no currents flow, the induction field is the gradient of a potential V that satisfies Laplace's Equation (13) [18]:

$$\mathbf{B} = -\nabla V, \nabla^2 V = 0, \quad (13)$$

Some authors such as Backus consider a two-dimensional vector field \mathbf{B} defined in some open subset $V = V(z) = V(x, y)$ of the Euclidean plane where $z = x + iy$ [19]. The field \mathbf{B} has real and imaginary components, as Equation (14) demonstrates:

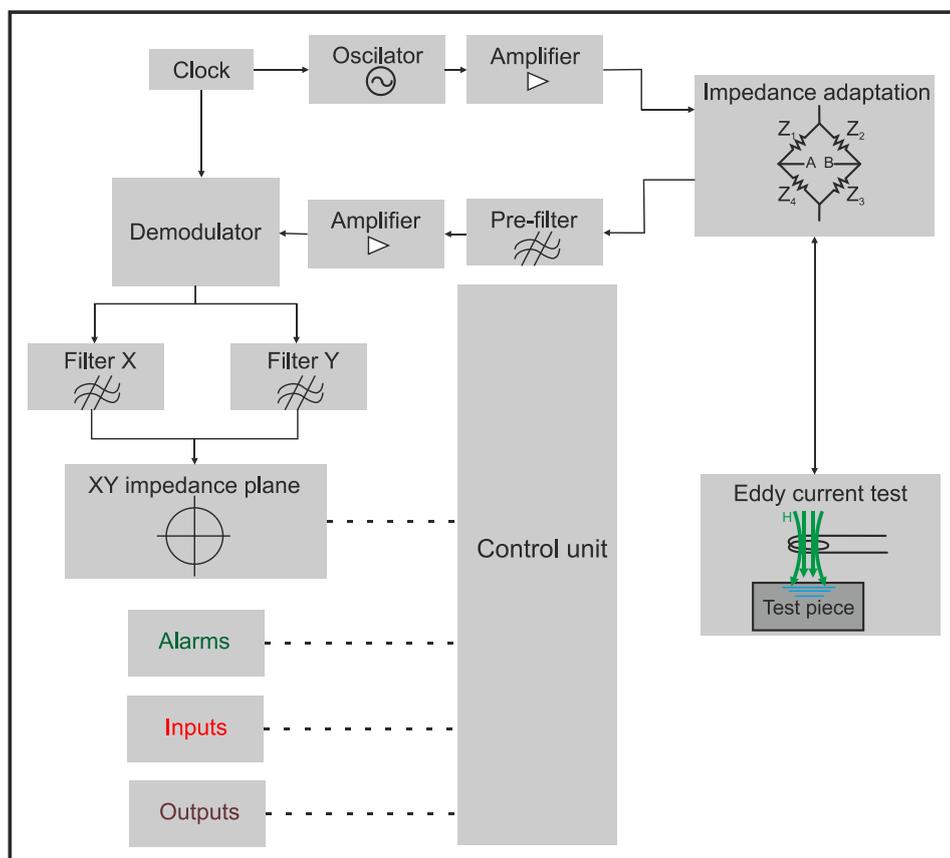
$$\mathbf{B} = B_x(x, y) - iB_y(x, y) \quad (14)$$

Determining the real and imaginary components of \mathbf{B} has several applications. For instance, by measuring the field on a grid of points, it is possible to reconstruct the currents [17]. This is an inverse problem which is solved in many non-destructive tests [17].

2.5. Elements of a Basic Inspection System

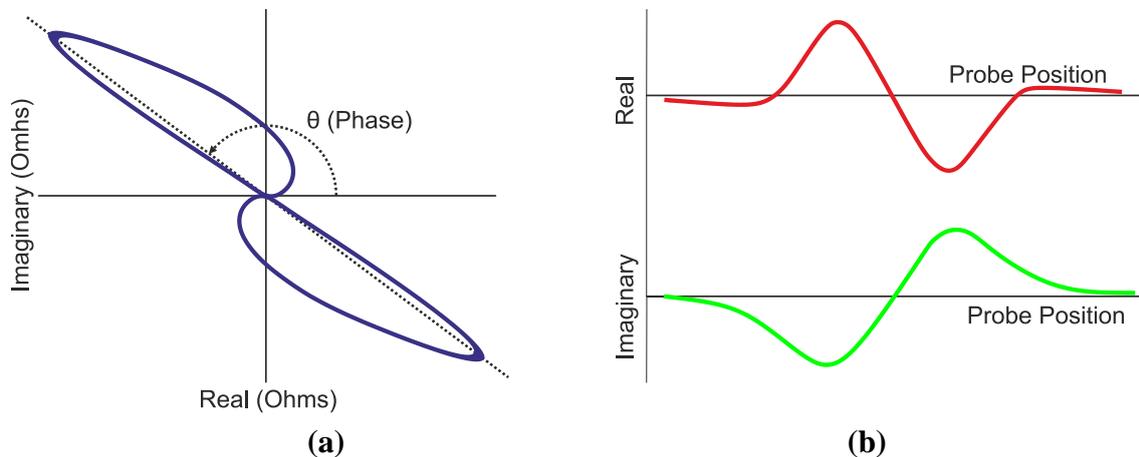
Figure 5 presents a block diagram of analog eddy current equipment. It includes a single tone generator which energizes the test coil sensor. Phase, frequency and amplitude can be adjusted to optimum parameters for the test pieces. When a crack occurs, the coil impedance experiences a change. The defect signal modulates the tone from the oscillator. A quadrature amplitude demodulator extracts the defect signal caused by the impedance variation. The demodulator outputs are X-axis and Y-axis signals. Each component represents the real and imaginary parts of the impedance respectively. These signals can be filtered and analyzed.

Figure 5. Block diagram of an analog eddy current system.



The voltage signals, which represent the impedance changes in the inspection coil, can be displayed on a XY plot. Figure 6 illustrates a typical loop of an impedance plane on a XY plot when a flawed tube is inspected using a differential coil probe. Most eddy current systems permit configuring of alarms on an XY plot to distinguish between flawed or unflawed test pieces. Alarm events can activate analog or digital outputs. In addition, modern eddy current equipment usually has digital inputs such as test piece presence or encoder connectors to start testing or to measure the speed of inspected bars or tubes respectively.

Figure 6. (a) Typical loop of a complex impedance plane of a differential probe inside a tube affected by a flaw (adapted from [13]). (b) Real and imaginary part of impedance change vs. time (adapted from [13]).



3. Main Variables of Eddy Current Testing

This section discusses the main variables of eddy current inspection. These variables include the electrical conductivity and the magnetic permeability of the test piece, lift-off between the coil sensor and the inspected piece, the coil fill factor for encircling probes, the edge effect, the skin effect of current distribution in the test piece, the phase lag and the signal to noise ratio. The last subsection overviews the relation between the equivalence model of eddy current sensors and their applications.

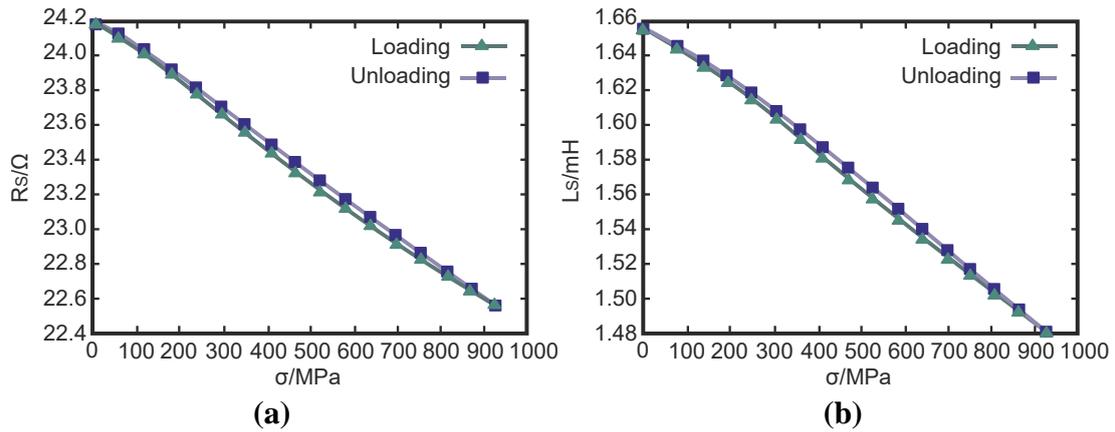
3.1. Electrical Conductivity of the Test piece

Materials have a characteristic resistance to the flow of electricity which is characterized with the magnitude electrical conductivity σ or its inverse resistivity $\rho = \frac{1}{\sigma}$. Conductivity is crucial in eddy current inspection.

Highly conductive materials such as copper and aluminum create intense eddy currents and have two advantages over less conductive materials. First, cracks generate higher signal levels, as the impedance plane in Figure 2(a) illustrates. In addition to that, the phase lag between the flaws and lift-off line is larger when highly conductive materials are tested, that is $\varphi_1 > \varphi_2$ as Figure 2(a) shows. The disadvantage of highly conductive materials is that the standard penetration depth is lower at a fixed frequency than in lower conductive materials such as steel and stainless steel. Factors that exert an influence in conductivity are the temperature of the test piece, the alloy composition and the residual stress, which is related to the atomic structure.

Many authors have measured residual stress using eddy current techniques. Coils can detect very small stress variations in ferromagnetic steels due to the magneto-elastic effect [20]. Stress can be measured based on the changes in the impedance of an electromagnetic coil as Figure 7(a,b) shows [21]. The impedance change occurs due to variations in the electrical conductivity and the magnetic permeability of the test piece.

Figure 7. (a) Resistance as a function of mechanical stress (adapted from [21]). (b) Inductance as a function of mechanical stress (adapted from [21]).



Heat treatments cause variations of hardness, which are related to conductivity, as Figure 8 illustrates. Eddy currents can detect when pieces have received a heat treatment as well as the severity of the treatment. The eddy current testing can also characterize grain size changes after thermal treatment based on conductivity and magnetic permeability changes [22]. As Figure 9 shows, the hardness is inversely proportional to the grain size [22].

Figure 8. Variation of aluminum conductivity with heat treatment (adapted from [23]).

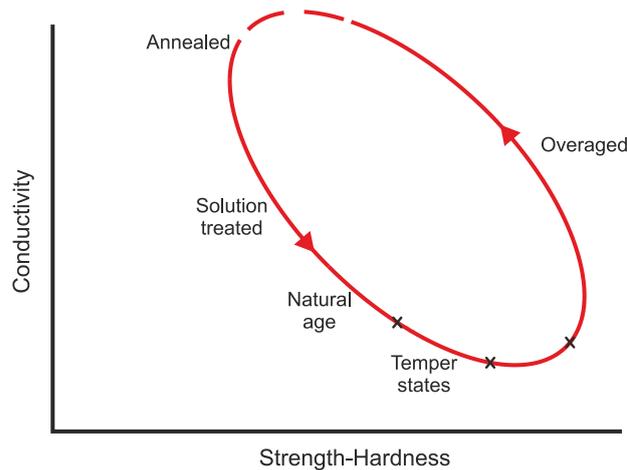
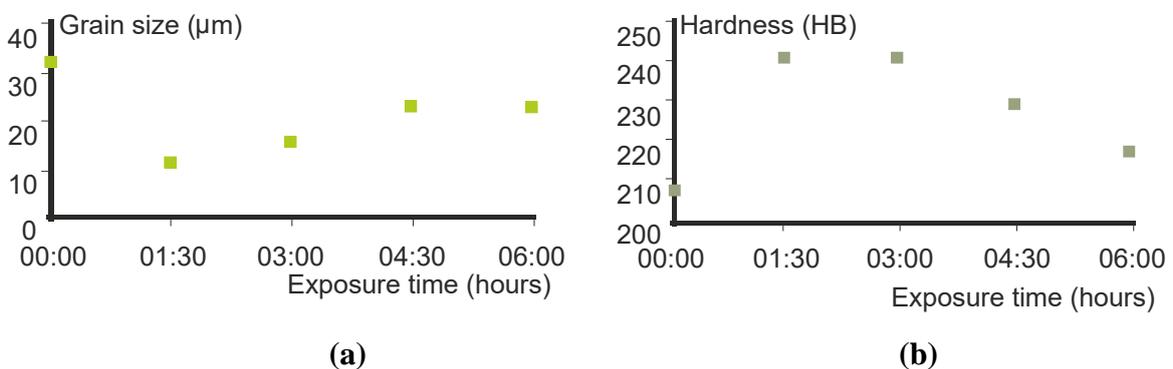


Figure 9. (a) Grain size versus exposure time, 20NC6 steel (adapted from [22]). (b) Hardness (Brinell) versus exposure time, 20NC6 steel (adapted from [22]).



Some authors have published papers related to the conductivity of the test piece, as it is one of the most important variables in eddy current testing. Shao *et al.* presented a method for the reconstruction of conductivity profiles from eddy current impedance change data [24]. This is an inverse problem which solves the conductivity profile of the material from the electrical signal obtained in the eddy current inspection. On the other hand, other authors such as Uzal *et al.* have published numerical and analytical methods for computing the coil impedance when arbitrary radial conductivity changes occur in the test piece [25].

3.2. Magnetic Permeability

Magnetic permeability μ is a number that quantifies the degree of magnetic induction B of materials when a magnetic field H is applied, as shown in Equation (15):

$$B = \mu H \quad (15)$$

Magnetic permeability μ is a scalar in isotropic mediums. Free space has a characteristic permeability constant μ_0 . In many instances, the permeability of materials is expressed as relative permeability μ_r in respect of free space μ_0 as Equation (16) shows:

$$\mu = \mu_r \mu_0; \text{ where } \mu_0 = 4\pi * 10^{-7} N/A^2 \quad (16)$$

Materials can be classified by their magnetic properties which strongly affect the eddy current testing. The most common classification of materials depending on their magnetic response is presented below:

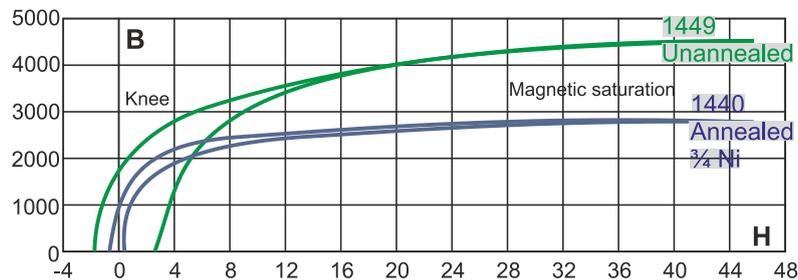
- Firstly, paramagnetic materials, such as aluminum, are softly attracted to magnetic fields and, hence, have a relative magnetic permeability slightly greater than one, $\mu_r \geq 1$.
- Secondly, diamagnetic materials like copper and lead create a magnetic field in opposition to an externally applied magnetic field, thus causing a softly repulsive effect. Magnetic permeability is less than μ_0 ; therefore, the relative permeability is a bit less than one, $\mu_r \leq 1$.
- The third group of this classification is formed by ferromagnetic materials such as iron, nickel, cobalt and some of their alloys. These materials are strongly attracted by magnetic fields and concentrate the flux of magnetic fields. Their relative permeability is much greater than one $\mu_r \gg 1$. One hundred or two hundred are typical values of relative permeability.

Figure 10 shows two magnetization curves of unannealed and annealed steel and plots the relation between B and H fields [26]. The relationship between H and B is not linear and presents hysteresis in ferromagnetic materials. The curve may be divided into two parts divided by the knee of the curve. The first part of the curve has the greater slope, and the second part has the smaller slope [27]. Saturation state is reached when the increase of H causes very little increase in B , as Figure 10 indicates.

High magnetic permeability makes the standard penetration depth decrease. In order to compensate for this effect and explore the material internally, ferromagnetic materials are inspected at lower frequencies than non-ferromagnetic ones.

Ferromagnetic materials have a characteristic property, which is a high permeability variation that presents particular difficulties when testing eddy current flow [28]. The following subsection explains this phenomenon.

Figure 10. B-H curve in high nickel steel (adapted from [26]).



3.2.1. Magnetization of Ferromagnetic Materials

Large variability in magnetic permeability is a characteristic of ferromagnetic materials. This permeability variation strongly influences the eddy current flow. However, eddy current tests can also be applied to ferromagnetic materials, as the conductivity changes when a crack is close to the coil probe.

The disadvantage of inspecting magnetic materials is that permeability changes generally have a much greater effect on eddy current response than conductivity variations. This heterogeneity means that crack detection is not possible when permeability changes randomly. The equalization of the permeability is often related to how the test piece was manufactured [28]. The heterogeneity of permeability for cast iron is stronger than that of carbon steel [28].

This is a problem that many authors have taken into account. Uzal *et al.* calculated the impedance of a cylindrical air-core probe over a layered metallic material whose conductivity and permeability varied continuously as arbitrary functions of the depth [29].

The solution allowing the accuracy of the measurement of ferromagnetic materials is a process that equalizes permeability [28], such as a magnetization by means of a saturating direct-current coil. Saturated materials have a constant magnetic permeability and can be inspected with greatly reduced influence on permeability variations. The test piece must be adjacent to the magnetizer coil. The magnetization current must be sufficiently strong enough to produce magnetic saturation. Furthermore, ferromagnetic materials can be magnetized randomly due to industrial processes which present difficulties in eddy current testing. Research has been conducted in order to explore magnetizing systems for eddy current inspection. For example, Kasai *et al.* have used magnetization to cancel external magnetism [30].

3.3. Lift-Off

The lift-off is the impedance change that occurs when there is variation in the distance between the inspection coil probe and the test piece. The lift-off variations can be caused by varying coating thicknesses, irregular sample surfaces or the operator's movements [31]. The magnetic field is stronger close to the coil, so lift-off is stronger near the probe. In many applications, eddy current

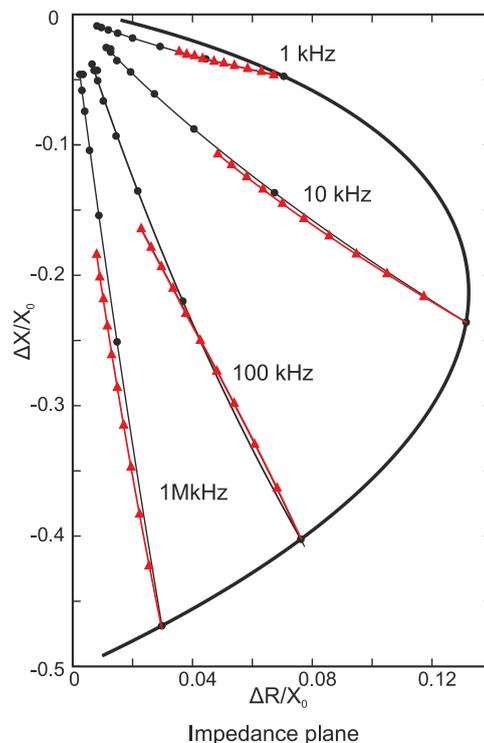
measurements are adversely affected by lift-off [32]. Lift-off is considered a noise source and it is undesirable in defect detection. Lift-off could occur in the same direction as the crack, thereby concealing the crack response. Therefore, the distance between the probe and metal must be as constant as possible in order to avoid lift-off.

At the normalized impedance plane of Figure 11, the lift-off curves start at the air point (0,0), when there is no test piece. In this case, air point is (0,0) instead of (0,1) as discussed in the previous section because a different transformation in the Y-axis has been used as shown in Equation (17). Air point corresponds to $X_c = X_0$ and therefore the normalized imaginary part is null $X_{cn} = 0$:

$$X_{cn} = \frac{X_c - X_0}{X_0} \quad (17)$$

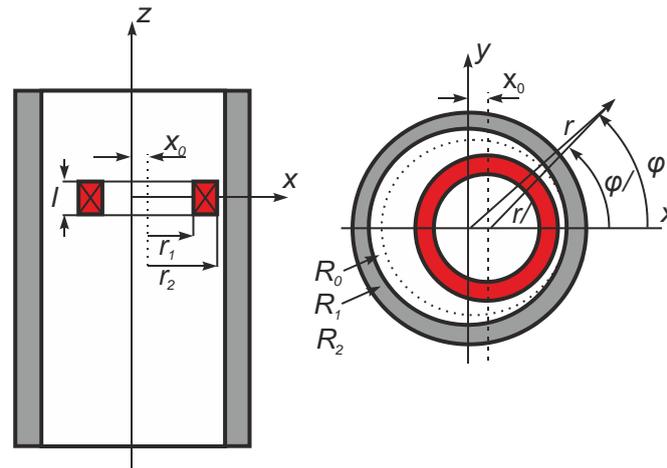
Figure 11 plots lift-off lines in steps of 0.1 mm. The impedance values are plotted using triangles. In some cases, when measuring the thickness of non-conductive coatings over metal, lift-off is employed as a useful property. Figure 11 demonstrates that when the test piece is closely adjacent to the coil probe, the triangle separation is larger than when the test piece is further away. This means that the resolution to measure non-conductive coatings is greater for thin coatings [33].

Figure 11. Lift-off in steps of 0.1 mm (triangle) and tilt in steps of 10° (round) for a normalized impedance plane (adapted from [33]).



Lift-off is explained using a coil whose axis is normal to the test piece. However, lift-off also occurs when the test is conducted using encircling probes. The vibration of the rod or the tube inside the probe generates noise which presents difficulties in conducting inspections. Some authors including Theodoulidis *et al.* were conscious of lift-off testing tubes. They presented an analytical model of wobble in heat exchanger tube inspection with bobbin coils [34]. Figure 12 illustrates the offset position of the tube inside the bobbin coils.

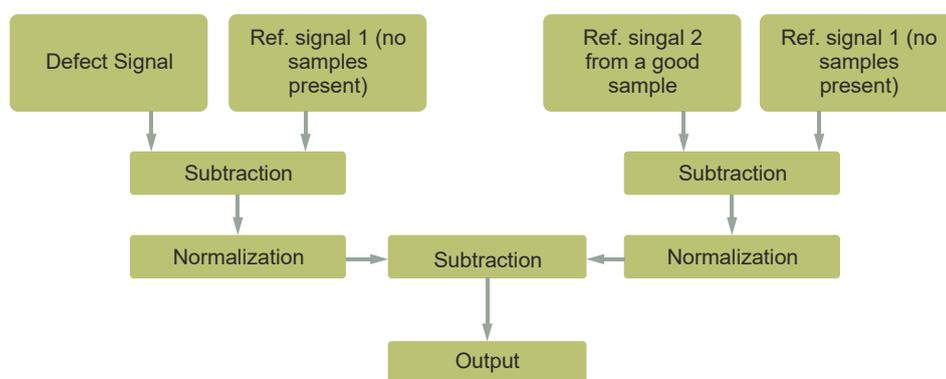
Figure 12. Wobble simulation: a bobbin coil in an offset position to a tube (adapted from [34]).



There are methods for lift-off compensation when eddy currents are used in order to detect cracks and lift-off becomes an undesired variable. For instance, Yin *et al.* researched dual excitation frequencies and coil design to minimize the lift-off effect [32]. Research into processing data is also conducted, with a view to minimizing the lift-off effect. Lopez *et al.* proposed the use of wavelets to remove eddy current probe wobble noise from steam generator tubes [35]. Reduction of the lift-off effect has also been attempted by optimizing the coil design [36] and sensor array.

Authors such as Gui Yun *et al.* have researched the reduction of lift-off effects via normalization techniques [31]. The technique can be applied to the measurement of metal thickness beneath non-conductive coatings and to the measurement of microstructure and strain/stress, where the output is highly sensitive to the lift-off effect. They proposed an approach using two reference signals calculated in two stages as Figure 13 shows.

Figure 13. Diagram block using normalization to reduce lift-off effect (adapted from [31]).



The first stage was aimed to reduce the lift-off effect and used the first reference signal $y_{air}(n)$ obtained when the probe was in the air. By doing so, they created a newly derived defect signal $y'_x(n)$ that was relatively free of lift-off variation as Equation (18) shows:

$$y'_x(n) = \frac{y_{air}(n) - y_x(n)}{\max(y_{air}(n) - y_x(n))} \tag{18}$$

where the defect signal is $y_x(n)$, $n = [1, 2, \dots, N]$ and N is the number of sampled data for each signal.

The second stage was to work out the crack information. They used a second reference signal $y_{ref}(n)$, which was obtained from a good sample part. They also derived the normalized reference signal $y'_{ref}(n)$ as Equation (19) shows:

$$y'_{ref}(n) = \frac{y_{air}(n) - y_{ref}(n)}{\max(y_{air}(n) - y_{ref}(n))} \quad (19)$$

Finally, a new differential signal was worked out as Equation (20) indicates. The authors obtained a significant lift-off reduction:

$$d'_y(n) = y'_x(n) - y'_{ref}(n) \quad (20)$$

3.4. Fill Factor

Fill factor is a number which measures how well the test piece fills the coil in external encircling probes. It can be calculated as Equation (21) demonstrates:

$$fill_{factor} = \frac{(Diameter_{test_piece})^2}{(Diameter_{coil})^2} \quad (21)$$

where $Diameter_{test_piece}$ is the test piece diameter and $Diameter_{coil}$ is the diameter of the coil probe, assuming that both diameters are measured in the same units.

Fill factor is the ratio of the cross sectional area of the test piece and area of the coil section. It is necessary that the coil wires be as close as possible to the test piece, in order to have a greater response potential to cracks. In other words, it is desirable for the fill factor to be as near as possible to unity. For the internal inspection of tubes, a probe is introduced using a guidance system. The fill factor is redefined as follows in Equation (22) where it also demonstrates the desire that is nearer to one:

$$fill_{factor} = \frac{(Diameter_{coil})^2}{(Diameter_{test_piece})^2} \quad (22)$$

where $Diameter_{coil}$ is the outer diameter of the coil probe and $Diameter_{test_piece}$ is the inner diameter of the test piece, assuming that both diameters are measured in the same units.

3.5. Edge Effect

Edge effect is a phenomenon that occurs when an inspection coil is at the end of the test piece. In these instances, eddy current flow is distorted as currents cannot flow at the edge. So, in order to avoid the confusion with flaws, inspection is limited near edges. The distance where the edge effect is present is from approximately one to three times the diameter of the inspection coil in the case of encircling probes. So a reduction in coil size reduces the edge effect, although there is a limit, as the diameter of external encircling coils must be higher than that of the inspected materials.

Some authors have specifically addressed the edge effect in their research. For instance, Theodoulidis *et al.* proposed a model to calculate the quasi-static electromagnetic field of a cylindrical coil in the vicinity of the edge of a metal block [37]. The authors obtained some analytical expressions of fields that provided a better understanding of the edge effect and formed the basis of a procedure for solving a whole class of edge related problems.

3.6. Frequency and Skin Effect

Frequency inspection in eddy current testing is crucial to detecting flaws. When fixing a frequency, the initial coil impedance Z_0 is adjusted. When inspection frequency f is increased, the imaginary part of the impedance is increased as Equation (23) demonstrates:

$$Z_0 = R_0 + j2\pi fL_0 \quad (23)$$

where $X_0 = 2\pi fL_0$ is the inductive reactance of the coil in ohms (Ω), f is the test frequency in Hertz (Hz) and L_0 is the inductance in Henrys (H).

Eddy current flow is not uniformly distributed throughout the entire volume of test pieces. Current flow is stronger at the surface, decreasing exponentially by increments in relation to the distance from the surface. Assuming that the current density flowing along X axis, Equation (24) represents this current flux:

$$\vec{J} = J_x(z, t) * \vec{u}_x \quad (24)$$

where \vec{u}_x the unitary vector along X axis and $J_x(z, t)$ is the magnitude of density current as function of depth z and time t . Equation (25) shows the phasor of the current density along depth (Z axis) [38]:

$$J_x(z) = J_{0,max} e^{-\frac{z}{\delta}} e^{j(\alpha_0 - \frac{z}{\delta})} \quad (25)$$

where $J_{0,max}$ is the maximum current density at surface and z is depth. The standard penetration depth δ is the depth at which the eddy-current density decreases to a level of about 37% of its surface value. The term α_0 is the phase at $t = 0$ and $z = 0$ and $-\frac{z}{\delta}$ is the phase lag. Equation (26) demonstrates the current density as a real signal [38]. This equation is extracted from Equation (25) taking the real part. It reveals that the current density phase varies 1 radian when the distance traveled from the surface is δ :

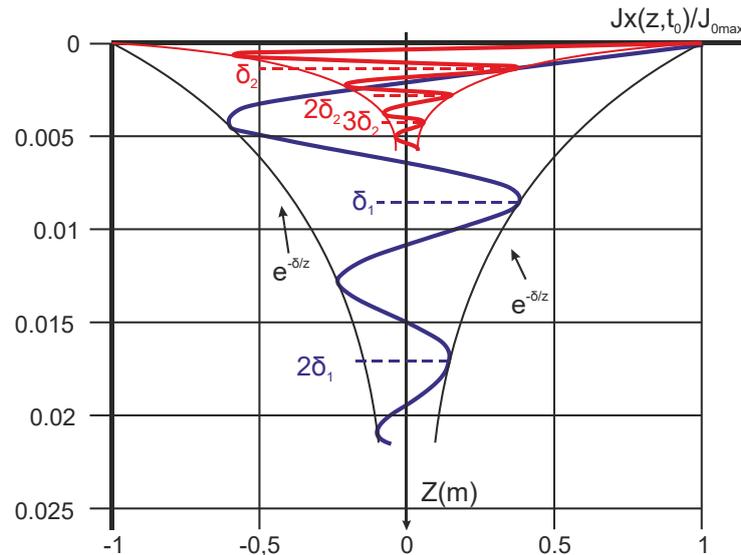
$$J_x(z, t) = Real(J_x(z) * e^{j\omega t}) = J_{0,max} e^{-\frac{z}{\delta}} \cos\left(\omega t + \alpha_0 - \frac{z}{\delta}\right) \quad (26)$$

Standard penetration depth depends on electrical conductivity, the magnetic permeability of the test material and on the eddy current frequency. Standard penetration depth is lower as conductivity, permeability or inspection frequency increase. The penetration depth can be calculated as Equation (27) expresses [38]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\omega\sigma}} \quad (27)$$

where δ is the standard depth of penetration in meters, σ is the conductivity in $1/(\Omega m)$, μ is the magnetic permeability $\mu = \mu_r \mu_0$ and $\omega = 2\pi f$. The testing frequency f is in Hz. Resistivity ρ is the reciprocal of conductivity $\rho = 1/\sigma$. As an example, Figure 14 illustrates the electromagnetic field penetration inside aluminum at two different frequencies (200 Hz and 10 kHz) [38]. Typical values of standard penetration depth for pure aluminum are 5.99 mm at 200 Hz and 0.847 mm at 10 KHz.

Figure 14. Electromagnetic field penetration inside pure aluminum at frequencies of 200 Hz and 10 KHz (adapted from [38]).



Equation (27) demonstrates that low frequency tests increase the standard depth of penetration and are more suitable for inspecting subsurface flaws. Some authors have researched the detection of subsurface defects, including Ramos *et al.* regarding the characterization of depth profiles of subsurface defects in aluminum plates [38].

Skin effect is also a limiting factor of increasing frequency as desired. The thickness of the inspected material must be two or three times the standard depth of penetration to prevent the eddy current flow from appearing on the other side of the test piece.

Typical inspection frequencies in eddy current testing are in the range of 100 Hz–10 MHz. Most authors such as Ditchburn *et al.* [39] and Thollon *et al.* [15] use this range. However, a few authors such as Owston use higher frequencies. Owston described a high frequency eddy-current apparatus working at 25 MHz for detecting surface defects and thin metallic coatings [40].

Low frequency tests are commonly used in the inspection of ferromagnetic materials to compensate for their high permeability and penetrate into the test piece. On the other hand, the inspection of small discontinuities occurring in the near-surface region is recommended at high frequency to maximize eddy current flow at the surface.

Skin effect and other parameters such as the crack morphology and crack position with respect to the surface determine a band of operating frequencies where the cracks are detectable. At the optimum frequency of testing, the crack sensitivity reaches the maximum.

3.6.1. Multi-frequency Techniques

Multi-frequency techniques are widely used in non-destructive eddy current testing. Multi-frequency testing operates at two or more test frequencies. Multi-frequency techniques expand the capabilities of single-frequency testing and save time since they allow simultaneous tests. Multi-frequency testing is also applied to cancel out undesired signals in order to improve the signal-to noise ratio [41].

The multi-frequency process uses a composite signal and subtracts the undesirable signal. Noise sources that can be minimized are probe lift-off, temperature variation, and geometrical changes in the material [41].

Multi-frequency techniques are usually accomplished by combining the results obtained at different frequencies in the spatial domain. For instance, the authors Liu *et al.* proposed a pyramid fusion method to integrate two-dimensional spatial domain with multi-frequency injection [41]. A signal-to-noise ratio criterion was adopted to evaluate the fusion results which demonstrated the potential of signal enhancement via fusion strategy.

Other authors combined raster scanning and multi-frequency techniques. Raster scanning produces images of the impedance or impedance changes over a two-dimensional (2-D) surface. These acquired images are complex values because the impedance produces complex data. Image processing techniques can be applied to detect cracks using eddy current testing. Bartels *et al.* have proposed a multi-frequency eddy current image processing technique for the non-destructive evaluation of materials [42]. 2-D eddy current testing generated a sequence of complex valued images which were linearly combined to maximize the signal-to-noise ratio SNR of features of interest. This technique consisted of a selection of weights for a linear combination of the images as shown in Equation (28) [42]:

$$d(x, y) = \sum_{i=1}^{2N_f} c_i f_i(x, y) \quad (28)$$

where $d(x, y)$ is the linear combination of images, N_f is the number of test frequencies and $f_1 = \text{real}(h_1)$, $f_2 = \text{imag}(h_1)$, $f_3 = \text{real}(h_2)$, $f_4 = \text{imag}(h_2) \dots$ are extracted from the 2-D images $h_1, h_2 \dots h_{N_f}$. Results on experimental data demonstrate SNR improvement up to 1100 percent over traditional two-frequency techniques.

3.6.2. Pulsed Eddy Current Testing

Conventional eddy-current equipment employs a single sinusoidal excitation. These systems are strongly limited by the depth of penetration of eddy currents. Therefore, conventional systems are useful for detecting surface and near-surface cracks up to a depth of a few millimeters below the surface [43]. A solution to increase the subsurface testing is to reduce the operational frequency in order to increase the standard skin depth. However, in many cases the signal-to-noise ratio is reduced, as Faraday's voltage law states that the induced voltage in coil sensors is proportional to the rate of change of the magnetic field.

In contrast to the conventional eddy-current instrument, pulsed instruments generate square, triangular or a saw tooth waveform [44]. These waveforms have a broad spectrum of frequencies; hence, pulsed eddy current testing techniques provide more information than traditional eddy current testing methods that can be used for the detection and characterization of hidden corrosion and cracking [45]. The data at different frequencies can be correlated to obtain the defect depth.

Pulsed eddy current instruments are classically implemented with one double-function coil or two separate coils formed by a transmitter and a receiver coil. Some authors such as Dolabdjian *et al.* employed a high-performance giant magnetoresistance magnetometer instead of the receiver coil [46].

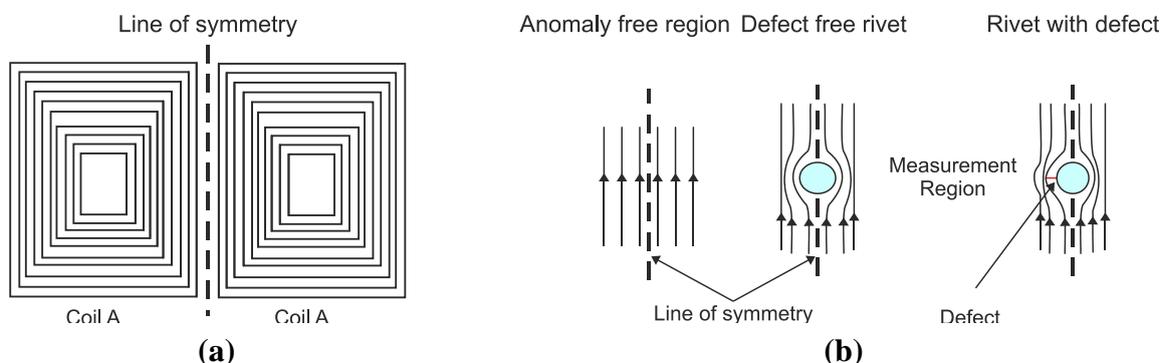
Pulsed eddy current systems rival single or multifrequency testing, since the advantage of a transient system is that the response contains as much information as an entire spectrum of frequency-domain excitations [46]. The performance of defect classification using the pulsed technique is better than the conventional method [47].

Pulsed eddy current is useful for more than just crack detection. Haan *et al.* have used pulsed eddy current to accurately characterize the permeability and the conductivity [48, 49]. Taking a reference measurement of an object with a known thickness, they also determined the thickness of several types of carbon steel materials, which was proportional to the product of conductivity and magnetic permeability.

Typical features such as peak amplitude and zero-crossing time of pulses are employed to detect and characterize defects [50]. A Hilbert transform can also be computed to extract a new descending point feature of the received pulses [51].

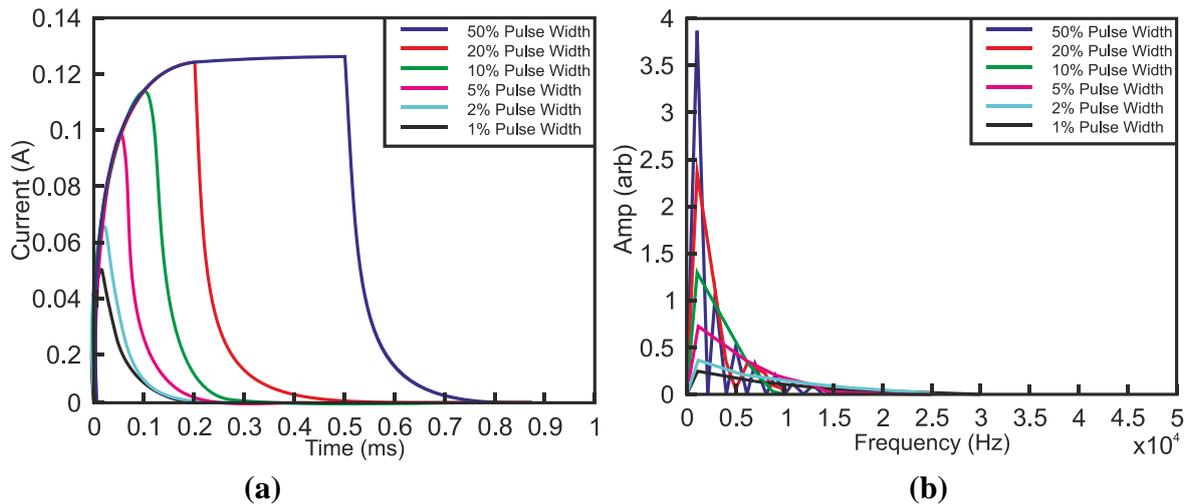
Some authors have conducted research into pulsed eddy-current techniques. Many years ago, in 1969, Waidelich *et al.* researched the attenuation of a pulsed field by a conducting sheet [52]. They investigated how to increase the spatial resolution by putting the coil probe in a copper enclosure with a small aperture. Other authors such as Guang *et al.* presented a system for the inspection of aircraft structures [43]. The system generated pulse excitation that energized a planar multi-line coil of Figure 15(a). The transient field was detected via a giant magnetoresistive GMR field sensor placed on the line of symmetry at the center of the source coil. In the absence of discontinuities, the normal component of the magnetic field was zero at the center of the source coil. When the uniform distribution of the induced currents was distorted by a rivet and/or crack as sketched qualitatively in Figure 15(b) the zero field on the line of symmetry was destroyed and a nonzero transient signal of the normal component was measured by the GMR sensor.

Figure 15. (a) Schematic of the multi-line coil for inducing linear eddy currents (adapted from [43]). (b) Induced eddy current flow in the absence and presence of rivet and cracked rivet (adapted from [43]).



Other researchers such as Abidin *et al.* studied the influence of duty cycle in pulses testing rivet joints [53]. Figure 16(a) shows different pulse width excitations, and Figure 16(b) shows spectrum distribution. Wider pulses are richer in low-frequency components compared to narrower pulses that are dominated by high-frequency components.

Figure 16. (a) Excitation current input with varied pulse width (adapted from [53]). (b) Spectrum distribution under different pulse widths (adapted from [53]).



3.7. The Phase Lag

The phase lag is the parameter that permits the user to obtain information regarding the depth of a defect within a material. The phase lag is represented by the term $\varphi = -\frac{z}{\delta}$ in Equation (29) [38].

The phase lag represents the shift in phase between the defects on the surface and defects at z distance from the surface:

$$J_x(z, t) = J_{0,max} e^{-\frac{z}{\delta}} \cos \left(\omega t + \alpha_0 - \frac{z}{\delta} \right) \quad (29)$$

The phase lag depends linearly with depth z . When the defect is at one standard depth of penetration $z = \delta$, the phase lag φ is $\varphi = 1 \text{ radian} \approx 57^\circ$. When it is at two standard depths of penetration $z = 2\delta$, the lag occurs at $\varphi = 2 \text{ radian} \approx 114^\circ$ with respect to surface cracks. As a result, the phase lag can be used to determine the depth of subsurface defects. Using the complex impedance plane, the lift-off line can be taken as a reference phase as it occurs on the surface. Flaw direction can be measured with respect to the lift-off phase. It is desirable to have phase resolution between the lift-off line and cracks.

3.8. Signal-to-Noise Ratio

The signal-to-noise ratio (SNR) is a parameter that quantifies the number of times that the signal amplitude from the response to a crack is greater than the signal amplitude of the background noise. Noise sources limit eddy current testing. Some of the main noise sources in eddy current testing are temperature variations, lift-off, changes in the electromagnetic properties of the material such as conductivity or magnetic permeability and changes in test speed. Some methods for maximizing the SNR are listed below.

The simplest way to increase the SNR is to amplify the signal level. However, amplifiers increase the noise level and introduce their own noise. Therefore, there is a limit to the number of amplification stages that can be applied.

Another way to minimize noise is filtering. Filtering is possible if the perturbation is not in the pass band of the desired signal. Also, if there is phase difference between defects and the noise source, then phase discrimination techniques can be applied.

In addition, some types of coil probes are less influenced than others by some noise sources. For instance, self-compensated differential coil probes are less sensitive to small variations in diameter, conductivity or magnetic permeability than absolute coil probes. In some instances, copper shields cover the probes to decrease the pick-up noise from external sources; therefore, they increase the signal to noise ratio.

Coil size is also crucial in order to obtain a high-level signal for crack detection. It is crucial that the fill-factor is close to one in the case of encircling coil probes, and it is also crucial that the coil size is similar to the crack size. Some authors such as Grimberg *et al.* [54] take the coil size into account.

Another technique used to maximize the SNR is magnetization. As explained in the previous section, direct current magnetization minimizes the effect of permeability variations in ferromagnetic materials.

The last proposed method to improve the SNR is the selection of the most suitable sensor, as every sensor has limitations in sensitivity and noise level. In some applications, the magnetic field levels are so low that standard coil probes cannot be used to detect them. In these instances special magnetometers such as superconducting quantum interference devices (SQUID) are sensitive to extremely low field levels. SQUIDs have been used in eddy current testing for 30 years [55]. However, the disadvantage of SQUIDs is that they require a cryostat to maintain them at very low temperatures.

3.9. Equivalence Model of Eddy Current Coil Sensors for Applications

This subsection presents a review of the equivalence model of eddy current sensors and its relation to applications. Eddy current testing uses the electromagnetic properties of materials that depend on their composition, microstructure and the applied and residual stresses [22]. These properties are measured via the impedance Z_c described in Section 2, which is a function of lift-off, target conductivity σ , target magnetic permeability μ and the eddy current frequency f as Equation (31) shows:

$$Z_c = R_c + jX_c = \text{function}(\text{lift-off}, \sigma, \mu, f) \quad (30)$$

Some authors such as Tian *et al.* have researched the influence of the heterogeneity of the test piece in eddy current sensors [28]. When measuring one of these variables, such as lift-off, in Equation (30), conductivity σ and permeability variations of the test piece are noise sources that influence the test. When frequency f is high enough, the approximation shown in Equation (31) can be done [28]:

$$L_c = L_0 - \frac{(\omega k)^2 L_0 L_1 (L_1 + I_m/\omega)}{R_e^2 + (\omega L_1 + I_m)^2} \approx L_0 - \frac{M^2}{L_1} \quad (31)$$

Increasing the excitation frequency can suppress the influence of the non-equalization of the conductivity of the test piece R_e as $R_e \ll \omega L_1$. The heterogeneity in non-ferromagnetic metals such as aluminum and copper due to conductivity variations is much lower than that in ferromagnetic metals,

since the conductivity for aluminum and copper is much smaller than those of steel and cast iron which allow the approximation of $R_e \ll \omega L_1$ to be more true.

The effect of magnetic permeability heterogeneity in non-ferromagnetic targets is much less than the heterogeneity of ferromagnetic targets. The measuring accuracy of non-ferromagnetic targets can be higher than that of ferromagnetic targets.

With regard to microstructure, Mercier *et al.* used eddy currents to evaluate steel decarburizing in the austenitization process [8]. Decarburizing can change the microstructure and the mechanical properties of steel. Changes in electrical conductivity and magnetic permeability occur in the decarburized surface.

Zergoug *et al.* analyzed the relation between mechanical micro-hardness and impedance variations in eddy current testing [22]. The characterization of the microstructure modifications due to heat treatment and corrosion by eddy currents permitted the measuring of mechanical and metallurgical parameters of materials.

In ferromagnetic materials, the use of a low frequency provides a good impedance resolution. The most significant result in the case of ferromagnetic materials characterization is the relationship between the electric and magnetic parameters and the hardness and the grain size. The hardness is inversely proportional to the grain size.

Schoenekess *et al.* detected tensile stress alterations in prestressing steel using eddy current testing [56]. Changes in mechanical stress shift the electrical conductivity and magnetic permeability of the material and are always very small, typically less than 1% [57]. Temperature compensation of the entire measurement system was absolutely necessary to minimize measurement errors.

4. Sensors

There are many types of magnetic sensors for non-destructive evaluation such as solenoid coil probes, superconducting quantum interference devices (SQUIDS) and Hall-effect and magnetoresistive sensors. This section presents these types of sensors and includes the most recent research of authors in sensor design.

4.1. Coil Probes

Coil probes are the most widely used sensors in eddy current inspection. This subsection presents a discussion regarding different coil probe types, the most important parameters in coil probes and the circuitry used to pick up signals.

4.1.1. Coil Probe Types

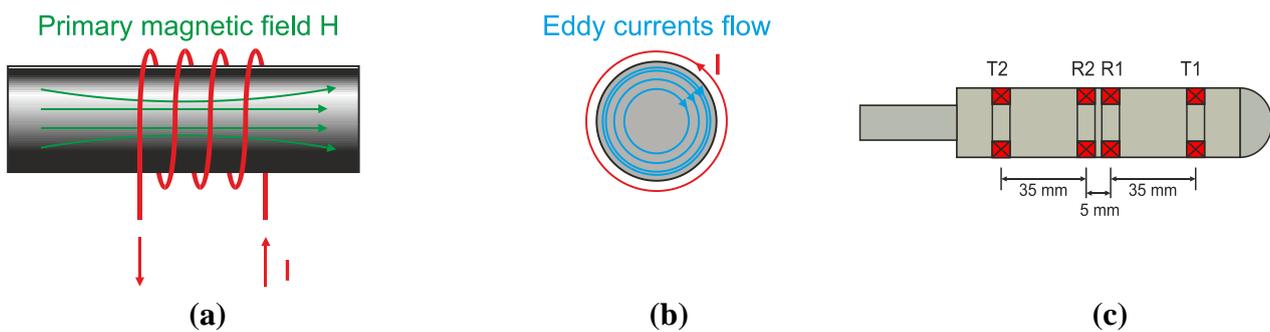
Different coil probe structures are available to detect a large variety of cracks. In general, coil probes provide high crack sensitivity when eddy current flow is strongly altered by discontinuities.

Encircling Coil Probes

The most widely-used probes encircle the test piece in eddy current testing. These probes are commonly used to test bars or tubes either externally or internally and are shown in Figures 17(a,c).

Encircling coils are sensitive to parallel discontinuities to the axis of the tube or bar as eddy currents describe radial circumferences in an opposing sense of currents around the energized coil current, as shown in Figure 17(b). Internal encircling coil probes permit internal testing of tubes. These types of probes are introduced using a guidance system which incorporates an encoder to locate the cracks by measuring the distance from the tube edge to the defect. Internal encircling probes usually test heat exchanger tubing at power plants at a constant rate of speed. Figure 17(c) shows an internal coil probe for ferromagnetic inspection [58].

Figure 17. (a) External encircling-type coil for tube or bar inspection. (b) Eddy currents flow in an external encircling-type coil. (c) Internal encircling-type coil for tube inspection (adapted from [58]).

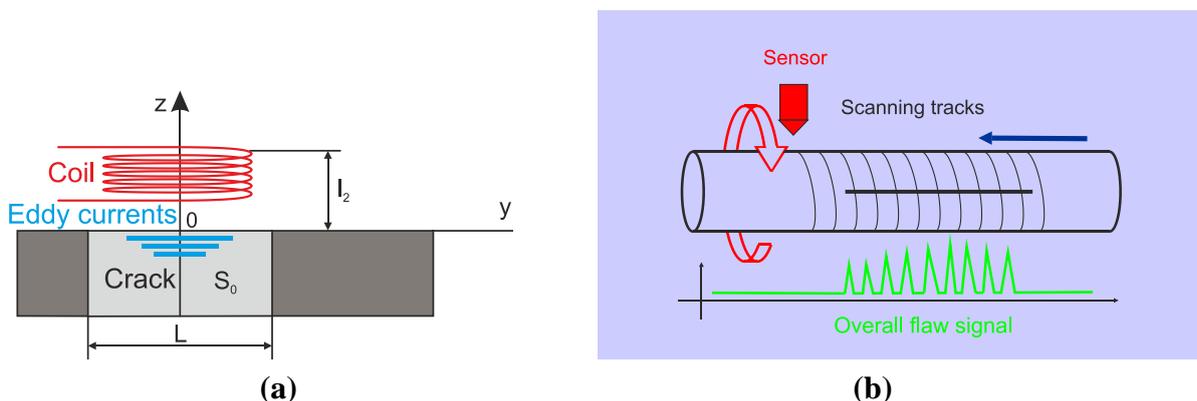


The standard section of encircling probes is circular. In addition to that, special profile encircling probes are designed for researchers and manufacturers to control surface and sub-surface defects in products with special profiles and shapes [59].

Pancake-Type Probes

Pancake-type probes are coils whose axis is perpendicular to the surface of the test piece. Pancake probes can be either air-core coils or ferrite-core coils. Ferrites have high permeability and the initial coil impedance is higher than the permeability of air-core coils. Pancake-type probes are very sensitive to lift-off and inclination with respect to the flat surface. Theodoulidis evaluated the influence of tilted coils in eddy current testing [33].

Figure 18. (a) Pancake-type coil probe and eddy current flow (adapted from [24]). (b) Rotating eddy current testing (adapted from [60]).



These types of sensors are used in flat surface inspection. The eddy currents on the test piece are circumferences parallel to the surface as Figure 18(a) illustrates. When a penetrating crack occurs on the surface, current flow is strongly altered and the crack can be detected. Pancake-type coil probes are not suitable for detecting laminar flaws as currents flow parallel to the surface and they are not strongly distorted.

Pancake-type probes can be used in either manual or automatic eddy current testing. Manual probes are designed especially for testing the surface defects of parts that require supervision and are particularly suitable for the maintenance of aeronautic parts. Pancake-type probes can also automatically detect longitudinal cracks in tubes or bars using a rotating system. The eddy current probe rotates at a high speed around the test material, which is moved longitudinally, and scans its surface helically as Figure 18(b) illustrates [60].

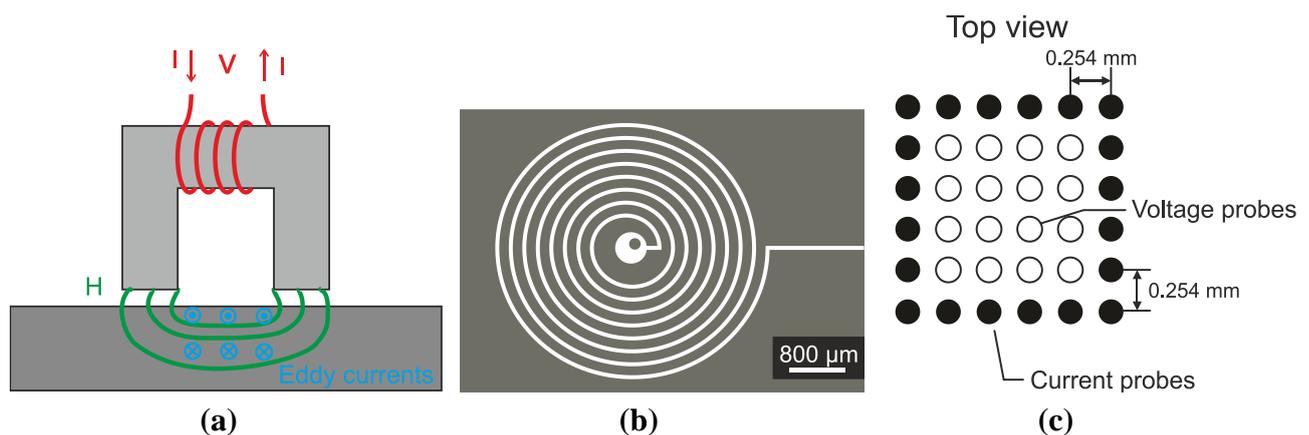
Other Eddy Current Probes

Other probes that are used in eddy current testing are segment probes, horseshoe-shaped coil probes, spiral coil probes and coil probe arrays.

Segment probes are used for the detection and control of defects in the weld seam of welded pipes [59]. These probes are available with specific windings and can inspect the tube or bar in differential and absolute modes. Both modes can be implemented in the same probe. In differential mode, the sensor is highly sensitive to punctual defects in the weld seam. Differential segment probes present difficulties detecting long defects in the weld seam of tubes and in the absence of a seam. Differential segment probes only detect the beginning and the end of the crack. To compensate for this disadvantage, absolute mode probes are incorporated along with differential ones to detect the presence or absence of weld seams and long cracks.

Figure 19(a) shows a horseshoe-shaped coil, which is useful in the detection of laminar flaws. The authors Placko *et al.* used this type of probe to inspect graphite composite materials [12]. The magnetic flux penetrates parallel to the surface, and the eddy currents encircle the magnetic flux lines in the test piece as Figure 19 (a) shows. Laminar flaws alter eddy current flow significantly, which explains their high sensitivity to them.

Figure 19. (a) Horseshoe-shaped coil probe (adapted from [12]). (b) Drawing of a 10-turn circular spiral coil (adapted from [39]). (c) Coil matrix (adapted from [61]).



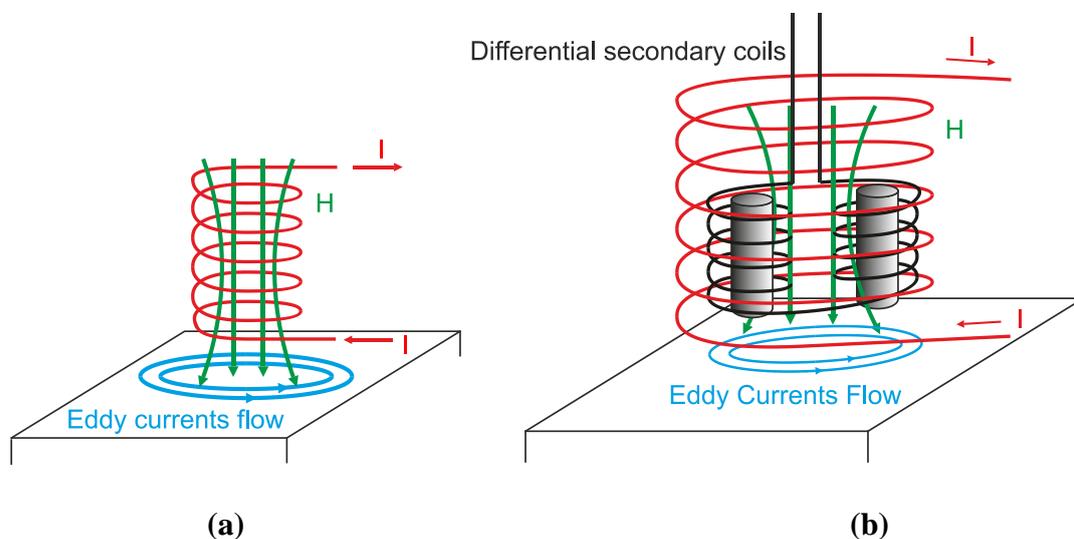
Some authors have tested spiral coils in eddy current testing. Ditchburn *et al.*, for instance, presented the detection of long cracks in steel using the probe shown in Figure 19(b) [39]. Eddy currents describe circumferences on the test piece surface. The authors asserted that spiral coils offered attractive features in terms of sensitivity. Arrays of coils create electromagnetic eyes used in eddy current testing as Figure 19(c) illustrates. Coil matrices permit 2D image extraction and the use of image processing techniques. The space resolution depends on the coil size and can be increased via miniaturization as Zaoui *et al.* published [62]. Other authors such as Stander *et al.* used matrix coils to test green-state metal powder compacts [61].

4.1.2. Double-function Probes vs. Separate-function Probes

This subsection presents two types of probes: double-function and separate-function probes.

On the one hand, double-function probes, also called reflection probes, use the same coil or the same coils to generate eddy current flow in the test piece and to receive the secondary field from the eddy currents. Figure 20(a) shows a double-function probe formed by a single coil.

Figure 20. (a) Double-function single coil probe. (b) Differential separated function probe.

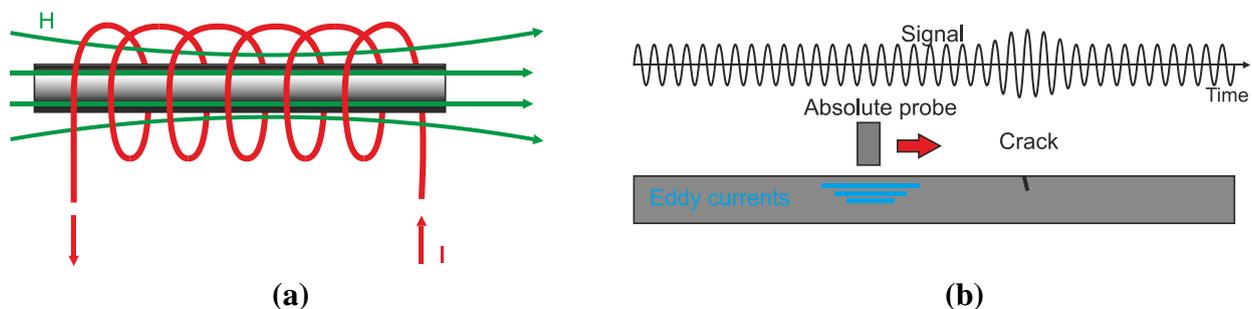


On the other hand, separate-function probes do not use the same coils to generate eddy current and to pick up the secondary field as Figure 20(b) shows. The primary coil can be specially designed to create eddy current flow. Secondary coils are made small to receive the secondary field from eddy currents with enough sensitivity [63]. The advantage of separate-function probes is that the coil design can be optimized. Primary coil impedance can be adjusted to produce a strong and uniform primary magnetic field by adjusting parameters such as coil diameter, wire diameter and number of turns. Secondary coils can be designed to pick up the maximum secondary field by minimizing noise sources and adapting the coil size to the crack size. Four combinations can be created as double or separate-function probes, which can be absolute or differential. The following subsection permits a better understanding of these configurations.

4.1.3. Absolute-Mode Probe

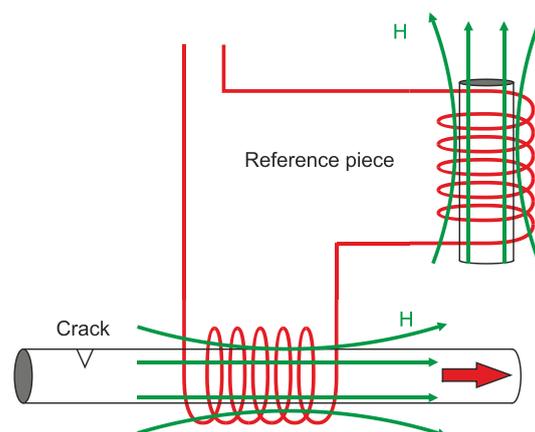
The simplest absolute probes consist of a single coil that generates eddy currents and senses changes from the eddy current field as Figure 21(a) shows. Absolute probes provide an absolute voltage signal as Figure 21(b) illustrates. The disadvantage of these coil probes is their high sensitivity to temperature variations.

Figure 21. (a) Non-compensated absolute encircling coil probe. (b) Absolute signal from non-compensated absolute encircling coil probe when a cracked bar is tested.



Absolute-mode probes may have a voltage compensation using an additional reference coil that is far from the inspected material as Figure 22 illustrates. A null voltage signal is measured when there is no defect which increases the instrument's dynamic range. Furthermore, they are less sensitive to temperature changes than non-compensated probes.

Figure 22. Compensated absolute encircling coil probe.



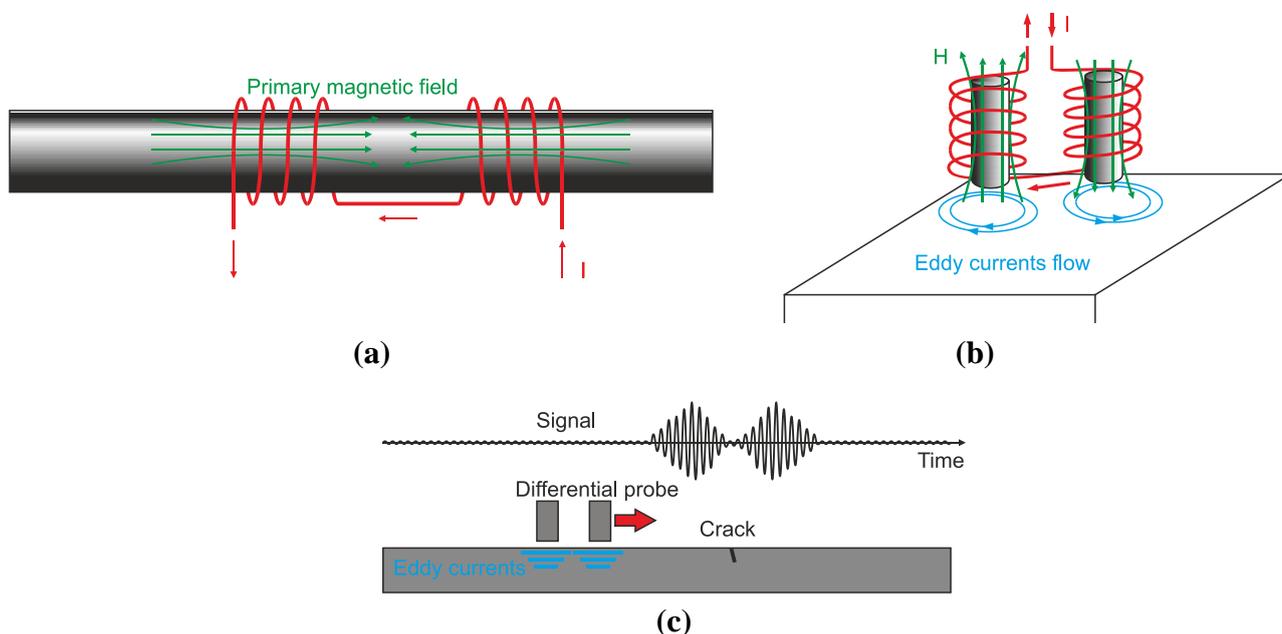
Absolute probes detect long flaws or slow dimensional variations in tubes or bars, which differential probes cannot detect. In addition to crack detection, the absolute change in impedance of the coil probe provides much information about the test material such as grain size, hardness and stress measurement.

4.1.4. Differential-Mode Probe

Differential probes consist of two coils that compare two adjacent parts of the inspected material as Figure 23(a) and Figure 23(b) show. The detecting coils are wound in the opposite directions to one another in order to equalize the induced voltages originated by the excitation primary field as

Figure 23(a) illustrates [63]. The output voltage of the differential coil probe is zero when there is no crack inside the probe as Figure 23(c) illustrates [6]. Cracks in the test material, which moves at a constant speed, alter the balance, and two pulses in the voltage signal are detected as Figure 23(c) shows.

Figure 23. (a) Differential double-function encircling coil. (b) Differential double-function pancake-type coil. (c) Signal from differential coil probe.



Differential coils have the advantage of being able to detect very small discontinuities. However, differential coils do not detect gradual dimensional or composition variations of the test piece, as the coils are typically very close.

Many authors have attempted to improve differential coil probes in terms of crack sensitivity. Peng *et al.*, for instance, presented a new differential sensor composed of double gradient winding coils [16]. Others like Bae *et al.* used a differential probe in hot wire testing [6].

4.1.5. Crack-Probe Interaction Models

Many authors have researched models of crack-probe interaction that contribute to the development of optimized probes. These scientists typically distinguish between forward and inverse solutions for the probe-crack problem.

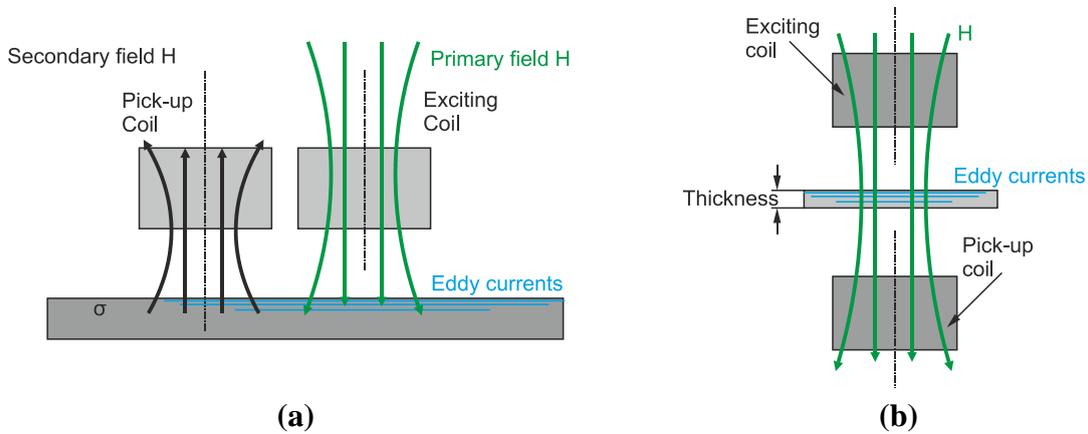
On the one hand, the forward solution consists in predicting the impedance or voltage of the eddy-current probe coil when the cracked piece is tested by a probe [64]. Some authors have published models for obtaining the forward solution. For instance, Skarlatos *et al.* presented a model to solve the forward problem in cracked ferromagnetic metal tubes [58]. Others like La *et al.* proposed a parametric model to estimate the impedance change caused by a flaw using the electromagnetic quasi-static approach [64]. Bowler *et al.* solved the harmonic functions of the Laplace equation to calculate the impedance change of the excitation coil inspecting aluminum and steel [65].

On the other hand, the inverse solution determines the type and size of cracks from the electric signal of eddy currents. Some authors have published papers solving the inverse problem. For example, Uzal *et al.* used a recursive Bayesian estimation method to extract the properties of the test piece [25], and Tamburrino *et al.* applied communications theory [66].

4.1.6. Conventional and Transmission Eddy Current Method

Sometimes authors use the terms conventional and transmission method. The conventional method, which is the most widely used, consists of positioning the exciting and pick-up coils in the same side of the inspected material as Figure 24(a) shows [32]. The transmission method is for separate-function probes and consists in positioning the pick-up coil on the other side of the magnetic source as Figure 24(b) illustrates. The transmission method needs a maximum thickness of the test material of 3–5 times the standard penetration depth to be able to receive the signal in the pick-up coil.

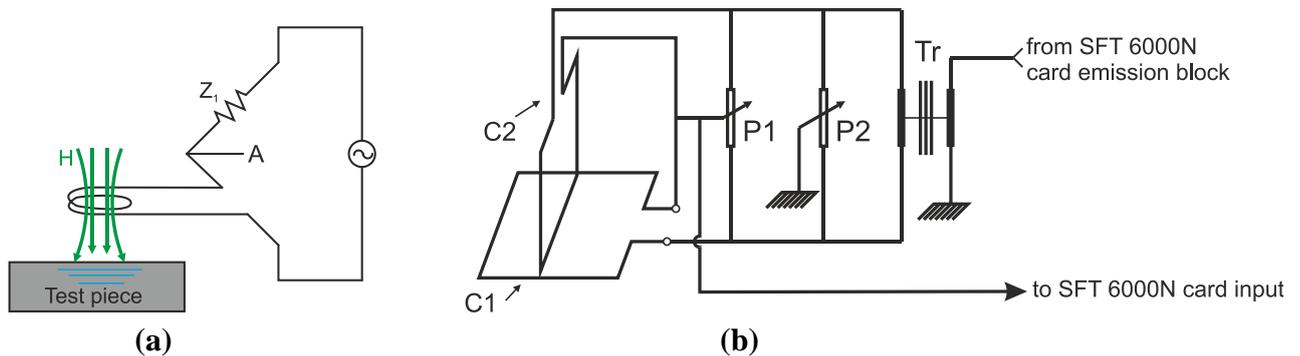
Figure 24. (a) Conventional eddy current method (adapted from [32]). (b) Transmission eddy current method.



4.1.7. Coil Probe Circuitry

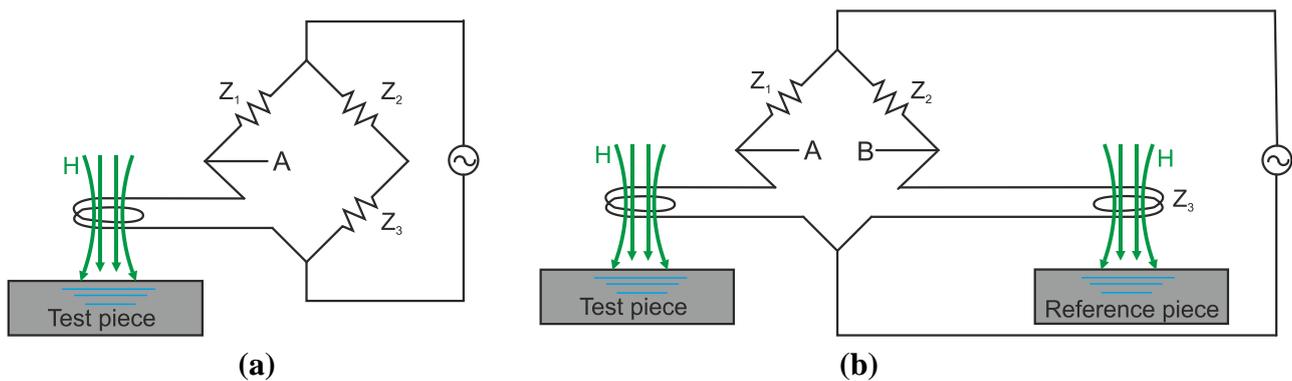
This subsection describes how to energize coil probes for eddy current testing. The simplest method for connecting an absolute coil probe is to use the RL circuit to measure the voltage V_A , as Figure 25(a) illustrates, although this configuration has the disadvantage of being sensitive to temperature changes.

Figure 25. (a) Resistor-coil probe polarization. (b) Separate-function coil probe polarization (adapted from [54]).



The most widely used circuitry for eddy current coil sensors is the bridge mode, which can be balanced or unbalanced depending on the probe type. Non-compensated absolute coil probes can be polarized in serial connection with a resistor in one leg, as Figure 26(a) shows, and a balancing impedance network formed by Z_1 and Z_2 in the other leg. The voltage differences are measured between the two legs V_{AB} . The balancing network permits the use of the entire range of the instrument with respect to the single RL circuit. The disadvantage of this configuration is that it is also not compensated with regard to temperature, as the coil probe and impedances Z_1 and Z_2 have different temperature coefficients.

Figure 26. (a) Unbalanced bridge connection. (b) Balanced bridge connection.



Compensated absolute coil probes can be polarized in both legs of the bridge in order to balance it as Figure 26(b) illustrates. The system has the advantage of being temperature compensated.

The circuitry for separate-function differential probes is commonly done by connecting the primary circuit using an RL circuit. The secondary pick-up coils may be connected directly to the input of a differential amplifier.

Not many authors have published on the coil connection. However, Grimberg *et al.* explained how they energized the coils as Figure 25(b) illustrates [54]. These coils were fed by a magnetic transformer, and the voltage was picked up by the card input and was regulated by means of the potentiometer P1.

4.2. Magnetoresistive Sensors

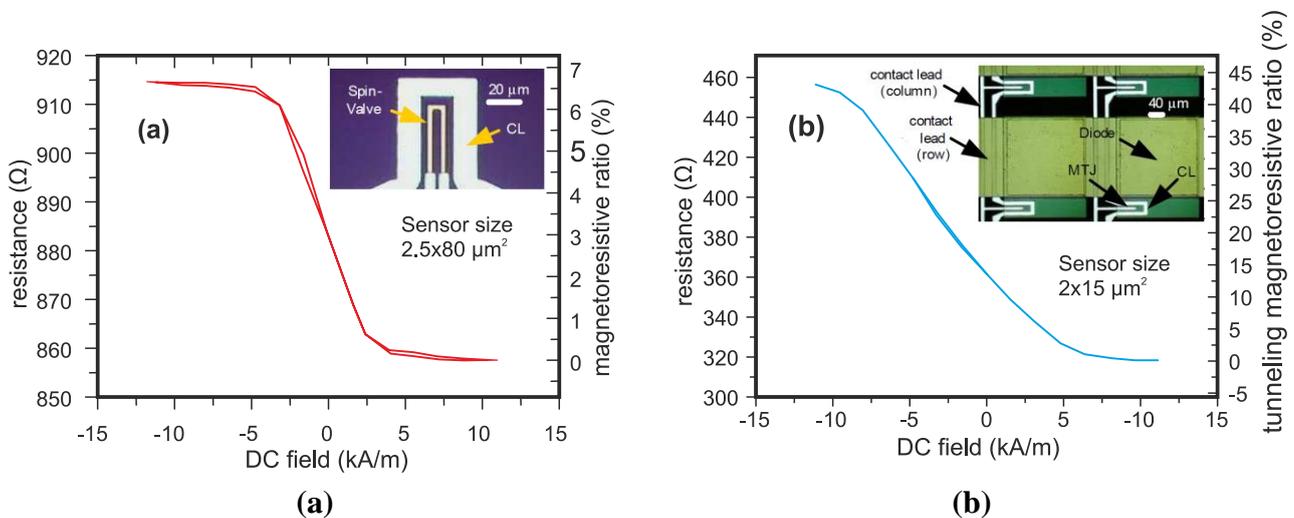
Magnetoresistive sensors are magnetic field transducers that exhibit a linear change in electrical resistance under an external magnetic field [67]. Magnetoresistive sensors are highly sensitive and accurate, but the main disadvantage of them is the high temperature coefficient [17]. Germano *et al.* presented transference curves for two types of magnetoresistive sensors: spin-valve (SV) and magnetic tunnel junction (MTJ) sensors [67].

SV magnetometers are spin-valve transistors used as magnetic field sensors and have a ferromagnet–semiconductor hybrid structure [17]. The magnetic tunnel junctions are based on a spin dependent tunneling effect [17]. Two transfer curves of these magnetoresistive sensors are shown in Figure 27, which demonstrates that resistance decreases when the field strength increases.

Magnetoresistive sensors can be used in non-destructive evaluation to detect the secondary field from eddy currents. Some researchers such as Ramos *et al.* [38], and Yamada *et al.* [68] use these

types of sensors Yamada *et al.* used an SV-GMR sensor whose operating range of magnetic field density was from nT to mT. The sensor provided high sensitivity over frequencies up to 100 MHz and high spatial resolution due to the minization [68].

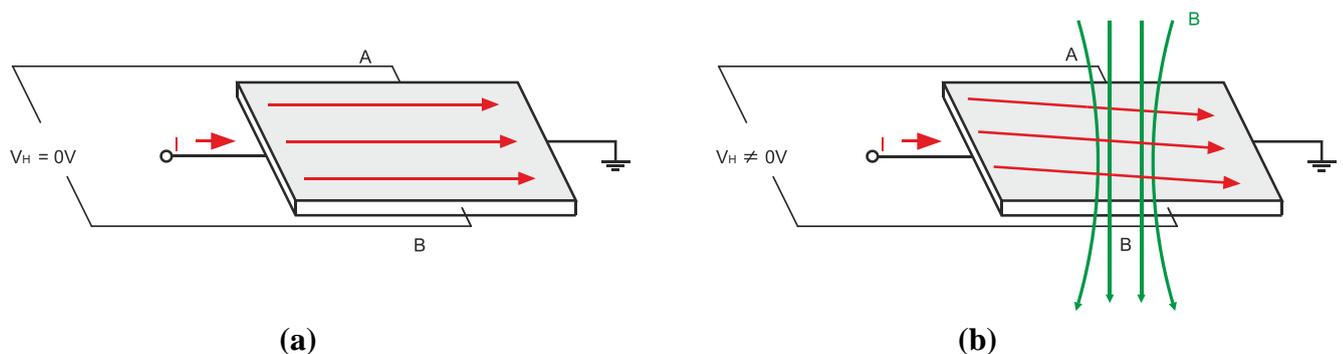
Figure 27. Microphotography and transfer curve of two types of magnetoresistive sensors: (a) Spin-valve in a linear array (adapted from [67]). (b) Magnetic tunnel junction in a matrix (adapted from [67]).



4.3. Hall-effect Sensors

Hall-effect sensors can detect magnetic fields from eddy currents and can be used in eddy current testing. Hall voltage is proportional to the current flowing through the conductive rectangle and the magnetic induction perpendicular to the conductor as Figure 28 shows. The Hall devices are used mainly in the mT range and can be easily miniaturized and integrated within microelectronic circuits [17]. Their disadvantages are their limited sensitivity to silicon, the high level of 1/f noise and the relatively large offset [17].

Figure 28. Hall-effect principle. (a) No magnetic field. (b) Magnetic field applied.



Some authors such as Jongwoo *et al* have researched eddy current testing using Hall-effect sensors. They presented a quantitative eddy current evaluation of cracks on austenite stainless steel using a Hall-effect sensor array [69].

Other researchers such as He *et al.* tested the use of a differential hall probe to detect defects in the riveted structures of aircrafts [50]. The hall response signals were disturbed by noise, which leads to inaccuracy in detecting the defects. They used an averaging method and wavelet de-noise method to process the Hall responses [50].

Paasi *et al.* presented a three-axis Hall sensor magnetometer for the testing of superconductor homogeneity to measure the three components of the magnetic fields from eddy current flow [70]. The three-axis Hall sensor provides increased sensitivity when compared to classical Hall sensor techniques that measuring only one (usually vertical) component of the field.

4.4. SQUID Devices

Superconducting quantum interference devices (SQUIDs) are very sensitive magnetometers designed to measure extremely weak magnetic fields. SQUIDs are based on superconducting loops that contain Josephson junctions [17]. SQUIDs are sensors that can measure extremely low magnetic induction levels. The disadvantage of these types of sensors is the need for cryogenic refrigeration in order to decrease noise levels to the range of $fT/\sqrt{\text{Hz}}$ that limit their use in many applications.

SQUIDs have been used in eddy current testing since the 1980s [55]. In conventional eddy-current systems, where the magnetic field produced by the eddy currents is detected by means of an induction coil, the typical field noise is about $1 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ at eddy current frequencies of about 100 kHz. In some cases, this field noise is too high for certain applications such as the detection of tiny oxide particles, especially if the test materials are highly conductive, such as copper or aluminum. In these instances, SQUID magnetometers must be used instead of coil probes.

Some authors have researched eddy current testing using SQUIDs. For instance, Muck *et al.* tested various materials and obtained a much higher sensitivity than conventional eddy current evaluation and ultrasonic testing [71]. Others such as Ruosi *et al.* presented their experimental and numerical detection results of surface and subsurface artificial features in Al-Ti planar structures [72].

The combination of high sensitivity, even in unshielded environments, high spatial resolution and flat frequency response up to 1 MHz offered by SQUIDs mean that they are powerful sensors for eddy current evaluation [72].

4.5. Comparison of Different Probe Structure and Magnetic Sensors

There are some parameters, including the magnetic field range, the operating frequency band and sensor dimensions that permit the selection of the most suitable sensor type for eddy current testing [68]. In this subsection, a comparison of different probe structures and magnetic sensors is presented.

Coil probes provide high sensitivity to defects when the flaw size is comparable with the coil transducer [54]. Short and small diameter encircling coil probes provide higher sensitivity to small cracks than long and big diameter probes. Grimberg *et al.* took this relationship between coil size and sensitivity into account and proposed a method for reconstructing the flaw in order to determine the crack's depth [54]. The disadvantage is that the coil sizes must adapt to the size of the tubes or bars being produced.

Coil probes provide high sensitivity to defects when eddy current flow is drastically changed. This means that encircling coils are optimized for detecting short discontinuities parallel to the axis of the inspected tubes or bars. Differential encircling probes only detect discontinuities when a long crack that is parallel to the major axis enters and leaves the probe.

To detect long discontinuities over their full length, pancake-type rotating probes are designed. They are able to detect as small as 50 μm . Pancake-type probes scan smaller areas than encircling coils which means the pancake-type probes are more sensitive [73].

Automatic scanning is widely used in production lines. Automatic inspection using pancake-type probes is complex, because they require rotating systems. The automatic scanning using encircling probes is simpler than using pancake-type probes because they are static. Encircling probes provide more control over production quality at very high speeds up to 150 m/s.

Segment coil probes are specifically designed for controlling the weld seam of welded pipes [59]. The sensitivity of segment probes is higher than encircling probes as they limit the scanning surface to the weld area, whereas encircling probes can scan 360 degrees.

Horseshoe-shaped coils are useful in the detection of laminar flaws that pancake-type coils cannot detect. Spiral coils provide high sensitivity and arrays of coils permit high-speed inspection and obtain high space resolution, reducing the coil size [62].

In general, the advantages of using coils as sensors for the eddy currents are the simplicity of their construction, the huge dynamic range and the possibility of focusing the sensor [48]. Some disadvantages are the high induction voltage at the start of the signal [48] and the fact that they are difficult to make smaller [17].

Other magnetometers can be used instead of pick-up coils. Hall sensors are magnetic-field sensors whose dynamic range is not large enough for some applications [48]. SQUIDs are difficult and expensive [48], although they provide very low field noise to the range of $\text{fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ when compared to induction coils that have field noise of about $1 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ [55]. Many authors find the structure and characteristics of magnetoresistive sensor attractive for non-destructive evaluation because of their micro size, high frequency operation and high sensitivity [68].

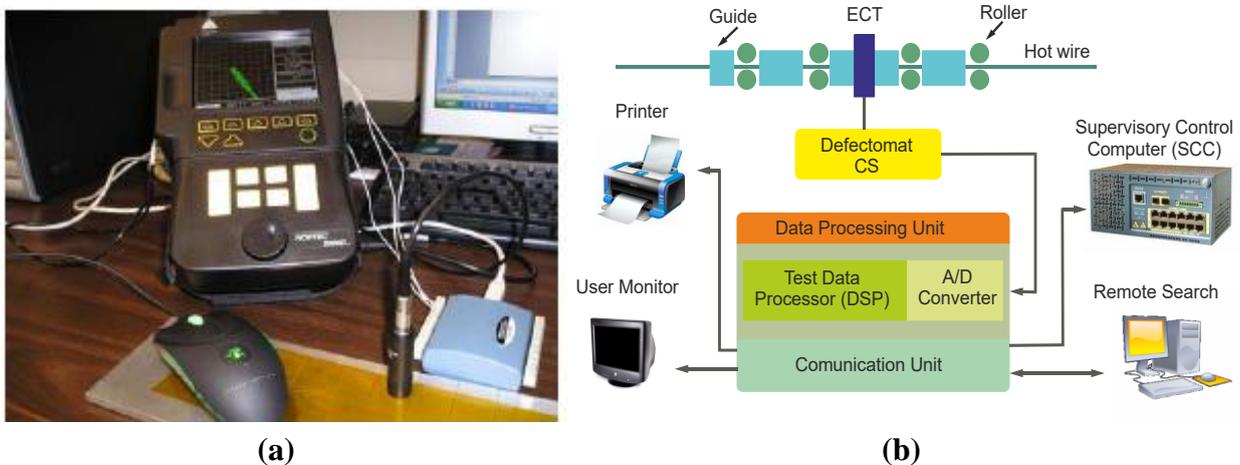
5. Eddy Current Equipment

This section describes some types of eddy current testing equipment. Manufacturers of eddy current testing equipment offer a wide variety of equipment, from basic equipment to advanced equipment that is designed to satisfy the highest requirements. Basic eddy current equipment is used for sorting test pieces into two categories: good or bad pieces. They are low-cost and have only the essential controls and basic displays and may permit a connection to an oscilloscope [74]. Basic instruments have one or two physical channels that can be time multiplexed to increase their functionality. Instruments that satisfy basic requirements in production line can detect composition in alloys, measure parameters—such as hardness, case depth and temper—in heat treatments, measure sinter density and detect structure variations [74]. Different enclosures are typically available. RS232/V24 interfaces permit communication with main frame computers. Some opto-isolated inputs and outputs are available for the connection of other systems.

Manufacturers also make portable instruments which contain the screen, controls and connectors in a compact enclosure as Figure 29(a) illustrates. Compact instruments may be operated via a standard LAN (Ethernet, TCP/IP) connection or together with other systems via one single screen [75].

High functioning eddy current instruments provide higher data processing capability and more physical channels than basic instruments. The top ten instruments permit hot wire testing at production speeds of up to 150 m/s, providing very high spatial resolution, as seen in the system represented in Figure 29(b). They also allow network integration in the production process and multi-frequency operation bands for calibration and testing [60]. Many top-ten instruments provide several USB 2.0 interfaces, Ethernet interfaces and printer connections to generate hard copies of test results. High-end eddy current instruments have more opto-isolated interfaces than basic instruments, up to 128 inputs and outputs for connecting a PLC to control automatic systems. Unlimited configurations can be stored on and loaded from hard disks [59].

Figure 29. (a) Portable eddy current testing instrument [78]. (b) Block diagram of the overall system for hot wire testing (adapted from [6]).



Manufacturers construct multichannel eddy current instruments for rotating systems to detect longitudinal defects at speeds of up to 12,000 rpm. Many rotating systems are available with lift-off compensation that provides an extremely reliable method for defect detection [59].

Modern instruments generate frequencies in the range from kHz to MHz and permit the application of discrete signal processing, such as filtering and numerical demodulation. Many modern instruments include the impedance on XY plotters and also the X and the Y plot vs. time on LCD screens (or computer monitors if they are computer-enabled). Alarm settings on XY plotters permit users to activate programmable outputs that can activate light and sound alarms to alert the operator when cracks are present [75]. Instruments permit automatic scanning which activates automatic mechanisms to sort flawed pieces or activates paint markers. They also offer very high test speeds that can reduce the occurrence of human errors [76].

Several eddy current instruments are available with computer connections that vastly increase their capabilities to search, visualize and analyze eddy current inspection data [6,75]. Computers can receive data from multiple channels and real-time processes. Computers can also extract parameters of interest from signals, generate reports and store the signal from eddy current testing instruments in order to

post-process the data. Some authors, such as Fahmy [76], Stander *et al.* [61], and Rao *et al.* [77], have published papers relating to computer-controlled eddy current systems.

6. Applications of Eddy Current Testing

Eddy current testing has a wide variety of applications. The most important applications and research are described in this section.

Eddy-current testing provides a high level of sensitivity for material identification and for the characterization of the microstructure state [22]. Absolute coil probes can measure physical parameters via the impedance which is related to the electrical conductivity and magnetic permeability of test pieces. Because of the relation between hardness and these variables, eddy current testing permits heat damage detection and heat treatment control. Mercier *et al.* published their research on hardness testing for the evaluation of steel decarburizing [8]. Eddy current techniques also take advantage of lift-off variation to measure the coating thickness of non-conductive materials or the oxide thickness of conductive materials [9].

Eddy current testing has many applications as a method of crack detection. The aeronautical and nuclear industries have invested many resources in the development eddy current testing. Authors such as Morozov *et al.* [10] and Thollon *et al.* [15] have worked with eddy current testing in the field of aeronautics. Others like Chen *et al.* and La *et al.* have used eddy current testing to research steam generator tubes in the nuclear industry [64,79].

In the metallurgical industry, authors such as Stander *et al.* have conducted research testing green-state powdered materials [61]. Manufacturers also offer special solutions for extra fine wires of tungsten and molybdenum testing up to 10 m/s [60]. In the field of transportation, researchers such as Pohl *et al.* have proposed railroad track surface testing at train speeds of 70 km/h [14].

Rotating inspection systems are used in wire drawing machines, copper tube winders or finishing lines in the bright steel sector [60] and are capable of finding longitudinal defects at very high speeds with a minimum depth of 0.05 mm [59,60].

In the field of hot eddy current testing, the inspection of different types of bars and profiles at temperatures of up to 1,200 °C can be performed using water-cooled probes [59,75]. This kind of inspection at high temperatures is useful for detecting these defects at an early stage before significant amounts of faulty material have been produced [75]. Testing of hot-wire line presents several difficulties such as low fill factor due to water cooling between the hot wire and the encircling coil and the necessity of high-speed data processing due to the very high speed of the line [6]. Eddy current testing is the only automated non-destructive test method capable of getting quality results at up to 150 m/s [7].

In production lines, defects can be either random or periodic in the material [75]. Random defects may indicate a poor overall quality of the material, suggesting deficiencies in the raw material or flaws in the general production process. Periodic defects that recur at regular intervals are likely to be generated by damaged rollers or guide rollers in the production line. Some researches devise techniques for detecting periodically occurring flaws based on the FFT technique [6]. Cracked rollers can be revealed by calculating simple equations using the speeds of the rollers and the sizes of their rolled wire [6].

The detection of residual stresses in engineering structures that can provide early indications of stress status and eventual failure is a rapidly growing area in non-destructive testing [80]. Eddy current coil probes can also detect very small stress variations in ferromagnetic steels due to the magneto-elastic effect based on the measurement of changes in impedance [20].

7. Conclusions

Nowadays, destructive or non-destructive techniques are more frequently used to test products due to the increase prevalence of quality controls. While destructive techniques verify only some samples that are destroyed and make some invalid in other industrial processes, we find non-destructive techniques more interesting than destructive ones since all production can be tested without permanent alterations.

This paper reviews the state-of-the-art methods of eddy current testing which is one of the most widely used non-destructive forms of testing. Eddy current testing permits crack detection and measurements that are beyond the scope of other techniques such as non-conductive coating thickness [9], alloy composition and hardness [8] in a large variety of materials. The only need is that the materials being tested must be electrical conductors where eddy currents can flow.

Eddy current sensors are insensitive to dirt, dust, humidity, oil or dielectric material in the measuring gap and have been proven reliable in a wide range of temperatures [28]. Coil probes are the most widely used type of sensors, and standard coils can be used in a wide range of applications [74].

Although eddy current testing has been developed for several decades, research into developing new probes, techniques and instrumentation is currently being conducted by manufacturers and research groups around the world in order to satisfy the increasingly higher quality standards required in almost every industry. These days, scientists are trying to develop new coil probes and research the use of other magnetometers such as superconducting quantum interference devices (SQUIDs), Hall-effect and magnetoresistive sensors that also provide very interesting responses.

The review of research into electromagnetic models and powerful simulators that help the probe designer to solve the forward [58] and inverse [25] flaw-probe problems is essential to optimal crack detection in terms of sensors and the operating variables such as frequency and signal-to-noise ratio.

Eddy current testing is a versatile technique that makes possible the hot eddy current testing of semi-finished products such as wires, bars and tubes at temperatures of up to 1,200 °C [59,75] and at production speeds of up to 150 m/s [7]. Early detection of these defects in production lines can save large sums of money in the metal industry.

In conclusion, as researchers and developers of solutions based on eddy current testing, we have found that eddy current techniques can provide the industry with reliable quality control systems. Although there are excellent improvements due to the effort of the many scientists during the last several years, we believe that more research in eddy current techniques, in terms of sensors, equipment and signal processing, will lead to even more applications of these techniques.

Acknowledgements

This work was supported partially by the regional 2010 Research Project Plan of Junta de Castilla y León, Spain, under the VA034A10-2 project. The authors acknowledge generous support from

Ingenier í y Sistemas de Ensayos no Destructivos (ISEND), with particular expertise in non-destructive eddy current testing. This work was also possible thanks to the grant obtained by Ernesto Vazquez-Sanchez from the *Contrataci3n de personal investigador de reciente titulaci3n* program. This program was financed by *Consejer í de Educaci3n* of *Junta de Castilla y Le3n* (Spain) and was co-financed by the European Social Fund.

References and Notes

1. Janousek, L.; Capova, K.; Yusa, N.; Miya, K. Multiprobe inspection for enhancing sizing ability in eddy current nondestructive testing. *IEEE Trans. Magn.* **2008**, *44*, 1618-1621.
2. Shujuan, W.; Penghao, X.; Lei, K.; Guofu, Z. Research on influence of lorentz force mechanism on EMAT's transduction efficiency in steel plate. In *Proceedings of the 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA2010)*, Taichung, Taiwan, June 2010; pp. 196-201.
3. Noorian, F.; Sadr, A. Computation of transient Eddy currents in EMATs using discrete Picard Method. In *Proceedings of the 18th Iranian Conference on the Electrical Engineering (ICEE 2010)*, Isfahan, Iran, May 2010; pp. 727-731.
4. Aliouane, S.; Hassam, M.; Badidi Bouda, A.; Benchaala, A. Electromagnetic acoustic transducers (EMATs) design evaluation of their performances. In *Proceedings of the 15th World Conference on NDT (WCNDT 2000)*, Rome, Italy, October 2000.
5. Hashizume, H.; Yamada, Y.; Miya, K.; Toda, S.; Morimoto, K.; Araki, Y.; Satake, K.; Shimizu, N. Numerical and experimental analysis of eddy current testing for a tube with cracks. *IEEE Trans. Magn.* **1992**, *28*, 1469-1472.
6. Bae, J.; Kim, S. Hot wire inspection using eddy current. In *Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC 2001)*, Budapest, Hungary, May 2001; pp. 962-965.
7. Institut Dr. Foerster. DEFECTOMAT Sensor System Thermal Coil. Available online: <http://www.foerstergroup.com/DEFECTOMAT-sensor-system-thermal-coil.73.0.html> (accessed on 17 January 2011).
8. Mercier, D.; Lesage, J.; Decoopman, X.; Chicot, D. Eddy currents and hardness testing for evaluation of steel decarburizing. *NDT E Int.* **2006**, *39*, 652-660.
9. Pedersen, L.B.; Magnusson, K.Å.; Zhengsheng, Y. Eddy current testing of thin layers using coplanar coils. *Res. Nondestruct. Eval.* **2000**, *12*, 53-64.
10. Morozov, M.; Rubinacci, G.; Tamburrino, A.; Ventre, S. Numerical models of volumetric insulating cracks in eddy-current testing with experimental validation. *IEEE Trans. Magn.* **2006**, *42*, 1568-1576.
11. Förster, F. Sensitive eddy-current testing of tubes for defects on the inner and outer surfaces. *Nondestruct. Testing* **1974**, *7*, 28-36.
12. Placko, D.; Dufour, I. Eddy current sensors for nondestructive inspection of graphite composite materials. In *Proceedings of the IEEE Conference of the Industry Applications Society (IAS'92)*, Houston, TX, USA, October 1992; pp. 1676-1682.

13. Nguyen, Q.H.; Philipp, L.D.; Lynch, D.J.; Pardini, A.F. Steam tube defect characterization using eddy current Z-Parameters. *Res. Nondestruct. Eval.* **1998**, *10*, 227-252.
14. Pohl, R.; Erhard, A.; Montag, H. J.; Thomas, H.M.; Wüstenberg, H. NDT techniques for railroad wheel and gauge corner inspection. *NDT E Int.* **2004**, *37*, 89-94.
15. Thollon, F.; Lebrun, B.; Burais, N.; Jayet, Y. Numerical and experimental study of eddy current probes in NDT of structures with deep flaws. *NDT E Int.* **1995**, *28*, 97-102.
16. Xu, P., Huang, S., Zhao, W. Differential eddy current testing sensor composed of double gradient winding coils for crack detection. In *Proceedings of the IEEE Sensors Applications Symposium (SAS 2010)*, Limerick, Ireland, February 2010; pp. 59-63.
17. Rasson, J.; Delipetrov, T. Progress and limitations in magnetic field measurements. In *Geomagnetics for Aeronautical Safety*, 1st ed.; Novkovski, N. Ed.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2006; Volume 13, pp. 201-212.
18. Gubbins, D. Laplace's equation, uniqueness of solutions. In *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*, 1st ed.; Gubbins, D., Herrero-Bervera, E., Eds.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2007; pp. 466-468.
19. Backus, G.E. Application of a non-linear boundary-value problem for Laplace's equation to gravity and geomagnetic intensity surveys. *Q. J. Mech. Appl. Math.* **1968**, *21*, 195-221.
20. Ricken, W.; Schoenekess, H.C.; Becker, W.J. Improved multi-sensor for force measurement of pre-stressed steel cables by means of the eddy current technique. *Sens. Actuat. A* **2006**, *129*, 80-85.
21. Ricken, W.; Liu, J.; Becker, W.-J. GMR and eddy current sensor in use of stress measurement. *Sens. Actuat. A* **2001**, *91*, 42-45.
22. Zergoug, M.; Lebaili, S.; Boudjellal, H.; Benchaala, A. Relation between mechanical microhardness and impedance variations in eddy current testing. *NDT E Int.* **2004**, *37*, 65-72.
23. Metcalfe, G.R. The use of electrical conductivity measurements in detecting heat and fire damage in aircraft structure. In *Proceedings of the IEEE NDT Technology in Aerospace*, London, UK, January 1990; pp. 1-4.
24. Shao, K.R.; YouGuang, G.; Lavers, J.D. Multiresolution analysis for reconstruction of conductivity profiles in eddy current nondestructive evaluation using probe impedance data. *IEEE Trans. Magn.* **2004**, *40*, 2101-2103.
25. Uzal, E.; Ozkol, I.; Kaya, M.O. Impedance of a coil surrounding an infinite cylinder with an arbitrary radial conductivity profile. *IEEE Trans. Magn.* **1998**, *34*, 213-217.
26. Barrett, W.F.; Brown, W.; Hadfield, R.A. Researches on the electrical conductivity and magnetic properties of upwards of one hundred different alloys of iron. *J. Inst. Elect. Eng.* **1902**, *31*, 674-722.
27. Kesavamurthy, N.; Rajagopalan, P.K. An analytical method taking account of saturation and hysteresis for evaluating the iron loss in solid-iron cores subjected to an alternating field. In *Proceedings of the IEE - Part C: Monographs*, December 1962; Volume 109, pp. 237-243.
28. Tian, G.Y.; Zhao, Z.X.; Baines, R.W. The research of inhomogeneity in eddy current sensors. *Sens. Actuat. A* **1998**, *69*, 148-151.

29. Uzal, E.; Rose, J.H. The impedance of eddy current probes above layered metals whose conductivity and permeability vary continuously. *IEEE Trans. Magn.* **1993**, *29*, 1869-1873.
30. Kasai, N.; Ogawa, S.; Oikawa, T.; Sekine, K.; Hasegawa, K. Detection of carburization in ethylene pyrolysis furnace tubes by a C core probe with magnetization. *J. Nondestruct. Eval.* **2010**, 1-6.
31. Gui, Y.T.; Yong, L.; Mandache, C. Study of lift-off invariance for pulsed eddy-current signals. *IEEE Trans. Magn.* **2009**, *45*, 184-191.
32. Yin, W.; Binns, R.; Dickinson, S.J.; Davis, C.; Peyton, A.J. Analysis of the lift-off effect of phase spectra for eddy current sensors. In *Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC 2005)*, Ottawa, Canada, May 2005; pp. 1779-1784.
33. Theodoulidis, T. Analytical model for tilted coils in eddy-current nondestructive inspection. *IEEE Trans. Magn.* **2005**, *41*, 2447-2454.
34. Theodoulidis, T.P. Analytical modeling of wobble in eddy current tube testing with Bobbin Coils. *Res. Nondestruct. Eval.* **2002**, *14*, 111-126.
35. Lopez, L.A.N.M.; Ting, D.K.S.; Upadhyaya, B.R. Removing eddy-current probe wobble noise from steam generator tubes testing using Wavelet Transform. *Prog. Nucl. Energy* **2008**, *50*, 828-835.
36. Shu, L.; Songling, H.; Wei, Z.; Peng, Y. Improved immunity to lift-off effect in pulsed eddy current testing with two-stage differential probes. *Russ. J. Nondestr. Test.* **2008**, *44*, 138-144.
37. Theodoulidis, T.; Bowler, J.R. Interaction of an eddy-current coil with a right-angled conductive wedge. *IEEE Trans. Magn.* **2010**, *46*, 1034-1042.
38. Ramos, H.; Postolache, O.; Alegria, F.C.; Lopes-Ribeiro, A. Using the skin effect to estimate cracks depths in metallic structures. In *Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (I²MTC 2009)*, Singapore, May 2009; pp. 1361-1366.
39. Ditchburn, R.J.; Burke, S.K.; Posada, M. Eddy-current nondestructive inspection with thin spiral coils: Long cracks in steel. *J. Nondestruct. Eval.* **2003**, *22*, 63-77.
40. Owston, C.N. Eddy-current testing at microwave frequencies. *Nondestruct. Testing* **1969**, *2*, 193-196.
41. Liu, Z.; Tsukada, K.; Hanasaki, K.; Kurisu, M. Two-Dimensional eddy current signal enhancement via multifrequency data fusion. *Res. Nondestruct. Eval.* **1999**, *11*, 165-177.
42. Bartels, K.A.; Fisher, J.L. Multifrequency eddy current image processing techniques for nondestructive evaluation. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 1995)*, Washington, DC, USA, October 1995; pp. 486-489.
43. Yang, G.; Tamburrino, A.; Udpa, L.; Udpa, S.S.; Zeng, Z.; Deng, Y.; Que, P.. Pulsed eddy-current based giant magnetoresistive system for the inspection of aircraft structures. *IEEE Trans. Magn.* **2010**, *46*, 910-917.
44. He, D.; Yoshizawa, M. Saw-wave excitation eddy-current NDE based on HTS RF SQUID. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **2003**, *13*, 3803-3806.
45. Lee, C.; Johnson, M.J.; Nakagawa, N. Development of a pulsed eddy current system and its characterization. In *Proceedings of the AIP Conference*, Sousse, Tunisia, March 2007; pp. 354-361.

46. Dolabdjian, C.P.; Perez, L.; De Haan, V.O.; De Jong, P.A. Performance of Magnetic Pulsed-Eddy-Current System Using High Dynamic and High Linearity Improved Giant MagnetoResistance Magnetometer. *IEEE Sens. J.* **2006**, *6*, 1511-1517.
47. Sophian, A.; Tian, G.Y.; Taylor, D.; Rudlin, J. A feature extraction technique based on principal component analysis for pulsed Eddy current NDT. *NDT E Int.* **2003**, *36*, 37-41.
48. de Haan, V.O.; de Jong, P.A.; Pérez, L.; Dolabdjian, C. Towards Material Characterization and Thickness Measurements using Pulsed Eddy Currents implemented with an Improved Giant Magneto Resistance Magnetometer. In *Proceedings of the 9th. European NDT Conference (ECNDT'06)*, Berlin, Germany, September 2006; pp. 1-8.
49. de Haan, V.O.; de Jong, P.J. Simultaneous measurement of material properties and thickness of carbon steel plates using pulsed eddy currents. Presented In *Proceedings of the 16th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2004)*, Montreal, Canada, August 2004.
50. He, Y.; Luo, F.; Pan, M.; Weng, F.; Hu, X.; Gao, J.; Liu, B. Pulsed eddy current technique for defect detection in aircraft riveted structures. *NDT E Int.* **2010**, *43*, 176-181.
51. Chen, T.; Tian, G.Y.; Sophian, A.; Que, P.W. Feature extraction and selection for defect classification of pulsed eddy current NDT. *NDT E Int.* **2008**, *41*, 467-476.
52. Waidelich, D.L. The attenuation of a pulsed field by a conducting sheet. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **1969**, *18*, 326-330.
53. Abidin, I.Z.; Mandache, C.; Tian, G.Y.; Morozov, M. Pulsed eddy current testing with variable duty cycle on rivet joints. *NDT E Int.* **2009**, *42*, 599-605.
54. Grimberg, R.; Savin, A.; Radu, E.; Mihalache, O. Nondestructive evaluation of the severity of discontinuities in flat conductive materials by an eddy-current transducer with orthogonal coils. *IEEE Trans. Magn.* **2000**, *36*, 299-307.
55. Muck, M.; Scholz, F. A SQUID-based nondestructive evaluation system for testing wires of arbitrary length. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **2007**, *17*, 3809-3813.
56. Schoenekess, H.C.; Ricken, W.; Becker, W.J. Method to determine tensile stress alterations in prestressing steel strands by means of an eddy-current technique. *IEEE Sens. J.* **2007**, *7*, 1200-1205.
57. Abu-Nabah, B.A.; Nagy, P.B. Iterative inversion method for eddy current profiling of near-surface residual stress in surface-treated metals. *NDT E Int.* **2006**, *39*, 641-651.
58. Skarlatos, A.; Pichenot, G.; Lesselier, D.; Lambert, M.; Duchene, B. Electromagnetic Modeling of a Damaged Ferromagnetic Metal Tube by a Volume Integral Equation Formulation. *IEEE Trans. Magn.* **2008**, *44*, 623-632.
59. ISEND Home Page. Available online: <http://www.isend.es/en> (accessed on 17 January 2011).
60. Institut Dr. Foerster Home Page. Available online: <http://www.foerstergroup.com> (accessed on 17 January 2011).
61. Stander, J.; Plunkett, J.; Michalson, W.; McNeill, J.; Ludwig, R. A novel multi-probe resistivity approach to inspect green-state metal powder compacts. *J. Nondestruct. Eval.* **1997**, *16*, 205-214.
62. Zaoui, A.; Menana, H.; Feliachi, M.; Abdellah, M. Generalization of the ideal crack model for an arrayed eddy current sensor. *IEEE Trans. Magn.* **2008**, *44*, 1638-1641.

63. Lopes Ribeiro, A.; Alegria, F.; Postolache, O.; Ramos, H. Eddy current inspection of a duralumin plate. In *Proceeding of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC '09)*, Singapore, May 2009; pp. 1367-1371.
64. La, R.; Benoist, B.; de Barmon, B.; Talvard, M.; Lengellé R.; Gaillard, P. MESSINE, a Parametric Three-Dimensional Eddy Current Model. *Res. Nondestruct. Eval.* **2000**, *12*, 65-86.
65. Bowler, J.R.; Harfield, N. Evaluation of probe impedance due to thin-skin eddy-current interaction with surface cracks. *IEEE Trans. Magn.* **1998**, *34*, 515-523.
66. Tamburrino, A. A communications theory approach for electromagnetic inverse problems. *IEEE Trans. Magn.* **2000**, *36*, 1136-1139.
67. Germano, J.; Martins, V.; Cardoso, F.; Almeida, T.; Sousa, L.; Freitas, P.; Piedade, M. A portable and autonomous magnetic detection platform for biosensing. *Sensors* **2009**, *9*, 4119-4137.
68. Yamada, S.; Chomsuwan, K.; Iwahara, M. Application of giant magnetoresistive sensor for nondestructive evaluation. In *Proceedings of the IEEE Sensors*, Daegu, South Korea, October 2006; pp. 927-930.
69. Jongwoo, J.; Jiseong, H.; Jinyi, L. Quantitative nondestructive evaluation of the crack on the austenite stainless steel using the induced eddy current and the hall sensor array. In *Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC 2007)*, Warsaw, Poland, May 2007; pp. 1-6.
70. Paasi, J.; Kalliohaka, T.; Korpela, A.; Soderlund, L.; Hermann, P. F.; Kvitkovic, J.; Majoros, M. Homogeneity studies of multifilamentary BSCCO tapes by three-axis Hall sensor magnetometry. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **1999**, *9*, 1598-1601.
71. Muck, M.; Korn, M.; Welzel, C.; Grawunder, S.; Scholz, F. Nondestructive evaluation of various materials using a SQUID-based eddy-current system. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **2005**, *15*, 733-736.
72. Ruosi, A.; Pepe, G.; Peluso, G.; Valentino, M.; Monebhurrun, V. Experimental and numerical results of electromagnetic nondestructive testing with HTc SQUIDS. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **1999**, *9*, 3499-3502.
73. Junjun, X.; Naiguang, L.; Udpa, L.; Udpa, S. Nondestructive inspection using Rotating Field Eddy Current (RoFEC) probes. In *Proceedings of the 14th Biennial IEEE Electromagnetic Field Computation (CEFC 2010)*, Chicago, IL, USA, May 2010; p. 1.
74. IBG Home Page. Available online: www.ibgndt.com (accessed on 17 January 2011).
75. Puftechnik Home Page. Available online: <http://www.pruftechnik.com> (accessed on 17 January 2011).
76. Fahmy, M.N.I.; Hashish, E.A.; Elshafiey, I.; Jannound, I. Advanced system for automating eddy-current nondestructive evaluation. In *Proceedings of the Seventeenth National Radio Science Conference (NRSC 2000)*, Minufiya, Egypt, February 2000; pp. 1-8.
77. Rao, B.P.C.; Raj, B.; Jayakumar, T.; Kalyanasundaram, P.; Arnold, W. A New approach for restoration of eddy current images. *J. Nondestruct. Eval.* **2001**, *20*, 61-72.
78. Bachnak, R.; King, S. Non-destructive evaluation and flaw visualization using an eddy current probe (ICONS 2008). In *Proceedings of the IEEE Third International Conference on Systems*, Cancun, Mexico, April 2008; pp. 134-139.

79. Chen, Z.; Miya, K. A New Approach for Optimal Design of Eddy Current Testing Probes. *J. Nondestruct. Eval.* **1998**, *17*, 105-116.
80. Wilson, J.W.; Tian, G.Y.; Barrans, S. Residual magnetic field sensing for stress measurement. *Sens. Actuat. A* **2007**, *135*, 381-387.

© 2011 by the authors; licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>).

Capítulo 3: Artículo 2 del compendio

En el presente capítulo se incluyen los datos bibliográficos del Artículo 2 del compendio y el texto íntegro del mismo.

3.1 Datos bibliográficos

TÍTULO: *Comparative evaluation of coil and Hall probes in hole detection and thickness measurement on aluminum plates using eddy current testing.*

AUTORES: Javier García-Martín, Jaime Gómez-Gil.

REVISTA: *Russian Journal of Nondestructive Testing.*

CATEGORÍAS DE LA REVISTA: *Materials Science y Characterization & Testing.*

EDITOR: *Vitali E. Shcherbinin.*

AÑO DE PUBLICACIÓN: 2013.

ISSN: 1061-8309. **ISSN ONLINE:** 1608-3385.

DOI: 10.1134/S1061830913080044.

VOLUMEN: 49.

NÚMERO: 8.

PÁGINAS: 482–491.

REFERENCIA: [2]

3.2 Texto íntegro del artículo

A continuación, se incluye el Artículo 2 del compendio tal y como aparece publicado en la revista *Russian Journal of Nondestructive Testing*. El factor de impacto de la revista en 2013 fue 0.350 según el JCR.

MAGNETIC AND ELECTROMAGNETIC
METHODS

Comparative Evaluation of Coil and Hall Probes in Hole Detection and Thickness Measurement on Aluminum Plates Using Eddy Current Testing¹

J. Garcia-Martin^{a, b} and J. Gomez-Gil^b

^a*Ingenieria y Sistemas de Ensayos no Destructivos (ISEND), Luis Proust, 10, Technological Park of Boecillo, 47151 Valladolid, Spain*

^b*Department of Signal Theory, Communications and Telematic Engineering, University of Valladolid (UVA), 47011 Valladolid, Spain*

e-mail: jgarmar@ribera.tel.uva.es; jgomez@tel.uva.es

Received September 6, 2012

Abstract—The design, test, and comparison of one coil probe and one Hall probe using eddy current testing in the field of non-destructive evaluation is presented. Real tests were performed using aluminum plates. This research concludes that (1) both probes provided broadband frequency responses up to 1000 KHz, which are wide enough for the most common applications; (2) the coil probe provided higher signal to noise ratio (*SNR*) than the Hall probe; (3) both probes detected the four holes successfully and provided enough sensitivity to classify them by diameter; and (4) the coil probe provided higher accuracy than the Hall probe when measuring thickness lower than 1 mm, and lower accuracy when measuring thickness higher than 1.5 mm.

Keywords: non-destructive testing, eddy current, Hall probe, coil probe, thickness measurement

DOI: 10.1134/S1061830913080044

1. INTRODUCTION

The non-destructive techniques based on eddy currents are widely used in industry because they allow testing at very high speeds and without contact between the probe and the test piece. Eddy current techniques are employed in applications as thickness measurement [1, 2], real-time quality inspection in production lines up to 1200 Celsius degrees [3], and detection of superficial heat treatments [4]. The most common eddy current probes for non-destructive evaluation are coil probes, although others based on Hall sensors [5] or magneto-resistors [6] are also used.

The coil probes are constructed by means of one driver coil that generates the primary induction field. Depending on the probe type, the induction flux from the eddy currents is transformed into a voltage signal using the same driver coil or another coil which is designed specifically for receiving fields [3]. The characteristics of the coil probes for eddy current testing are the simplicity of their construction, the huge dynamic range, and the possibility of focusing the sensor [1]. However, the coil probes present some drawbacks such as high induction voltage at the start of the signal, the difficulty to make the area as small as desired, and the difficulties of working at low frequencies due to their limited sensitivity [7]. The research works of many authors, especially in the aeronautical [8] and the nuclear [9] industries, have permitted the development of the coil probes.

The Hall probes are formed by one driver coil that generates the primary induction field and one Hall sensor that detects the induction flux changes leaking from the test surface. The Hall probes provide high accuracy and low frequency-dependent sensitivity. The Hall probes are usually specially designed for specific applications, such as the superficial or deep crack detection and the characterization of materials. The advantages of using Hall sensors are the easy miniaturization and the possibility of integration within microelectronic circuits [5]. Some disadvantages are mainly their limited sensitivity to silicon, their high level of $1/f$ noise, and their relatively large offset [5]. The contributions of many researchers have permitted the development of the Hall probes for eddy current testing. For instance, Jongwoo et al. [10] presented a quantitative eddy current evaluation of cracks on austenite stainless steel using one Hall sensor

¹ The article is published in the original.

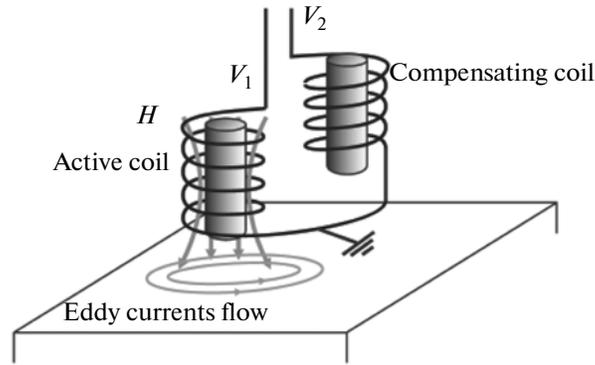


Fig. 1. Diagram of the designed coil probe.

array, He et al. [11] tested one differential Hall probe for defect detection in riveted structures of aircrafts, and Paasi et al. [12] presented one three-axis Hall probe for testing the superconductor homogeneity by measuring the three components of the magnetic fields from the eddy current flow.

The purpose of this paper is to design, to test, and to compare one coil and one Hall probe. To this aim, we obtained and compared the signal to noise ratio (*SNR*) with respect to the frequency, the *SNR* with respect to the diameter of the artificial holes, and the amplitude of lift-off variation employed for non-conductive thickness measurement.

2. MATERIAL

One coil probe and one Hall probe were designed to detect the eddy current flow. The probe diagrams, the coil impedance measurements, and the eddy current calculation to validate the design are presented in this section.

2.1. Coil Probe Design

One coil probe, which was formed by one active coil and one compensating coil, was designed following the diagram of Fig. 1. The active coil axis was placed perpendicularly to the test piece surface and operated in absolute mode. The coils had 100 turns, 4 layers, and 0.08 mm of wire diameter. The compensating coil was used to compensate the voltage and to increase the dynamic range of the probe. Table 1 presents the impedance values of the two coils at 0.1, 0.12, 1, 10, 100 KHz. The measurements were obtained using one LCR meter.

Table 1. Impedance values of active and compensating coils of the coil probe

| | Active coil | | | | |
|---------------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|
| Frequency, KHz | 0.1 | 0.12 | 1 | 10 | 100 |
| L , μH | 69 | 67 | 61.44 | 61.339 | 61.551 |
| XL , ohms | 0.043 | 0.051 | 0.39 | 3.85 | 38.67 |
| R , ohms | 3.0885 | 3.0887 | 3.0887 | 3.0887 | 3.0889 |
| Z , ohms | 3.09 | 3.09 | 3.11 | 4.94 | 38.80 |
| | Compensating coil | | | | |
| Frequency, KHz | 0.1 | 0.12 | 1 | 10 | 100 |
| L , μH | 69 | 67.1 | 61.76 | 61.648 | 61.864 |
| XL , ohms | 0.043 | 0.051 | 0.39 | 3.87 | 38.87 |
| R , ohms | 3.2608 | 3.2609 | 3.2607 | 3.2606 | 3.2606 |
| Z , ohms | 3.26 | 3.26 | 3.28 | 5.06 | 39.01 |

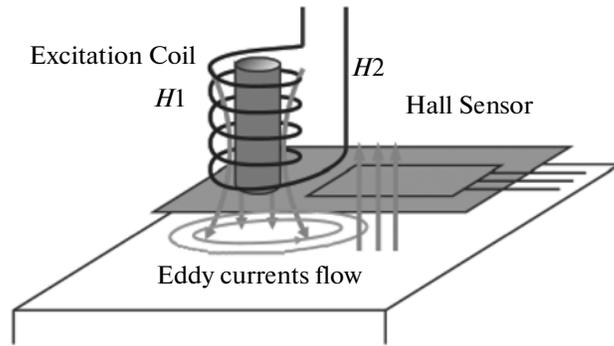


Fig. 2. Diagram of the designed Hall probe.

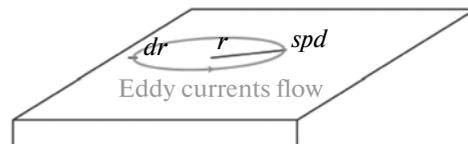


Fig. 3. Scheme of eddy current path for power calculation.

2.2. Hall Probe Design

One absolute Hall probe following the diagram of Fig. 2 was designed to detect the eddy currents that one magnetic source generates in the test piece. The Hall probe consisted of one excitation coil that operates as a magnetic source and one Honeywell S and C SS94A1 Hall sensor that acquires the magnetic field from the eddy currents and generates the Hall voltage signal. The Hall sensor sensitivity was 5 mV/G and the temperature drift was lower than 0.02%/K. The power voltage was 8 V that provided the linear Hall voltage response between 1.5 for the induction field of -500 G and 6.5 V for the induction $+500$ G. One Wheatstone bridge with external resistors was used to compensate the Hall DC voltage.

The excitation coil with 1.6 mm diameter ferrite core was powered by the eddy current equipment. The coil had 100 turns of wire distributed in 4 layers. The wire diameter was 0.08 mm. Table 2 presents the coil impedance values at 0.1, 0.12, 1, 10, 100 KHz, which were obtained using one LCR meter.

2.3. Eddy Current Calculation

This subsection presents the calculation of the intensity of the eddy currents to compute the sensitivity of the designed probes. The equations of this subsection are valid for both probes because they had the same induction coil. Only little differences between the coil impedance of both probes due to the manufacturing process were found.

Table 2. Impedance values of excitation coil of the Hall probe

| Frequency, KHz | 0.1 | 0.12 | 1 | 10 | 100 |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| L , μH | 70.3 | 68.5 | 63.16 | 63.056 | 63.032 |
| XL , ohms | 0.044 | 0.052 | 0.40 | 3.963 | 39.60 |
| R , ohms | 3.3456 | 3.3112 | 3.2611 | 3.2748 | 3.2627 |
| Z , ohms | 3.35 | 3.31 | 3.29 | 5.14 | 39.74 |

Table 3. Average real power of eddy currents

| <i>F</i> , KHz | 0.1 | 1 | 10 | 100 |
|-----------------|-------------|------------|-------------|---------|
| <i>Pdis</i> , W | 1.00911E-06 | 3.1909E-06 | 3.17338E-05 | 0.00065 |

Table 4. Ratio *R* between the dissipated power of eddy currents *Pdis* and the air-point dissipated power *Pdis_0* of the coil probe

| <i>F</i> , KHz | 0.1 | 1 | 10 | 100 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|
| <i>Pdis_0</i> , W | 0.019 | 0.019 | 0.019 | 0.012 |
| <i>R</i> , % | 0.01 | 0.02 | 0.20 | 5.25 |

The eddy current paths are concentric circumferences (Fig. 3). Using the Faraday Law and the sinusoidal variation of the induction $B = B_{\max}\sin(\omega t)$, the electromotive force *emf* of each current path can be calculated as:

$$emf = -\frac{\partial\phi B}{\partial t} = -\frac{\partial(NBS)}{\partial t} = -\frac{\partial(NS_{\max}\sin(\omega t)S)}{\partial t} = -NB_{\max}\omega \cos(\omega t)S, \tag{1}$$

where *N* is the number of coil turns, $\omega = 2\pi f$, and $S = \pi r^2$ is the area of the circle inside the circumference.

The electrical resistance of the differential eddy current path of Fig. 3 can be calculated as:

$$R = \frac{1\ 2\pi r}{\sigma \delta dr}, \tag{2}$$

where σ is the electrical conductivity of the inspected piece, *r* is the path radius, $2\pi r$ is the path length, *dr* is the differential width, and δ is the standard penetration depth (*spd*) [3].

The dissipated power of the differential eddy current path *dPdis* is calculated using the electromotive force and the path resistance as:

$$dPdis = \frac{V^2}{R} = \frac{(NB_{\max}\omega S)^2 \frac{1}{2}}{\frac{1\ 2\pi r}{\sigma \delta dr}} = N^2 B_{\max}^2 \omega^2 S^2 \frac{1}{4\pi r} \delta \sigma dr = N^2 B_{\max}^2 \omega^2 \pi^2 \frac{1}{4\pi} r^3 \delta \sigma dr. \tag{3}$$

The integration of Eq. (3) allows obtaining the average dissipated power of eddy currents as:

$$dPdis = \int_0^r dPdis dr = N^2 B_{\max}^2 \omega^2 \pi^2 \frac{1}{4\pi} \delta \sigma \int_0^r r^3 dr = N^2 B_{\max}^2 \omega^2 \pi^2 \frac{1}{16\pi} \delta \sigma r^4. \tag{4}$$

Equation (4) shows the quadratic relation of the dissipated power of eddy currents *Pdis* with respect to the number of turns *N*, the induction B_{\max} , and the pulsation ω . The dissipated power varies linearly with the standard penetration depth δ . The dissipated power *Pdis* is proportional to the fourth power of the

Table 5. *ADC-dynamic_range_ratio* calculation of the Hall probe

| <i>F</i> , KHz | 0.1 | 1 | 10 | 100 |
|--|---------|--------|-------|-------|
| <i>B_eddy_currents</i> , G | 0.018 | 0.17 | 1.77 | 14.21 |
| Hall sensor sensitivity, mV/G | 5 | 5 | 5 | 5 |
| <i>V</i> Hall sensor , mV | 0.089 | 0.89 | 8.84 | 71.05 |
| <i>G</i> , dB | 20 | 20 | 20 | 20 |
| <i>Vin_ADC</i> = <i>V</i> Hall sensor *Gain, V | 0.00089 | 0.0089 | 0.089 | 0.71 |
| <i>ADC</i> full scale measurement range, V | 2.2 | 2.2 | 2.2 | 2.2 |
| <i>ADC_dynamic_range_ratio</i> , % | 0.04 | 0.40 | 4.02 | 32.30 |

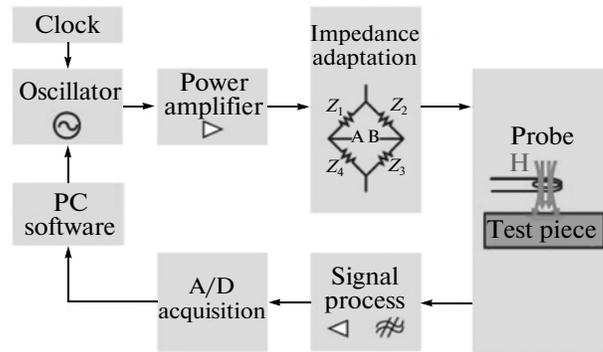


Fig. 4. Scheme diagram of the experimental setup.

radius r . Equation (4) allows computing the dissipated power. The numeric values are shown on Table 3 at the frequencies 0.1, 1, 10, 100 KHz.

2.3.1. Eddy current calculation for the coil probe. The calculation of the air-point average dissipated power P_{dis_0} , using the sinusoidal permanent state, permitted validating the coil probe sensitivity. The coil probes have low sensitivity at low frequencies since the reactance $X_L = 2\pi fL$ is low at low frequencies [7].

The dissipated power of eddy currents P_{dis} had to be close to P_{dis_0} in order to obtain enough sensitivity. The values of the ratio $R = P_{dis}/P_{dis_0}$ greater than 1% on Table 4 allowed knowing that the coil probe provided enough sensitivity in the detection of holes of diameter 2.5 mm at frequencies higher than 10 KHz.

2.3.2. Eddy current calculation for the Hall probe. The calculation of the secondary magnetic field from eddy currents $B_{eddy_currents}$ was necessary to determine the validity of the Honeywell S and C SS94A1 Hall sensor, taking into account the presence of an analog to digital converter ADC in the signal chain. It was necessary that the input voltage V_{in_ADC} , after the amplification G , reached at least the 1% of the full scale measurement range. Table 5 presents the calculation of the $ADC_dynamic_range_ratio$ (%). The $ratio = 4.02\%$ warranted a minimum sensitivity of the Hall probe at frequencies higher than 10 KHz.

2.4. Experimental Setup

The experimental setup was one PC-based system connected to one eddy current equipment, which was similar to the experimental setup employed by He et al. [13]. The equipment data processing modules were one sinusoidal generator, one power amplifier, one impedance adaptation module, one signal process block, and one A/D acquisition module (Fig. 4). An application software, which ran on the PC, processed the data from the probes and plotted the information on impedance planes.

3. METHODS

The methodology of the tests comprised three steps. Initially, the coil and the Hall probes were characterized and compared varying the frequency. One hole of diameter 2.5 mm was detected using one alu-

Table 6. SNR values in hole detection of the coil and the Hall probes at different frequencies

| F , KHz | | 10 | 20 | 50 | 100 | 200 | 1000 |
|------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| Coil probe | Amplitude, points | 500 | 1800 | 4000 | 7000 | 10 000 | 2500 |
| | Average noise, points | 10 | 40 | 30 | 30 | 50 | 40 |
| | SNR, dB | 33.98 | 33.06 | 42.50 | 47.36 | 46.02 | 35.92 |
| Hall probe | Amplitude, points | 600 | 750 | 1000 | 1000 | 650 | 200 |
| | Average noise, points | 60 | 25 | 20 | 17 | 20 | 200 |
| | SNR, dB | 20.00 | 29.54 | 33.98 | 35.39 | 30.24 | 0.00 |

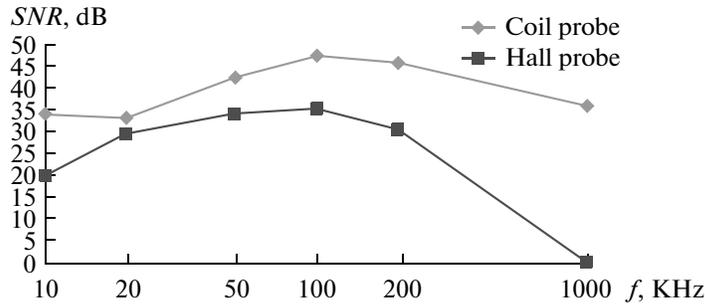


Fig. 5. SNR plot of hole detection of the coil and the Hall probes at different frequencies.

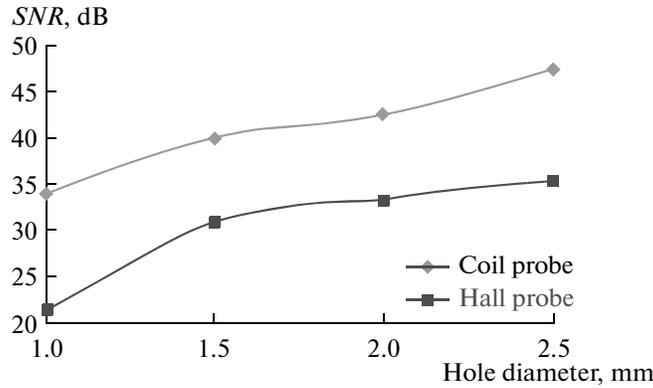


Fig. 6. SNR plot of hole detection of the coil and the Hall probes with different diameters.

minimum plate of thickness 1.6 mm. The peak amplitude and the average noise of signal were measured to calculate the SNR values in the hole detection as:

$$SNR(\text{dB}) = 20\log\left(\frac{\text{Peak response } (f)}{\text{Average noise } (f)}\right). \tag{5}$$

Secondly, four aluminum plates of thickness 1.6 mm were used. They had four holes of diameters 1, 1.5, 2, and 2.5 mm. The four artificial holes were detected using both probes and then, the SNR values in the hole detection varying the diameter were calculated as:

$$SNR(\text{dB}) = 20\log\left(\frac{\text{Peak response } (\text{hole_diameter})}{\text{Average noise}}\right). \tag{6}$$

Finally, the sensitivity of thickness measurement was measured and compared for both probes. The measurements were based on the lift-off parameter, which is the distance between the probe and the conductive surface of the test piece. Non-conductive layers, whose thickness was 0.1 mm, were placed over the aluminum plate without holes or discontinuities. The reference coordinates at the impedance plane

Table 7. SNR values of hole detection of the coil and the Hall probes with different diameters

| Diameter of hole, mm | | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 |
|----------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| Coil probe | Amplitude, points | 1500 | 3000 | 4000 | 7000 |
| | Average noise, points | 30 | 30 | 30 | 30 |
| | SNR, dB | 33.98 | 40 | 42.50 | 47.36 |
| Hall probe | Amplitude, points | 200 | 600 | 800 | 1000 |
| | Average noise, points | 17 | 17 | 17 | 17 |
| | SNR, dB | 21.41 | 30.95 | 33.45 | 35.39 |

Table 8. Sensitivity values of thickness measurement of the coil and the Hall probes

| Thickness, mm | Coil probe | | Hall probe | |
|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|
| | Amplitude, points | Amplitude, dB | Amplitude, points | Amplitude, dB |
| 0 | 396.09 | 0.00 | 26.26 | 0.00 |
| 0.1 | 3472.95 | 18.86 | 394.30 | 18.86 |
| 0.2 | 6547.40 | 24.37 | 956.41 | 24.37 |
| 0.3 | 9336.81 | 27.45 | 1735.93 | 27.45 |
| 0.4 | 11466.31 | 29.23 | 2063.11 | 29.23 |
| 0.5 | 13446.43 | 30.62 | 2704.57 | 30.62 |
| 0.6 | 14970.81 | 31.55 | 3064.72 | 31.55 |
| 0.7 | 16342.91 | 32.31 | 3636.40 | 32.31 |
| 0.8 | 17571.58 | 32.94 | 3737.11 | 32.94 |
| 0.9 | 18641.61 | 33.45 | 4311.63 | 33.45 |
| 1 | 19539.83 | 33.86 | 4745.33 | 33.86 |
| 1.1 | 20373.94 | 34.23 | 5254.76 | 34.23 |
| 1.2 | 21096.68 | 34.53 | 5331.02 | 34.53 |
| 1.3 | 21722.08 | 34.78 | 5746.33 | 34.78 |
| 1.4 | 22264.77 | 35.00 | 6299.67 | 35.00 |
| 1.5 | 22768.65 | 35.19 | 6731.93 | 35.19 |
| 1.6 | 23170.75 | 35.34 | 6855.24 | 35.34 |

$Z_0 = (X_0, Y_0)$ were measured when the probes were in contact with the aluminum plate. Then, the coordinates $Z_i = (X_i, Y_i)$ for $i = 1 \dots N$ were measured varying the number of layers up to 16. The magnitudes $|Z_i - Z_0|$ of both sensors were computed as:

$$|Z_i - Z_0| = \sqrt{(X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2}; \quad i = 1 \dots N. \tag{7}$$

The difference of impedance in decibels was computed as:

$$SNR(\text{dB}) = 20 \log \left(\frac{|Z_i|}{|Z_0|} \right). \tag{8}$$

4. RESULTS

This section presents for both probes (1) the *SNR* in hole detection at different frequencies, (2) the *SNR* in hole detection with different diameters, and (3) the sensitivity in thickness measurements.

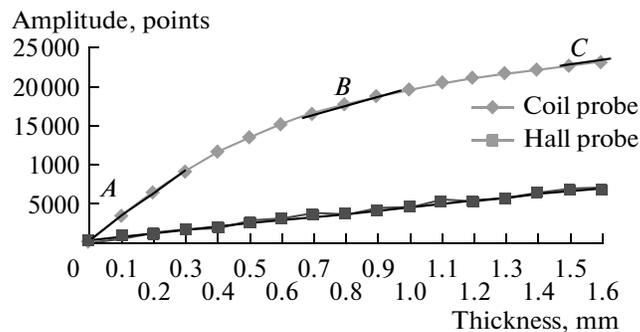


Fig. 7. Sensitivity plot of non-conductive thickness measurement based on the lift-off parameter. The coil probe shows a logarithmic response and the Hall probe shows a linear response. The slope of the coil curve is measured at the points A, B, and C. The slope of the Hall probe is approximately constant.

4.1. SNR of Hole Detection Varying the Frequency

The *SNR* in hole detection results at different frequencies are shown on Table 6 and Fig. 5. The plots of the probes present a peak in the proximity of 100 KHz. The *SNR* in the coil probe was higher than the *SNR* of the Hall probe over the 10–1000 KHz broadband.

4.2. SNR of Hole Detection Varying the Diameter

The *SNR* results of the hole detection with different diameters were obtained at 100 KHz. The peak amplitude with respect to the average noise *SNR* values were calculated and are presented on Table 7. The plot of Fig. 6 shows two parallel responses. The separation of the curves was 9.05 dB when the 2 mm diameter hole was detected. The coil probe provided better *SNR* than the Hall probe. Every hole of diameters 1, 1.5, 2, and 2.5 mm was detected. The minimum *SNR* was 21.41 dB when inspecting the 1 mm hole using the Hall probe. Both probes permitted the successful classification of the holes by their diameter using the *SNR*.

4.3. Sensitivity of Thickness Measurements

The results of the sensitivity of both sensors measuring thickness of non-conductive layers are presented on Table 8 and Fig. 7.

The coil probe curve was logarithmic while the Hall probe curve was linear (Fig. 7). The slope of the Hall probe was approximately constant and reached 4280 points/mm. The slope of the coil probe curve was measured (1) when the number of layers was below 4, (2) when the number of layers was between 7 and 10, and (3) when the number of layers was between 15 and 16.

At the beginning of the coil probe curve, when measuring small thicknesses (≤ 0.3 mm), the slope reached 31 130 points/mm, which was 7.27 times higher than the linear Hall probe slope. The slope of the coil probe curve was 10660 points/mm, 2.49 times higher than the Hall slope when measuring thickness between 0.7 and 1 mm. Finally the coil slope was 4020 points/mm, lower than the Hall slope, when measuring thickness between 1.5 and 1.6 mm. Therefore, the accuracy of the coil probe was higher than the accuracy of the Hall probe measuring small (≤ 0.3 mm) and medium (0.7–1 mm) thicknesses. However, when measuring thickness near of 1.6 mm, the Hall probe accuracy was higher than the coil probe accuracy.

5. DISCUSSION

The design, test, and comparison of one compensated absolute coil probe and one absolute Hall probe using eddy current testing in the field of non-destructive evaluation have been shown. To our knowledge, only He et al. [13] published a similar comparison of probes. However, their results are not comparable to our results because they employed pulsed eddy current techniques whereas we used conventional eddy current techniques.

Four results of this research are discussed. First, the designed coil and Hall probes provided broadband frequency responses up to 1000 KHz. The standard penetration depth of eddy currents in metals decreases with the increment of frequency [3]. Frequencies up to 1 KHz are used for subsurface tests and frequencies in the range of several KHz are used for surface tests [14]. Therefore, both probes are able to detect surface and subsurface defects, which are wide enough for the most common applications.

Second, the coil probe provided higher *SNR* than the Hall probe. This result is justified as the coil probe operated in double mode, while the Hall probe operated inherently in separate mode. In double mode, the exciting coil generates the induction field and also receives the signals from eddy currents with high intensity. In separate mode, the exciting coil only generates the field, because another magnetometer picks up the signals from the eddy currents. The Hall probe of this research operates in separate mode and is similar to the probes of other authors such as Tian et al. [15]. The eddy current fields in separate mode are strongly weakened at the position of the sensor, which justifies the lower *SNR* of the Hall probe with respect to the coil probe.

Third, both probes detected the four holes successfully and provided enough sensitivity to classify them by diameter. The *SNR* points of Fig. 6 are undoubtedly enough separated to employ one classifier, which could be implemented in different ways, as for example using neural networks [16].

And finally, the coil probe provided higher accuracy than the Hall probe when measuring thickness lower than 1 mm, and lower accuracy when measuring thickness greater than 1.5 mm. The coil probe had higher lift-off variation than the Hall probe, which provided higher accuracy when the thickness was small. However, the Hall probe lift-off variation overcame the coil probe lift-off variation when measuring thickness greater than 1.5 mm, which made the thickness measurement of the Hall probe more accurate. As the coil probe operated in double mode, the induction field in the nearest of the active coil was more intense than the induction field in the Hall probe, which operated in separated mode. This caused that small variations of the thickness near the coil probe resulted in high variations of the lift-off parameter.

There are other ways to measure thickness that are not based on the lift-off parameter. Yuting et al. [4] presented a thickness measurement method immune to the lift-off effect by using the phase signature of the inductance change. But their method was presented only for coil probes, while the procedure followed in this article is valid for coil and Hall probes, and has fewer computational requirements.

6. CONCLUSIONS

Real tests performed with coil and Hall probes over aluminum plates using eddy current testing concluded that (1) both probes provided broadband frequency responses up to 1000 KHz, which are wide enough for the most common applications, and were close to the theoretical frequency responses; (2) the coil probe provided higher *SNR* than the Hall probe in the hole detection tests; (3) both probes detected the four holes successfully and provided enough sensitivity to classify them by diameter; (4) the coil probe provided higher accuracy than the Hall probe when measuring thickness lower than 1 mm, and lower accuracy when measuring thickness higher than 1.5 mm.

7. ACKNOWLEDGMENTS

The authors acknowledge to Programa Torres Quevedo from Ministerio de Educación y Ciencia in Spain, co-founded by the European Social Fund (PTQ-10-02437). The authors thank the company Ingeniería y Sistemas de Ensayos no Destructivos ISEND (www.isend.es/en) for the valuable help in the experimental tests.

REFERENCES

1. de Haan, V.O., de Jong, P.A., Perez, L., and Dolabdjian, C., Towards material characterization and thickness measurements using pulsed eddy currents implemented with an improved giant magneto resistance magnetometer, in *Proceedings of 9th. European NDT Conference (ECNDT'06)*, Berlin, Germany, 2006, pp. 1–8.
2. Syasko, V., Chertov, D., and Ivkin, A., Measuring the thicknesses of the walls of carbon composite materials using the eddy-current phase method, *Russ J. Nondestr. Test.*, 2011, vol. 47, no. 8, pp. 561–567.
3. Garcia-Martin, J., Gomez-Gil, J., and Vazquez-Sanchez, E., Non-Destructive techniques based on eddy current testing, *Sensors*, 2011, vol. 11, no. 3, pp. 2525–2565.
4. Yuting, W., Zhang, C., and Lijun, X., A simplified eddy current model for non-destructive thickness measurement immune to the lift-off effect, *Proceedings of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Hangzhou, China, 2011, pp. 1–4.
5. Novkovski, N., Progress and limitations in magnetic field measurements, in *Geomagnetics for Aeronautical Safety*, Rasson, J. and Delipetrov, T., Eds., Springer Netherlands, 2006, pp. 201–212.
6. Zinan, L., Zheng, X., and Haijun, L., The application of magnetic sensor in MIT, *Proceedings of World Automation Congress (WAC 2008)*, Hawaii, USA, 2008, pp. 1–4.
7. Bernieri, A., Betta, G., and Ferrigno, L., A multi-sensor probe for non-destructive testing on conductive materials, *Proceedings of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC/2002)*, Anchorage, AK, USA, 2002, pp. 861–866.
8. Thollon, F., Lebrun, B., Burais, N., and Jayet, Y., Numerical and experimental study of eddy current probes in NDT of structures with deep flaws, *NDT E Int.*, 1995, vol. 28, no. 2, pp. 97–102.
9. Chen, Z. and Miya, K., A new approach for optimal design of eddy current testing probes, *J. Nondestructiv. Eval.*, 1998, vol. 17, no. 3, pp. 105–116.
10. Jongwoo, J., Jiseong, H., and Jinyi, L., Quantitative nondestructive evaluation of the crack on the austenite stainless steel using the induced eddy current and the Hall sensor array, *Proceedings of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC 2007)*, Warsaw, Poland, 2007, pp. 1–6.
11. He, Y., Pan, M., Luo, F., and Tian, G.Y., Pulsed eddy current imaging and frequency spectrum analysis for hidden defect nondestructive testing and evaluation, *NDT E Int.*, 2011, vol. 44, no. 4, pp. 344–352.

12. Paasi, J., Kalliohaka, T., Korpela, A., Soderlund, L., Hermann, P.F., Kvitkovic, J., et al., Homogeneity studies of multifilamentary BSCCO tapes by three-axis Hall sensor magnetometry, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 1999, vol. 9, no. 2, pp. 1598–1601.
13. He, Y., Luo, F., Pan, M., Weng, F., Hu, X., Gao, J., et al., Pulsed eddy current technique for defect detection in aircraft riveted structures, *NDT E Int.*, 2010, vol. 43, no. 2, pp. 176–181.
14. Ramos, H., Postolache, O., Alegria, F.C., and Lopes Ribeiro, A., Using the skin effect to estimate cracks depths in metallic structures, *Proceedings of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC 2009)*, Singapore, 2009, pp. 1361–1366.
15. Tian, G.Y., Sophian, A., Taylor, D., and Rudlin, J., Multiple sensors on pulsed eddy-current detection for 3-D subsurface crack assessment, *IEEE Sens. J.*, 2005, vol. 5, no. 1, pp. 90–96.
16. Angeli, M., Burrascano, P., Cardelli, E., Fiori, S., and Resteghini, S., Classification of eddy current NDT data by probabilistic neural networks, in *Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN'99)*, Washington D.C., USA, 1999, pp. 4012–4014.

Capítulo 4: Artículo 3 del compendio

En el presente capítulo se incluyen los datos bibliográficos del Artículo 3 del compendio y el texto íntegro del mismo.

4.1 Datos bibliográficos

TÍTULO: *Clasificación del tratamiento térmico de aceros con ensayos no destructivos por corrientes inducidas mediante redes neuronales.*

TÍTULO VERSIÓN TRADUCIDA: *Heat-treatment classification of steels with nondestructive eddy current testing using neural networks*

AUTORES: Javier García-Martín, Víctor Martínez-Martínez y Jaime Gómez-Gil.

REVISTA: DYNA-Ingeniería e Industria.

CATEGORÍA DE LA REVISTA: *Engineering, Multidisciplinary.*

EDITOR: Publicaciones DYNA SL

AÑO DE PUBLICACIÓN: 2014.

ISSN: 0012-7361.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7083>.

VOLUMEN: 89.

NÚMERO: 5.

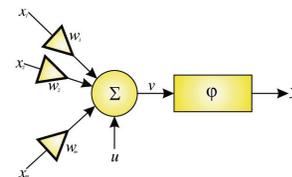
PÁGINAS: 526-532.

REFERENCIA: [3]

4.2 Texto íntegro del artículo

A continuación, se incluye el Artículo 3 del compendio tal y como aparece publicado en la revista *DYNA-Ingeniería e Industria*. El factor de impacto de la revista en 2014 fue 0.179 según el JCR.

Clasificación del tratamiento térmico de aceros con ensayos no destructivos por corrientes inducidas mediante redes neuronales



HEAT-TREATMENT CLASSIFICATION OF STEELS WITH NONDESTRUCTIVE EDDY CURRENT TESTING USING NEURAL NETWORKS

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7083> | Recibido: 23/01/2014 • Aceptado: 20/05/2014

Javier Garcia-Martin ^{1,2}, Víctor Martínez-Martínez ², Jaime Gomez-Gil ²

¹ INGENIERÍA Y SISTEMAS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (ISEND). Parque Tecnológico de Boecillo. C/Luis Proust, 10 - 47151 Valladolid. Tfno. +34 983 132307.

² UNIVERSIDAD DE VALLADOLID. Departamento de Teoría de la Señal, Comunicaciones e Ingeniería Telemática. Campus Miguel Delibes - 47011 Valladolid. jgarmar@ribera.tel.uva.es

ABSTRACT

Eddy current-nondestructive techniques are increasingly present in industry because of the growing quality control demand. In addition to the classical crack detection, eddy currents permit physic and metallurgic properties detection in steels. The impedance values of one eddy-current-generating coil permit to differentiate steel pieces with different heat treatments. These impedance values can be processed with Artificial Neural Networks (ANNs) to implement automatic and efficient classifiers.

In this article two ANN classifiers that processed monofrequency impedances and one ANN classifiers that processed multifrequency impedances are compared. The impedances were extracted from two steel samples sets with different heat treatments. The predominant microstructure in the first set was martensite and bainite and in the second one was perlite. As experimental results, the monofrequency classification accuracy rate was 90% while the multifrequency classification reached 99.9%, the theoretical computing workload of the best multifrequency classifier was between 33% and 50% lower than the best monofrequency classifier, and the multifrequency classification execution time was 22% smaller than the measured time using the monofrequency methods.

Keywords: Classification algorithms, heat treatment, steel, artificial neural networks, nondestructive testing, eddy currents.

RESUMEN

Las técnicas de ensayos no destructivos basadas en corrientes inducidas están cada vez más presentes en la industria debido a la creciente demanda de los controles de calidad. Además de la detección clásica de defectos, con corrientes inducidas es también posible detectar propiedades físicas o metalúrgicas en piezas de acero. Las medidas de impedancia de un solenoide que genera corrientes inducidas en el acero permiten diferenciar piezas que han sido sometidas a tratamientos térmicos diferentes, las cuales, pueden procesarse después con Redes Neuronales Artificiales (RNAs) para implementar clasificadores automáticos y eficientes.

En este artículo se comparan dos clasificadores de piezas implementados con RNAs que procesaron impedancias monofrecuencia y un tercer clasificador RNA que procesó con impedancias multifrecuencia. Las impedancias fueron extraídas de dos grupos de piezas de acero con tratamientos térmicos diferentes, siendo la martensita y la bainita las microestructuras predominantes en el primer grupo y la perlita en el segundo.

Como resultados experimentales se obtuvo una tasa de acierto de clasificación monofrecuencia cercana al 90% y de un 99.9% en el caso multifrecuencia, una carga computacional teórica del clasificador multifrecuencia entre un 33% y un 50% inferior a la de los métodos monofrecuencia y un tiempo de ejecución de la clasificación multifrecuencia un 22% inferior al de los métodos monofrecuencia.

Palabras clave: Algoritmo de clasificación, tratamiento térmico, acero, redes neuronales artificiales, ensayos no destructivos, corrientes inducidas.

1. INTRODUCCIÓN

Las propiedades mecánicas del acero dependen tanto de su composición química como de su microestructura cristalina. Numerosas piezas de acero se someten en la industria a tratamientos térmicos para modificar esta microestructura sin cambiar la composición y conseguir unas propiedades mecánicas controladas de dureza, resistencia al desgaste y tenacidad. Las variables clave de los tratamientos térmicos son la composición química de partida y, atendiendo al ciclo térmico, la temperatura, la duración y la velocidad de enfriamiento [1]. Entre los diferentes tipos de tratamientos térmicos se encuentran los de templado, que realizan un calentamiento seguido de un enfriamiento rápido controlado del acero para incrementar la dureza y resistencia provocando transformaciones microestructurales martensíticas y/o bainíticas [2].

Los métodos más tradicionales para la medición de dureza en el acero se basan en los durómetros de indentación de tipo *Rockwell*, *Brinell* y *Vickers*. Como alternativa a estos test se encuentran los ensayos no destructivos con corrientes inducidas, que además de la aplicación tradicional de detección de defectos, permiten determinar propiedades físicas y metalúrgicas del acero [1]. Las técnicas de corrientes se caracterizan por su fiabilidad para la caracterización de los tratamientos térmicos en entornos industriales y ahorran costes de fabricación [3]. Estas técnicas aportan ventajas sobre los métodos tradicionales de indentación pues permiten ensayos sin contacto y sin retardos significativos permitiendo el análisis de la totalidad de la producción [4]. Además, proporcionan ensayos de alta sensibilidad, alta velocidad de detección y permiten ser automatizados [5].

La potencia de las técnicas basadas en corrientes para clasificar piezas de acero según el tratamiento térmico recibido se encuentra en el procesado de la información proporcionado por el equipo de instrumentación. Uno de los métodos que están adquiriendo una mayor importancia en la actualidad son las Redes Neuronales Artificiales (RNAs), que son paradigmas de aprendizaje y procesamiento cuya principal característica es la capacidad de inferir relaciones entre conjuntos de datos de entrada y de salida [6]. Las RNAs aportan las ventajas de poder trabajar con modelos con un número elevado de entradas o salidas sin incrementos en la complejidad y la posibilidad de clasificación de datos no lineales [7].

En este artículo se combinan las técnicas no destructivas de corrientes mono y multifrecuencia y redes neuronales, presentándose una comparativa entre tres RNAs diferentes que clasifican piezas de acero en función del tratamiento térmico recibido. En la bibliografía se pueden encontrar redes neuronales que procesan datos de ensayos con corrientes inducidas para la caracterización de defectos en piezas, como en los trabajos de Chady *et al.* [8] y Wrzuszczak *et al.* [9]. Sin embargo consideramos novedosa esta combinación de ensayos multifrecuencia y redes para determinar el tratamiento térmico en el acero, por lo que consideramos que el trabajo es una aportación que puede contribuir a mejorar los controles de calidad robotizados en las líneas de producción industriales.

2. CLASIFICACIÓN DE TRATAMIENTO TÉRMICO CON CORRIENTES INDUCIDAS

La aproximación de piezas de acero a una sonda inductiva alimentada por un oscilador provoca la generación de corrientes eléctricas inducidas en la superficie y en el interior de dichas piezas conforme al efecto pelicular [4]. Las corrientes $J(z)$ de la Ecuación (1) son más intensas en la superficie J_{max} y descienden exponencialmente con la profundidad dependiendo del acero aproximado según su conductividad σ , su permeabilidad μ_r, μ_o y la frecuencia f de la oscilación. La disminución de las corrientes se cuantifica con el parámetro “profundidad estándar de penetración” δ que se define en la Ecuación (1). Para una explicación más extensa sobre el comportamiento de las corrientes inducidas en los metales el lector puede consultar los libros de Mix [10] y de Davis [11].

$$J(z) = J_{max}e^{-z/\delta}, \text{ siendo } \delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_o \mu_r \sigma}} \quad (1)$$

El flujo de corrientes inducidas en las piezas de acero provoca un cambio en la impedancia inicial del solenoide $Z_{aire} = R_a + j2\pi f L_a$. La detección de tratamiento térmico utilizando corrientes inducidas se basa en que su flujo depende de la conductividad eléctrica σ y de la permeabilidad magnética relativa μ_r del acero que se aproxima. A su vez, estas variables guardan relación con la microestructura metalúrgica de los diagramas de hierro-carbono. De esta manera un grupo de piezas de acero sometidas a un tratamiento térmico genera una impedancia del solenoide en aproximación $Z_1 = R_1 + j2\pi f L_1$ que es ligeramente diferente $Z_2 = R_2 + j2\pi f L_2$ en el caso de otro grupo de piezas sometidas a un tratamiento distinto.

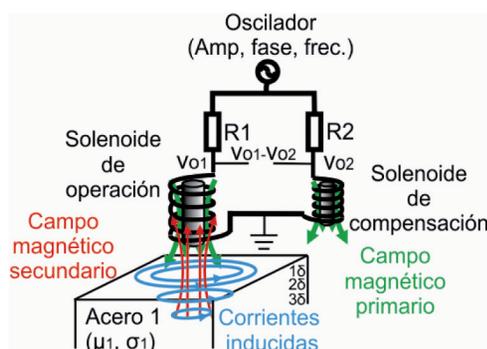


Figura 1: Generación de corrientes inducidas para la clasificación de piezas de acero por su tratamiento térmico

Los equipos de instrumentación de corrientes se comportan como extractores de impedancias y suelen mostrar un plano de impedancia bidimensional que representa en un eje la parte real $Re(Z)$ y en el otro la parte imaginaria $Im(Z)$. El final de las curvas de aproximación (o *lift-off*) de las m muestras tomadas de las piezas con tratamiento 1 forman una nube de puntos próximos $\{Z_{1,1}, Z_{1,2} \dots Z_{1,m}\}$, mientras que las n muestras tomadas de las piezas con tratamiento 2 generan otra nube de puntos cercanos $\{Z_{2,1}, Z_{2,2} \dots Z_{2,n}\}$ (Figura 2). El trabajo de clasificación consiste en calcular la mejor frontera de decisión bidimensional que maximice la tasa de acierto de clasificación de piezas, para lo que pueden emplearse métodos basados en RNAs como los presentados en este estudio.

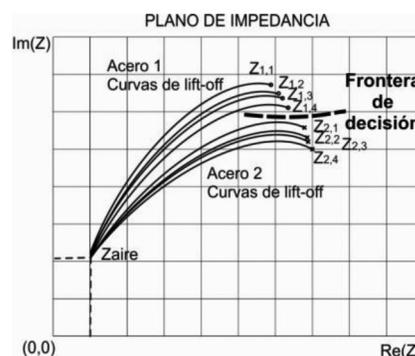


Figura 2: Plano de impedancia. Curvas de lift-off de aproximación de piezas con tratamientos térmicos 1 y 2 a un solenoide y frontera de decisión de clasificación

3. REDES NEURONALES

Esta sección muestra una breve introducción a las redes neuronales. Para una explicación más extensa y completa sobre su funcionamiento puede consultar los libros de Hayking [6] y Bishop [12].

3.1. LA NEURONA: UNIDAD ELEMENTAL DE PROCESADO

Las redes neuronales son herramientas complejas de procesamiento de datos inspiradas en el sistema nervioso de los animales. Las redes están compuestas por múltiples neuronas que constituyen unidades básicas de procesamiento capaces de generar un valor de salida en función de unos valores de entrada. En la Figura 3 se muestra la estructura de la neurona básica más común denominada *perceptrón*, la cual multiplica los valores de entrada (X_1, X_2, \dots, X_m) por los pesos (W_1, W_2, \dots, W_m), suma todos estos valores junto con umbral de activación (u) y aplica a su resultado v la función de activación ϕ . La tangente hiperbólica, la arcotangente o las funciones lineales son algunos ejemplos de ϕ .

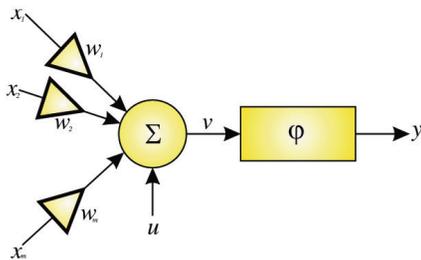


Figura 3: Estructura del perceptrón

3.2. ESTRUCTURA DE UNA RNA

El gran potencial de las RNAs se consigue con la formación de redes que interconectan perceptrones, de modo similar a las neuronas que se agrupan para constituir un cerebro. Sin embargo, existe una diferencia abismal entre el cerebro humano y las RNAs ya que éste consta de unas 10^{11} neuronas [13], mientras que el número de neuronas de las RNAs no suele exceder de las decenas.

3.2.1. Estructura de capas

Las neuronas de las RNAs se estructuran en capas, distinguiéndose la capa de entrada, cuyas neuronas únicamente introducen los datos en la red, las capas ocultas, que realizan el núcleo del procesamiento, y la capa de neuronas de salida, que muestra las variables de salida. Tanto el número de capas ocultas como el número de neuronas en cada capa oculta son parámetros de diseño de las redes.

3.2.2. Interconexión de neuronas

Las RNAs se pueden clasificar también en función de las conexiones entre neuronas: por un lado existen las RNAs *feedforward*, con conexiones exclusivamente hacia adelante entre las neuronas de una capa n -ésima con las neuronas de capas siguientes $\{n + 1, n + 2, \dots\}$; por el otro, están las RNAs *feedback*, con conexiones hacia atrás entre neuronas de una misma capa o con capas anteriores.

Además las RNAs se pueden clasificar en función del número de conexiones de cada neurona, distinguiéndose dos tipos. Por un lado, las “redes totalmente conectadas” tienen la salida de cada neurona de una capa conectada a las entradas de todas las neuronas de la capa siguiente. Por otro lado, las “redes localmente conectadas” no tienen todas las salidas de las neuronas de una capa conectadas a la entrada de las neuronas de la capa siguiente. A efectos aclaratorios en la Figura 4 se muestra una RNA multicapa *feedforward* totalmente conectada.

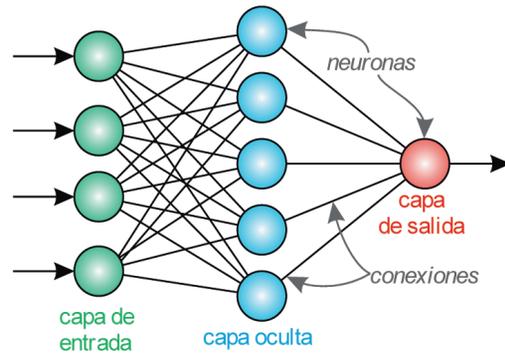


Figura 4: Estructura de una RNA feedforward totalmente conectada

3.3. ENTRENAMIENTO

El entrenamiento es la etapa posterior a la definición de la estructura de la RNA.

3.3.1. Tipos de aprendizaje

Los métodos empleados en el entrenamiento pueden ser supervisados o no supervisados en función de la información proporcionada a la red. En el aprendizaje supervisado se proporcionan a la red tanto los valores de entrada como los de salida asociados a dichas entradas. El aprendizaje en este caso consiste en ajustar los pesos y umbrales de activación de las neuronas, con el fin de minimizar el error al estimar esos valores de salida. Por otro lado, en el aprendizaje no supervisado únicamente se proporcionan a la red valores de entrada y ésta se ajusta infiriendo relaciones matemáticas entre las entradas.

En el caso del aprendizaje supervisado del perceptrón multicapa de tipo *feedforward*, el método más empleado es el *backpropagation* [14], y para su implementación el algoritmo más utilizado es el de *Levenberg-Marquardt*, el cual combina algoritmos de descenso en gradiente y de optimización *Gauss-Newton* [15, 16].

3.3.2. Criterio de parada

El entrenamiento de una RNA es un proceso iterativo que requiere un criterio de parada. Algunos criterios son la parada transcurrido un tiempo de iteración o alcanzado un número de iteraciones prefijado, la parada al alcanzar un error aceptable, la parada al alcanzar una tasa de acierto de un clasificador aceptable o la parada al detectar que los resultados no mejoran al aumentar el número de iteraciones.

3.3.3. Inicialización

El proceso de entrenamiento depende de la inicialización de la RNA, de modo que diferentes inicializaciones pueden conducir a RNAs con resultados distintos. Por ello, se suelen

variar los valores de inicialización de las RNAs en cada iteración para explorar el espacio vectorial de pesos y umbrales de activación de una manera completa y mejorar el resultado del entrenamiento. En la *Figura 5* se presenta un esquema del entrenamiento iterativo para mejorar posibles malos resultados debidos a una mala inicialización.



Figura 5: Esquema del proceso de entrenamiento de una RNA empleando un algoritmo iterativo.

4. OBJETIVOS

El objetivo general del artículo es la comparación de tres RNAs que implementan clasificadores automáticos de piezas de acero forjadas con enfriamiento rápido y correcto para una aplicación concreta, con microestructura predominante martensítica y bainítica y dureza aceptable, respecto de otras piezas no correctas, enfriadas más lentamente que las primeras, con microestructura predominante de perlita y algo de bainita y con dureza inferior al valor mínimo aceptable.

Los datos de entrada de las RNAs fueron medidas de impedancia de una sonda inductiva tomadas a diferentes frecuencias que proceden de la tecnología de ensayos no destructivos por corrientes inducidas. Se emplearon dos RNAs cuyas entradas fueron impedancias a las frecuencias de trabajo 50 y 100 kHz y una tercera RNA que utilizó simultáneamente las impedancias a las dos frecuencias.

Los objetivos específicos del artículo son comparar la tasa de acierto de clasificación de piezas de las tres RNAs, comparar la carga computacional calculada de las RNAs y comparar el tiempo de ejecución empleado por cada una de las RNAs para clasificar una pieza de acero.

5. MATERIALES

Para la realización de los experimentos se utilizó: un equipo de instrumentación de corrientes inducidas, una sonda inductiva, un juego de piezas de acero y un PC de procesado. Todos estos elementos se interconectaron según el diagrama de bloques del sistema de la *Figura 6*.

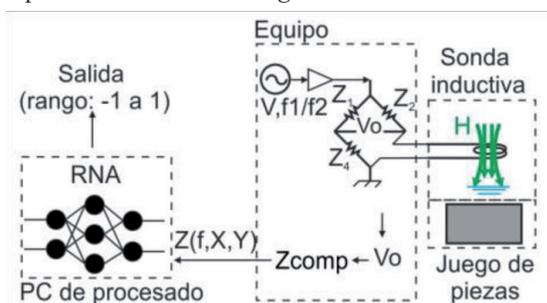


Figura 6: Diagrama de bloques del sistema (Equipo de corrientes, sonda inductiva, juego de piezas de acero y PC de procesado)

El equipo de instrumentación fabricado por ISEND se utilizó para la generación del flujo de corrientes en las piezas de inspección y la extracción de la impedancia resultante de la sonda inductiva.

La sonda inductiva también fabricada por ISEND, similar a la de la *Figura 1*, estaba formada por una bobina de operación y una bobina de compensación para aumentar su rango dinámico. Cada una de las bobinas, con núcleo de ferrita de diámetro 1.6 mm, estaba formada por 4 capas de hilo de cobre de 0.08 mm de diámetro hasta completar 100 vueltas.

El juego de piezas de acero se utilizó en las fases de entrenamiento, validación y test de cada una de las redes. El juego estaba formado por ocho levas forjadas fabricadas en acero 100Cr6 con denominación F1310 según UNE, divididas en dos grupos.

- El primer grupo de piezas había sido sometido a un enfriamiento rápido y habían adquirido una dureza deseada superior a 55HRC. En este grupo de piezas correctas predomina la microestructura metalúrgica de martensita y bainita.
- El segundo grupo de piezas, por el contrario, había recibido un enfriamiento más lento que las piezas del grupo anterior y su dureza resultante era inferior a 45HRC, predominando la microestructura de perlita y algo de bainita. Estas piezas no eran correctas para su posterior aplicación, por lo que había se separarlas de las del primer grupo con la tecnología presentada en el presente estudio.

El PC de procesado fue un ordenador portátil de propósito general con un procesador Intel Core i3 M350 @2.27GHz y una memoria RAM de 4 GB y se utilizó para implementar las tres RNAs de clasificación de piezas que se comparan en este estudio.

6. MÉTODOS

La metodología seguida estuvo formada por las siguientes cuatro etapas: inicialmente se realizó en ensayo no destructivo para la toma de medidas de impedancia, después se realizó un preprocesado de los datos adquiridos, a continuación se implementaron los clasificadores de piezas de acero mediante RNAs y finalmente se realizó un análisis de los clasificadores implementados.

6.1. TOMA DE DATOS

La toma de datos consistió en la aproximación de las piezas de acero al campo magnético primario creado por la sonda inductiva y la medida de la impedancia resultante a las frecuencias de trabajo 50 y 100 kHz. Se tomaron 40 medidas de impedancia manteniendo una distancia inferior a 0.1 mm entre sonda y pieza. Según la *Ecuación (1)* la profundidad estándar de penetración de las corrientes inducidas fue de 54.04 μm a 50 kHz y de 32.41 μm a 100 kHz, por lo que la exploración predominante fue superficial. Las duplas de impedancia compleja a cada frecuencia de trabajo f se expresa en puntos de conversión procedentes de la digitalización de un ADC.

6.2. PRE-PROCESADO

A continuación se normalizaron las componentes real (Z_x) e imaginaria (Z_y) de las impedancias adquiridas con el fin de

proporcionar un conjunto de variables de entrada a las RNAs con media nula y desviación estándar unitaria para mejorar los resultados de clasificación y reducir el tiempo de entrenamiento. Se aplicó la transformación de la Ecuación (2), siendo $Z_{x/y}$ la componente de la impedancia de entrada, $Z'_{x/y}$ la impedancia preprocesada, $\mu_{x/y}$ el valor medio y $\sigma_{x/y}$ la desviación típica de $Z_{x/y}$.

$$Z_{x/y} \rightarrow Z'_{x/y} = \frac{Z_{x/y} - \mu_{x/y}}{\sigma_{x/y}} \quad (2)$$

6.3. PROCESADO MEDIANTE RNAs

En tercer lugar, se procesaron las muestras normalizadas de impedancia para clasificar las piezas según el tratamiento térmico recibido. Para ello, se diseñaron dos primeras RNAs que procesaron en modo monofrecuencia las impedancias tomadas a las frecuencias de trabajo 50 y 100 kHz y una tercera RNA que realizó un procesamiento multifrecuencia de las impedancias extraídas a 50 y 100 kHz. A continuación se describen las características de las RNAs diseñadas:

| | |
|--|--|
| Estructura: | Perceptrón multicapa <i>feedforward</i> . Red totalmente conectada. Una única capa oculta. |
| Capa de salida: | Una única neurona de salida. |
| Número de neuronas en la capa de entrada: | Procesado monofrecuencia: 2. Procesado multifrecuencia: 4. |
| Número de neuronas de la capa oculta: | Entre 2 y 10. |
| Función de activación: | Tangente hiperbólica. |
| División de muestras: | Entrenamiento: 60%. Validación 15%. Test: 25%. |
| Criterio de parada del entrenamiento: | Gradiente de error = 10^{-10} . |
| Criterio de finalización del entrenamiento: | Principal: Clasificación correcta de todas las muestras de entrenamiento y validación. Secundario: Tiempo máximo del proceso iterativo 60 s. |

Tabla 1: Características de las RNAs diseñadas para la implementación de los clasificadores

6.4. ANÁLISIS DE LOS CLASIFICADORES

Por último, se evaluaron los clasificadores de piezas implementados mediante las RNAs.

El primer criterio de comparación fue la tasa de acierto de clasificación de las RNAs una vez entrenadas, definida como el ratio entre el número de muestras clasificadas correctamente y el número de muestras totales. El rango de los valores posibles de tasa de acierto se sitúa entre el 0% y el 100%.

El segundo criterio de comparación fue la carga computacional, calculada de manera teórica como el número de operaciones que necesita cada RNA para clasificar una pieza, y se desglosó en sumas, productos y cálculos de la función *tanh*.

El rango del número de operaciones de cada tipo se expresa en unidades naturales.

El tercer y último criterio de comparación de las RNAs entrenadas fue el tiempo de necesario para clasificar una pieza y se expresa en microsegundos.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos y un breve análisis de los mismos, así como las observaciones que surgen a partir de dichos resultados, las limitaciones del estudio y algunas líneas futuras que se podrían abordar a partir de este trabajo.

7.1. TASA DE ACIERTO

Los resultados de clasificación relativos a la tasa de acierto de las RNAs se muestran en la Figura 7. En el procesamiento monofrecuencia se distingue el tramo comprendido entre 2 y 5 neuronas ocultas, en el que la tasa de acierto aumentó a medida que se incrementó el número de neuronas, y entre 6 y 10 neuronas ocultas, en el que la tasa de acierto se mantuvo aproximadamente constante. Debido a este comportamiento, se eligió la RNA con 5 neuronas en la capa oculta como la estructura de referencia. La tasa de acierto de clasificación de piezas de la RNA con 5 neuronas fue del 88.5% con impedancias de entrada a 50 kHz y del 89.8% con impedancias a 100 kHz.

Por el contrario, los resultados de tasa de acierto de la clasificación multifrecuencia muestran una tendencia siempre decreciente al aumentar el número de neuronas ocultas. El valor máximo de tasa de acierto (99.9%) se alcanzó con 2 neuronas ocultas, aunque se mantuvo siempre por encima del 98% en el peor de los casos, por lo que se eligió la RNA de 2 neuronas ocultas como estructura de referencia.

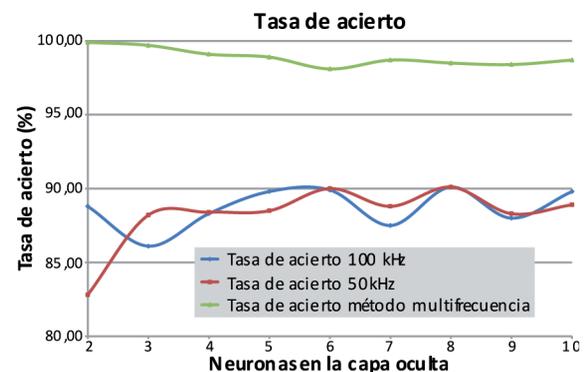


Figura 7: Tasa de acierto de la clasificación monofrecuencia a 50 kHz, a 100 kHz y de la clasificación multifrecuencia

Los resultados evidencian que la clasificación multifrecuencia consigue una tasa de acierto un 10.4% superior al procesamiento monofrecuencia. Estos resultados se deben a que las medidas de impedancia independientes a 50 y a 100 kHz no aportan por separado información suficiente para permitir la clasificación de los dos grupos de muestras, mientras que la complementariedad de las dos frecuencias de trabajo permite lograr una tasa de acierto muy cercana al 100%. También algunos autores que han realizado ensayos por corrientes como

Chady *et al.* [17] y Rao *et al.* [18] han obtenido buenos resultados con las técnicas multifrecuencia.

7.2. CARGA COMPUTACIONAL

Los resultados de carga computacional teórica de las RNAs se calcularon en función del número de neuronas ocultas de cada capa y se muestran en la *Tabla II*. El número de sumas y de productos es coincidente y depende tanto del número de entradas (N_{in}) como del número de neuronas de la capa oculta (N_{oc}), mientras que el número de cálculos de la función de activación *tanh* sólo depende del número de neuronas de la capa oculta.

En la *Figura 8* se representan el número de sumas/productos y el número de cálculos de la función de activación. Se comprobó que el número de operaciones del procesamiento multifrecuencia de 2 neuronas en la capa oculta fue inferior al del procesamiento monofrecuencia de 5 neuronas ocultas tanto en número de sumas/productos como en número de cálculos de la *tanh*.

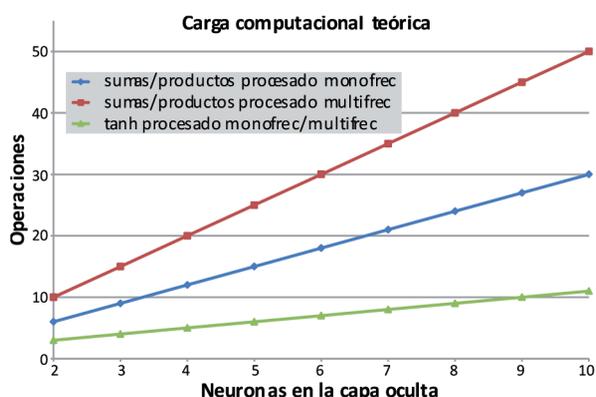


Figura 8: Carga computacional de las RNAs propuestas en función del número de neuronas de la capa oculta

Los resultados muestran que el incremento del número de variables de entrada de 2 a 4 no tiene por qué suponer un incremento en la carga computacional del clasificador de piezas, ya que el procesamiento multifrecuencia computa un número de sumas y productos un 33% inferior y un 50% inferior en términos de cálculos de la función *tanh* que en los casos monofrecuencia.

7.3. TIEMPO DE EJECUCIÓN

En la *Tabla III* se muestran los tiempos de ejecución medio y máximo que necesitaron las RNAs una vez entrenadas para clasificar una pieza de acero. Se incluyen los tiempos de las cuatro RNAs propuestas más representativas, que fueron en el caso del procesamiento monofrecuencia las RNAs con 5 y 6 neuronas en la capa oculta y en el caso multifrecuencia las RNAs con 2 y 3 neuronas ocultas. Los resultados muestran que la RNA más rápida fue la de procesamiento multifrecuencia con 2 neuronas ocultas con 0.2492 μ s de promedio. En segundo lugar se situó el procesamiento multifrecuencia de 3 neuronas, seguido del procesamiento monofrecuencia de 5 neuronas ocultas.

| Tipo de operación | Operaciones en la capa oculta | Operaciones en la capa de salida | Total operaciones |
|----------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| Sumas/Productos | $N_{oc} * N_{in}$ | N_{oc} | $N_{oc} * (N_{in} + 1)$ |
| Operaciones de <i>tanh</i> | N_{oc} | 1 | $N_{oc} + 1$ |

Tabla II: Carga computacional teórica de las RNAs propuestas con N_{in} neuronas de entrada, N_{oc} neuronas en la capa oculta y una neurona de salida

| Tipo de procesado | Neuronas en la capa oculta | Tiempo medio (μ s) | Tiempo máximo (μ s) |
|-------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Monofrecuencia | 5 | 0.3197 | 0.3613 |
| Monofrecuencia | 6 | 0.3864 | 0.4138 |
| Multifrecuencia | 2 | 0.2492 | 0.2787 |
| Multifrecuencia | 3 | 0.2896 | 0.3201 |

Tabla III: Tiempo de ejecución promedio y máximo requerido por cuatro configuraciones de RNAs propuestas para clasificar una pieza

En último lugar se situó el procesamiento monofrecuencia con 6 neuronas ocultas y 0.3864 μ s promedio, un 55.1% más que en el mejor caso. El tiempo de ejecución de la clasificación multifrecuencia de 2 neuronas ocultas fue un 22% inferior al necesario por la clasificación monofrecuencia de 5 neuronas ocultas.

7.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una primera observación sobre los resultados presentados es la estabilización o empeoramiento de la tasa de acierto de las RNAs diseñadas a partir de un cierto número de neuronas en la capa oculta: la tasa de acierto del procesamiento multifrecuencia fue siempre decreciente con el número de neuronas ocultas, mientras que las RNAs de clasificación monofrecuencia no mostraron mejoras significativas en su tasa de acierto a partir de cinco neuronas. Este hecho se justifica con sobre-entrenamiento de la red que se produce al aumentar el número de neuronas ocultas. Se produce una adaptación excesiva de las RNAs a los datos de entrenamiento cuando hay un exceso de parámetros de ajuste libres y, debido a esto, la capacidad de generalización de la RNA, y por tanto de clasificar, empeora. Para evitar el sobre-entrenamiento es adecuado seguir la estrategia de este estudio, que consistió en elegir el número de neuronas en la capa oculta mínimo a partir del cual se estabilizó o comenzó a disminuir la tasa de acierto.

Otra observación es la correlación entre la carga computacional teórica calculada y el tiempo de ejecución medido de manera experimental. Ordenando de menor a mayor los resultados de las cuatro RNAs analizadas en términos de carga computacional y en términos de tiempo de ejecución se obtuvo la misma clasificación: los dos mejores casos se obtuvieron en la clasificación multifrecuencia con dos y tres neuronas ocultas respectivamente, mientras que el tercer y el cuarto caso fueron para las RNAs relativas al procesamiento monofrecuencia con cinco y seis neuronas ocultas respectivamente. Esta observación verifica y valida los resultados de tiempo de ejecución obtenidos en base a los resultados teóricos de carga computacional.

La tercera observación es que la microestructura martensítica de las piezas correctas marca la pauta para la

desviación de las curvas de *lift-off* hacia la formación de una nube de puntos cercanos, mientras que la microestructura de perlita predominante de las piezas no correctas marca la pauta para la desviación de las colas de las curvas de *lift-off* hacia otra región del plano de impedancia. La microestructura común de bainita presente en los dos grupos de piezas tiende a desviar las nubes de puntos hacia la misma región, si bien las microestructuras no comunes permiten diferencia suficiente entre los dos grupos de piezas para permitir el funcionamiento del método de clasificación.

Por último, consideramos que se podría barajar la posibilidad de implantar una RNA como la propuesta en el procesado multifrecuencia en el control de calidad de una línea de fabricación industrial real, dado que tanto la tasa de acierto conseguida (99.9%) como el tiempo de ejecución medio que requiere (0.2492 μ s) no serían factores limitantes en dicho proceso.

7.5. LIMITACIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Una limitación del estudio ha sido la adquisición de las impedancias de trabajo en un entorno de laboratorio, alejado de algunas fuentes de ruido eléctrico y vibraciones entre sonda y pieza que pueden estar presentes en los entornos industriales y dificultar la inspección. Con un apantallado correcto de sonda y cableado, con el propio poder de rechazo de los equipos ante cualquier señal interferente fuera de banda y con los filtros adicionales que los equipos suelen incorporar en una línea de fabricación industrial sería posible minimizar los efectos del ruido interferente y las vibraciones mecánicas que pueden dificultar la obtención de tasas de acierto de clasificación elevadas como las obtenidas en el presente trabajo.

Dos líneas futuras principales surgen a partir del trabajo realizado. Por la mejoría que se ha observado en este trabajo al incrementar el número de frecuencias, la primera línea sería utilizar más impedancias tomadas a diferentes frecuencias de trabajo y la segunda línea sería incorporar otras técnicas de preprocesado y otros tipos de RNAs que podrían mejorar el método propuesto.

8. CONCLUSIONES

En el estudio realizado la RNA que realiza clasificación multifrecuencia de las piezas de acero 100Cr6, con denominación F1310 según normativa UNE, consigue una tasa de acierto mejor que las que realizan procesado monofrecuencia. En segundo lugar se ha comprobado que el incremento del número de variables de entrada del procesado multifrecuencia no tiene por qué suponer un incremento en la carga computacional del clasificador respecto de los casos monofrecuencia. Y por último, el tiempo de ejecución necesario para realizar una clasificación multifrecuencia no tiene que ser necesariamente mayor que el empleado en un procesado monofrecuencia, a pesar de la mayor complejidad que tienen a priori las RNAs con mayor número de entradas.

En conjunto, la clasificación multifrecuencia de las piezas de acero ensayado muestra mejores características que la clasificación monofrecuencia con respecto a la tasa de acierto, la carga computacional y el tiempo de ejecución necesario.

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio ha sido desarrollado gracias a la tecnología propia de Ingeniería y Sistemas de Ensayos no Destructivos (ISEND), al Subprograma de investigación Torres Quevedo con referencia PTQ-10-02437 y al Departamento de Teoría de la Señal, Comunicaciones e Ingeniería Telemática de la Universidad de Valladolid.

Además el trabajo del segundo autor se ha llevado a cabo gracias a una beca del programa de "Formación de Personal Investigador", financiado por la Universidad de Valladolid y cofinanciado por el Banco Santander.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sheikh Amiri M, Kashefi M. "Application of eddy current nondestructive method for determination of surface carbon content in carburized steels". *NDT & E International*. 2009. Vol.42-7 p.618-621. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2009.04.008>
- [2] Yanzón R C, Bocca J C, Rebollo D, et al. "Predicción de dureza en piezas construidas con acero templado y revenido". *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*. 2009. Vol.13-2 p.22-45.
- [3] Rosado L S, Janeiro F M, Ramos P M, et al. "Defect Characterization With Eddy Current Testing Using Nonlinear-Regression Feature Extraction and Artificial Neural Networks". *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*. 2013. Vol.62-5 p.1207-1214. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2012.2236729>
- [4] Garcia-Martin J, Gomez-Gil J, Vazquez-Sanchez E. "Non-destructive techniques based on eddy current testing". *Sensors*. 2011. Vol.11-3 p.2525-2565. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/s110302525>
- [5] Cao Q, Liu D, He Y, et al. "Nondestructive and quantitative evaluation of wire rope based on radial basis function neural network using eddy current inspection". *NDT & E International*. 2012. Vol.46-0 p.7-13. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.09.015>
- [6] Haykin S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. 2ª edición. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1998. 842p. ISBN: 0132733501
- [7] Duda R O, Hart P E, Stork D G. *Pattern Classification*. 2ª edición. New York: John Wiley & Sons, 2001. 654p. ISBN: 0-471-05669-3
- [8] Chady T, Enokizono M, Sikora R, et al. "Natural crack recognition using inverse neural model and multi-frequency eddy current method". *Magnetics, IEEE Transactions on*. 2001. Vol.37-4 p.2797-2799. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/20.951310>
- [9] Wrzuszczak M, Wrzuszczak J. "Eddy current flaw detection with neural network applications". *Measurement*. 2005. Vol.38-2 p.132-136. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2005.04.004>
- [10] Mix P E. *Introduction to Nondestructive Testing: a Training Guide*. 2ª edición. New Jersey: Wiley-interscience, 2005. 712p. ISBN: 9780471420293
- [11] Davis J R. *ASM Handbook: Nondestructive Evaluation and Quality Control*. 9ª edición. Materials Park, OH: ASM International, 1989. 937p. ISBN: 0-87170-007-7
- [12] Bishop C M. *Neural Networks for Pattern Recognition*. New York, USA: Oxford University Press, Inc., 1995. 482p. ISBN: 0198538642
- [13] Drachman D A. "Do we have brain to spare?". *Journal of Neurology*. 2005. Vol.64-12 p.2004-2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1212/01.WNL.0000166914.38327.BB>
- [14] Rumelhart D E, McClelland J L. *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*. Cambridge: MIT Press, 1986. 547p. ISBN: 0-262-68053-X
- [15] Levenberg K. "A method for the solution of certain non-linear problems in least squares". *Quarterly Journal of Applied Mathematics*. 1944. Vol.II-2 p.164-168.
- [16] Marquardt D. "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters". *SIAM Journal on Applied Mathematics*. 1963. Vol.2-11 p.431-441. DOI: <http://dx.doi.org/10.1137/0111030>
- [17] Chady T, Enokizono M, Sikora R. "Neural network models of eddy current multi-frequency system for nondestructive testing". *Magnetics, IEEE Transactions on*. 2000. Vol.36-4 p.1724-1727. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/20.877775>
- [18] Rao B P C, Raj B, Jayakumar T, et al. "An artificial neural network for eddy current testing of austenitic stainless steel welds". *NDT & E International*. 2002. Vol.35-6 p.393-398. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695\(02\)00007-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695(02)00007-5)

Referencias

- [1] J. Garcia-Martin, J. Gomez-Gil, and E. Vazquez-Sanchez, "Non-destructive techniques based on eddy current testing", *Sensors*, vol. 11, pp. 2525-2565, 2011.
- [2] J. Garcia-Martin and J. Gomez-Gil, "Comparative evaluation of coil and hall probes in hole detection and thickness measurement on aluminum plates using eddy current testing", *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 49, pp. 482-491, 2013.
- [3] J. Garcia-Martin, V. Martínez-Martinez, and J. Gomez-Gil, "Clasificación del tratamiento térmico de aceros con ensayos no destructivos por corrientes inducidas mediante redes neuronales", *DYNA-Ingeniería e Industria*, vol. 89, pp. 526-532, 2014.
- [4] L. B. Pedersen, K. Å. Magnusson, and Y. Zhengsheng, "Eddy Current Testing of Thin Layers Using Co-planar Coils", *Research in Nondestructive Evaluation*, vol. 12, pp. 53-64, 2000.
- [5] D. Mercier, J. Lesage, X. Decoopman, and D. Chicot, "Eddy currents and hardness testing for evaluation of steel decarburizing", *NDT & E International*, vol. 39, pp. 652-660, 2006.
- [6] L. Janousek, K. Capova, N. Yusa, and K. Miya, "Multiprobe Inspection for Enhancing Sizing Ability in Eddy Current Nondestructive Testing", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, pp. 1618-1621, 2008.
- [7] H. Hashizume, Y. Yamada, K. Miya, S. Toda, K. Morimoto, Y. Araki, *et al.*, "Numerical and experimental analysis of eddy current testing for a tube with cracks", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 28, pp. 1469-1472, 1992.
- [8] Q. H. Nguyen, L. D. Philipp, D. J. Lynch, and A. F. Pardini, "Steam Tube Defect Characterization Using Eddy Current Z-Parameters", *Research in Nondestructive Evaluation*, vol. 10, pp. 227-252, 1998.
- [9] P. E. Mix, *Introduction to nondestructive testing: a training guide*. John Wiley & Sons, 2005.
- [10] J. R. Davis, *ASM Handbook: Nondestructive evaluation and quality control* vol. 17. ASM International, 1989.
- [11] R. K. Wangsness, J. R. E. Encinas, and R. J. Domínguez, *Campos electromagnéticos*. Limusa, 1983.
- [12] R. La, B. Benoist, B. de Barmon, M. Talvard, R. Lengellé, and P. Gaillard, "MESSINE, a Parametric Three-Dimensional Eddy Current Model", *Research in Nondestructive Evaluation*, vol. 12, pp. 65-86, 2000.
- [13] A. Skarlatos, G. Pichenot, D. Lesselier, M. Lambert, and B. Duchene, "Electromagnetic Modeling of a Damaged Ferromagnetic Metal Tube by a Volume Integral Equation Formulation", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, pp. 623-632, 2008.
- [14] J. R. Bowler and N. Harfield, "Evaluation of probe impedance due to thin-skin eddy-current interaction with surface cracks", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, pp. 515-523, 1998.
- [15] E. Uzal, I. Ozkol, and M. O. Kaya, "Impedance of a coil surrounding an infinite cylinder with an arbitrary radial conductivity profile", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, pp. 213-217, 1998.
- [16] A. Tamburrino, "A communications theory approach for electromagnetic inverse problems", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, pp. 1136-1139, 2000.
- [17] J. M. Buckley, *An introduction to Eddy Current Testing theory and technology*, 2015. Disponible: <http://joe.buckley.net/papers/eddyc.pdf> Acceso: 18/10/2015.
- [18] E. Gómez de León, *Ensayos no destructivos; corrientes inducidas. Nivel II*. Madrid, ES. Asociación Española de Ensayos No Destructivos. AEND, 2007.

-
- [19] W. Yin, R. Binns, S. J. Dickinson, C. Davis, and A. J. Peyton, "Analysis of the Lift-off Effect of Phase Spectra for Eddy Current Sensors", en *Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC 2005)*, Ottawa, Canada, pp. 1779-1784, 2005.
- [20] L. A. N. M. Lopez, D. K. S. Ting, and B. R. Upadhyaya, "Removing Eddy-Current probe wobble noise from steam generator tubes testing using Wavelet Transform", *Progress in Nuclear Energy*, vol. 50, pp. 828-835, 2008.
- [21] L. Shu, H. Songling, Z. Wei, and Y. Peng, "Improved immunity to lift-off effect in pulsed eddy current testing with two-stage differential probes", *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 44, pp. 138-144, 2008.
- [22] T. Gui Yun, L. Yong, and C. Mandache, "Study of Lift-Off Invariance for Pulsed Eddy-Current Signals", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, pp. 184-191, 2009.
- [23] G. Jun and Y. Wuliang, "Accurate Distance Measurement Using an Eddy Current Sensor Based on an Analytical Model", en *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)*, pp. 397-399, 2010.
- [24] Q. Zhao, Q. Yu, Z. Qu, L. Si, X. Lu, and Y. Meng, "Thickness measurement of nano-metallic film with electromagnetic sensor under large sensor-sample distance", en *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, pp. 1-4, 2011.
- [25] H. Wang, W. Li, and Z. Feng, "Noncontact Thickness Measurement of Metal Films Using Eddy-Current Sensors Immune to Distance Variation", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 64, pp. 2557 - 2564, 2015.
- [26] D. Placko, H. Clergeot, and E. Santander, "Physical modeling of an eddy current sensor designed for real time distance and thickness measurement in galvanization industry", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 25, pp. 2861-2863, 1989.
- [27] Y. Guang, A. Tamburrino, L. Udpa, S. S. Udpa, Z. Zhiwei, D. Yiming, *et al.*, "Pulsed Eddy-Current Based Giant Magnetoresistive System for the Inspection of Aircraft Structures", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, pp. 910-917, 2010.
- [28] Z. Liu, K. Tsukada, K. Hanasaki, and M. Kurisu, "Two-Dimensional Eddy Current Signal Enhancement via Multifrequency Data Fusion", *Research in Nondestructive Evaluation*, vol. 11, pp. 165-177, 1999.
- [29] Y. Bengio, A. Courville, and P. Vincent, "Representation learning: A review and new perspectives", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 35, pp. 1798-1828, 2013.
- [30] S. Haykin, *Neural networks: a comprehensive foundation 2nd edition*, 1999.
- [31] C. M. Bishop, *Neural networks for pattern recognition*. Oxford University Press, 1995.
- [32] M. Morozov, G. Rubinacci, A. Tamburrino, and S. Ventre, "Numerical models of volumetric insulating cracks in eddy-current testing with experimental validation", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, pp. 1568-1576, 2006.
- [33] H. Chen, R. H. L. Chiang, and V. C. Storey, "Business intelligence and analytics: from big data to big impact", *MIS Quarterly*, vol. 36, pp. 1165-1188, 2012.
- [34] J. Manyika, M. Chui, B. Brown, J. Bughin, R. Dobbs, C. Roxburgh, *et al.*, *Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity*, 2011. Disponible: <http://www.mckinsey.com/business-functions/business-technology/our-insights/big-data-the-next-frontier-for-innovation>. Acceso: 12/03/2016.
- [35] UNESID, *Steel Statistical Yearbook*, 2014. Disponible: <http://www.unesid.org/docs/Steel%20Statistical%20Yearbook%202014.pdf>. Acceso: 12/03/2016.
- [36] E. Commission, *Energy efficiency and CO2 reduction in the iron and steel industry*, 2014. Disponible: https://setis.ec.europa.eu/system/files/Technology_Information_Sheet_Energy_Efficiency_and_CO2_Reduction_in_the_Iron_and_Steel_Industry.pdf. Acceso: 09/03/2016.
- [37] R. Grimberg, A. Savin, E. Radu, and O. Mihalache, "Nondestructive evaluation of the severity of discontinuities in flat conductive materials by an eddy-current transducer with orthogonal coils", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, pp. 299-307, 2000.
- [38] X. Junjun, L. Naiguang, L. Udpa, and S. Udpa, "Nondestructive inspection using Rotating Field Eddy Current (RoFEC) Probes", en *Proceedings of the 14th Biennial IEEE Electromagnetic Field Computation (CEFC 2010)*, Chicago, USA, pp. 1-1, 2010.
- [39] A. Zaoui, H. Menana, M. Feliachi, and M. Abdellah, "Generalization of the Ideal Crack Model for an Arrayed Eddy Current Sensor", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, pp. 1638-1641, 2008.
- [40] V. O. de Haan, P. A. de Jong, L. Pérez, and C. Dolabdjian, "Towards Material Characterization and Thickness Measurements using Pulsed Eddy Currents implemented with an Improved Giant Magneto Resistance Magnetometer", en *Proceedings of the 9th. European NDT Conference (ECNDT'06)*, Berlin, Germany, pp. 1-8, 2006.

- [41] V. Lunin, A. Zhdanov, and D. Y. Lazutkin, "A neural-network classifier of flaws for multifrequency Eddy-current tests of heat-exchange pipes", *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol. 43, pp. 163-169, 2007.
- [42] S. Yamada, K. Chomsuwan, and M. Iwahara, "Application of Giant Magnetoresistive Sensor for Nondestructive Evaluation", en *Proceedings of the IEEE Sensors*, Daegu, South Korea, pp. 927-930, 2006.
- [43] M. Muck and F. Scholz, "A SQUID-Based Nondestructive Evaluation System for Testing Wires of Arbitrary Length", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 17, pp. 3809-3813, 2007.
- [44] J. Germano, V. Martins, F. Cardoso, T. Almeida, L. Sousa, P. Freitas, *et al.*, "A Portable and Autonomous Magnetic Detection Platform for Biosensing", *Sensors*, vol. 9, pp. 4119-4137, 2009.
- [45] H. Ramos, O. Postolache, F. C. Alegria, and A. Lopes Ribeiro, "Using the skin effect to estimate cracks depths in metallic structures", en *Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC 2009)*, Singapore, pp. 1361-1366, 2009.
- [46] J. Jongwoo, H. Jiseong, and L. Jinyi, "Quantitative Nondestructive Evaluation of the Crack on the Austenite Stainless Steel Using the Induced Eddy Current and the Hall Sensor Array", en *Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC 2007)*, Warsaw, Poland, pp. 1-6, 2007.
- [47] Y. He, F. Luo, M. Pan, F. Weng, X. Hu, J. Gao, *et al.*, "Pulsed eddy current technique for defect detection in aircraft riveted structures", *NDT & E International*, vol. 43, pp. 176-181, 2010.
- [48] J. Paasi, T. Kalliohaka, A. Korpela, L. Soderlund, P. F. Hermann, J. Kvitkovic, *et al.*, "Homogeneity studies of multifilamentary BSCCO tapes by three-axis Hall sensor magnetometry", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 9, pp. 1598-1601, 1999.
- [49] M. Muck, M. Korn, C. Welzel, S. Grawunder, and F. Scholz, "Nondestructive evaluation of various materials using a SQUID-based eddy-current system", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 15, pp. 733-736, 2005.
- [50] A. Ruosi, G. Pepe, G. Peluso, M. Valentino, and V. Monebhurrun, "Experimental and numerical results of electromagnetic nondestructive testing with HTc SQUIDS", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 9, pp. 3499-3502, 1999.
- [51] K. A. Bartels and J. L. Fisher, "Multifrequency eddy current image processing techniques for nondestructive evaluation", en *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP 1995)*, Washington, DC, USA, pp. 486-489, 1995.
- [52] M. G. Longoni, E. Porcel, M. V. López, and G. N. Dapozo, "Modelos de Redes Neuronales Perceptrón Multicapa y de Base Radial para la predicción del rendimiento académico de alumnos universitarios", en *XVI Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, pp. 692-701, 2010.
- [53] T. Chady, M. Enokizono, and R. Sikora, "Neural network models of eddy current multi-frequency system for nondestructive testing", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, pp. 1724-1727, 2000.
- [54] M. Wrzuszcak and J. Wrzuszcak, "Eddy current flaw detection with neural network applications", *Measurement*, vol. 38, pp. 132-136, 2005.
- [55] N. Novkovski, *Progress and limitations in magnetic field measurements* vol. 13. Springer Netherlands, 2006.
- [56] L. S. Rosado, T. G. Santos, P. M. Ramos, P. Vilaça, and M. Piedade, "A differential planar eddy currents probe: Fundamentals, modeling and experimental evaluation", *NDT & E International*, vol. 51, pp. 85-93, 2012.
- [57] J. Jun, J. Hwang, and J. Lee, "Quantitative nondestructive evaluation of the crack on the austenite stainless steel using the induced eddy current and the hall sensor array", en *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings (IMTC)*, pp. 1-6, 2007.
- [58] J. Jun, J. Kim, J. Lee, and Y. Park, "A hand held magnetic camera system for real time crack inspection", en *IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, pp. 298-301, 2011.
- [59] R. Porto, V. Brusamarello, R. Azambuja, and O. Frison, "Design and Analysis of a GMR Eddy Current probe for NDT", en *Seventh International Conference on Sensing Technology (ICST)*, pp. 424-429, 2013.
- [60] L. S. Rosado, F. A. Cardoso, S. Cardoso, P. M. Ramos, P. P. Freitas, and M. Piedade, "Eddy currents testing probe with magneto-resistive sensors and differential measurement", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 212, pp. 58-67, 2014.
- [61] J. Gomez, D. Esteve, and J. Simonne, "A CMOS eddy current sensor for microsystems", en *Proceedings of the Third IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems*, pp. I54/1-I54/4, 2000.

-
- [62] M. Uesaka, K. Hakuta, K. Miya, K. Aoki, and A. Takahashi, "Eddy-current testing by flexible microloop magnetic sensor array", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, pp. 2287-2297, 1998.
- [63] C. Smith, R. Schneider, T. Dogaru, and S. Smith, "Eddy-current testing with GMR magnetic sensor arrays", en *AIP Conference Proceedings*, pp. 406-413, 2003.
- [64] G. Simone and F. C. Morabito, "RBFNN-based hole identification system in conducting plates", *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 12, pp. 1445-1454, 2001.
- [65] H.-s. Zhang, X.-k. Cao, B. Guo, Q. Wang, and Y.-h. Fu, "An approach of eddy current sensor calibration in state estimation for maglev system", en *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pp. 1955-1958, 2007.
- [66] S. Kalpakjian, S. R. Schmid, G. S. García, and U. F. López, *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educación, 2002.
- [67] M. Mayos, J. Viale, and M. Putignani, "Dispositif AMANDA pour l'évaluation non destructive de la décarburation superficielle des aciers", *Revue pratique de contrôle industriel*, vol. 29, pp. 72-78, 1990.
- [68] A. V. Oppenheim, A. S. Willsky, and S. H. Nawab, *Señales y sistemas*. Pearson Educación, 1998.
- [69] B. Jin-Su and K. Sang-Young, "Hot wire inspection using eddy current", en *Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC 2001)*, Budapest, Hungary, pp. 962-965, 2001.
- [70] A. Habibalahi, M. D. Moghari, K. Samadian, S. S. Mousavi, and M. S. Safizadeh, "Improving pulse eddy current and ultrasonic testing stress measurement accuracy using neural network data fusion", *IET Science, Measurement and Technology*, 2015.
- [71] E. N. Malamas, E. G. Petrakis, M. Zervakis, L. Petit, and J.-D. Legat, "A survey on industrial vision systems, applications and tools", *Image and Vision Computing*, vol. 21, pp. 171-188, 2003.
- [72] W. Guifang, K. Hoonsung, J. Seyoung, X. Ke, and X. Jinwu, "Design of online surface inspection system of hot rolled strips", en *IEEE International Conference on Automation and Logistics (ICAL)*, pp. 2291-2295, 2008.
- [73] A. Blug, P. Strohm, D. Carl, H. Höfler, B. Blug, and A. Kailer, "On the potential of current CNN cameras for industrial surface inspection", en *13th International Workshop on Cellular Nanoscale Networks and Their Applications (CNNA)*, pp. 1-6, 2012.
- [74] D. Ciresan, U. Meier, and J. Schmidhuber, "Multi-column deep neural networks for image classification", en *Proceedings of the 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 3642-3649, 2012.
- [75] T. S. Chang, H. H. Huang, K. Tomita, and R. Seki, "Surface flaw detection and verification on metal bars by Eddy current testing and imaging system", Og Technologies, Inc., U.S. Patent No. 8,143,885, 2012.
- [76] Y. Li, T. Theodoulidis, and G. Y. Tian, "Magnetic field-based eddy-current modeling for multilayered specimens", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, pp. 4010-4015, 2007.
- [77] C. Cordier, S. Saez, S. Lebargy, and C. Dolabdjian, "Accurate steel tube axis alignment in nondestructive evaluation probe", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, pp. 2409-2413, 2008.

