



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Caracterización de la condición de los rieles de tren usando la función de respuesta de frecuencia y redes profundas

Jose Miguel Navas Orduz

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Mecánica
Medellín, Colombia

2024

Caracterización de la condición de los rieles de tren usando la función de respuesta de frecuencia y redes profundas

Jose Miguel Navas Orduz

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título

de:

Magister en Ingeniería Mecánica

Director (a):

Ph.D., Alejandro Restrepo Martínez

Línea de Investigación:

Investigación en Ingeniería Mecánica

Grupo de Investigación:

Grupo de Promoción e Investigación en Mecánica Aplicada GPIMA

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Mecánica

Medellín, Colombia

2024

A Dios las gracias infinitas por permitirme seguir formándome como profesional y como persona, a mis padres por su apoyo y amor incondicional, a la Universidad Nacional de Colombia, al director de proyecto y compañeros por su acompañamiento y compartir de conocimiento durante este proceso.

A la vida... Gracias.

Resumen

Caracterización de la condición de los rieles de tren usando la función de respuesta de frecuencia y redes profundas.

Debido a la crítica importancia del riel en el mantenimiento del sistema ferroviario, se hace imprescindible desarrollar un proceso que permita evaluar el estado del riel, cuantificar la severidad de sus posibles defectos y cambios en configuraciones estructurales. Este análisis es esencial para tomar medidas apropiadas, asegurando la confiabilidad y mantenibilidad del sistema en su totalidad. En este contexto, este proceso de investigación se enfoca en la implementación de una metodología que caracteriza los rieles de tren a través de su comportamiento dinámico mediante el análisis modal. El cual, aborda el análisis frecuencial a través de tres enfoques: teórico, numérico y experimental. El proceso experimental de análisis modal se realiza mediante la técnica de ensayo de martillo. Para ello, se realiza un estudio de determinación del comportamiento frecuencial del riel con respecto a cambios en la distancia entre fijaciones y a la variación de condiciones como generación de defectos. Dicho proceso implica la captura de señales mediante un acelerómetro uniaxial para la respuesta del riel y un martillo instrumentado para el impacto. Se recopilaron 45 señales para cada distancia y condición, y posteriormente se realizaron transformaciones a través de la Función de Respuesta de Frecuencia (FRF), la Transformada de Fourier (FFT) y la Transformada Continua de Wavelet (CWT). Para la interpretación y clasificación de los datos, se emplearon métodos estadísticos, como el método Z, y técnicas de aprendizaje de máquina mediante redes convolucionales profundas (CNN). Estas fueron evaluadas utilizando criterios y métricas como la exactitud, la matriz de confusión y la curva ROC. Todo esto proporcionando una metodología funcional que permite la caracterización del comportamiento frecuencial del riel de tren, considerando modificaciones tanto en el tipo de ensamble como en las variaciones de propiedades físicas.

Palabras clave: Función de respuesta de frecuencia (FRF), Método de elementos finitos (MEF), Frecuencia de fijaciones, Transformada de Fourier, Test de martillo, Red Neuronal Profunda, Transformada de Wavelet.

Abstract

Characterizing the condition of railroad track by using Frequency Response Function and Deep Neural Networks.

Due to the critical importance of railway tracks in the maintenance of the railway system, it is imperative to develop a process that allows for the assessment of the track's condition, quantification of the severity of potential defects, and changes in structural configurations. This analysis is essential for taking appropriate measures, ensuring the overall reliability and maintainability of the system. In this context, this research process focuses on implementing a methodology that characterizes train tracks through their dynamic behavior using modal analysis. This methodology addresses frequency analysis through three approaches: theoretical, numerical, and experimental. The validation of this behavior is conducted through an experimental process using the hammer test technique. The study is carried out regarding the modification in the distance between fixations and the variation of conditions to determine the corresponding changes in frequency behavior. This process involves capturing signals using a uniaxial accelerometer for track response and an instrumented hammer for impact. 45 signals were collected for each distance and condition, subsequently transformed through Frequency Response Function (FRF), Fourier Transform (FFT), and Continuous Wavelet Transform (CWT). For data interpretation and classification, statistical methods such as the Z method and machine learning techniques employing deep convolutional neural networks (CNN) were utilized. These methods were evaluated using criteria and metrics such as accuracy, confusion matrix, and ROC curve. All of this contributes to a functional methodology enabling the characterization of the frequency behavior of train tracks, considering modifications in both assembly types and variations in physical properties.

Key words: Frequency response function (FRF), Finite element method, Pin-Pin frequency, Fourier Transform, Hammer test, Deep Neural Networks, Wavelet Transform.

Contenido

	Pág.
1. MARCO TEÓRICO	17
1.1 Análisis modal	17
1.2 Transformación de las señales (FFT, FRF y Wavelet).....	18
1.2.1 Transformada de Fourier (FFT) y (FFT PSD).....	18
1.2.2 Función de Respuesta de Frecuencia (FRF)	18
1.2.3 Transformada Continua de Wavelet (CWT)	21
1.3 Ensayo con martillo de impacto.....	22
1.4 Modelos profundos de aprendizaje.....	23
1.4.1 Métricas de evaluación	24
2. ESTADO DEL ARTE	26
2.1 Estudio de condiciones en vía.....	26
2.2 Caracterización estructural mediante ensayo de martillo de impacto.....	27
2.3 Clasificación de estado por redes profundas	28
3. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS	33
3.1 Propiedades y características del riel	37
3.2 Cálculo frecuencia por fijaciones	38
3.3 Parámetros de modelación para los modelos de elementos finitos	38
3.3.1 Análisis modal software CAE	41
3.4 Proceso experimental ensayo martillo	42
3.4.1 Acelerómetros y tarjetas de adquisición.....	44
3.4.2 Características del martillo.....	45
3.4.3 Interfaz de adquisición de señales	46
3.5 Montajes experimentales.....	47
3.1 Puntos de impacto.....	48
3.1.1 Configuración sección laboratorio método experimental	49
3.1.2 Análisis frecuencial bajo variación de puntos de impacto.....	50
3.2 Sistema escaneo 3D	52
3.3 Sistema control de impacto	53
3.3.1 Modelo estadístico FRF	54
3.4 Automatización del proceso	55
3.4.1 Selección redes profundas	56
3.4.2 Transformación de señales en imágenes.....	59
3.5 Evaluación desempeño	60
3.5.1 Evaluación identificación frecuencias.....	60

3.5.2	Evaluación clasificación por redes	60
3.5.3	Evaluación prueba estadística Z	61
4.	Análisis de resultados	62
4.1	Método teórico de cálculo frecuencia natural de viga empotrada	62
4.1.1	Cálculo frecuencia variación distancias fijaciones	62
4.1.2	Cálculo frecuencia por reperfilado	63
4.2	Método numérico.....	64
4.2.1	Simulación variación distancias fijaciones.....	64
4.2.2	Simulación reperfilado	65
4.2.3	Simulación variación condición	66
4.2.4	Simulación tramos escaneados condiciones.....	68
4.3	Método experimental.....	70
4.3.1	Frecuencias variación distancias fijaciones.....	70
4.3.2	Frecuencias variación condición punto impacto fijo	72
4.3.3	Frecuencias variación condición punto impacto variable.....	74
4.3.4	Dispositivo de impacto	83
4.3.5	Método estadístico de clasificación.....	87
4.3.6	Transformación señales en imágenes	91
4.3.7	Resultados entrenamiento redes profundas.....	101
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	112
5.1	Conclusiones.....	112
5.2	Recomendaciones.....	114
BIBLIOGRAFÍA	125

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Diagrama cuerpo libre comportamiento dinámico de una masa bajo fuerza externa de un grado de libertad.....	19
Figura 1-2: Gráfico ejemplo de amplitud y fase de FRF.....	20
Figura 1-3: Escalograma ejemplo.....	22
Figura 1-4: Esquema general red neuronal profunda convolucional GoogleNet.	23
Figura 1-5: Esquema matriz de confusión.	24
Figura 1-6: Esquema curva ROC.....	25
Figura 2-1: Estructura proceso de obtención frecuencias naturales del riel.	31
Figura 3-1: Estructura proceso de obtención frecuencias naturales del riel.	34
Figura 3-2: Estructura procesamiento de señales ensayo de martillo.	36
Figura 3-3: Estructura proceso de evaluación de metodología de caracterización riel.	37
Figura 3-4: Esquema reperfilado riel.....	39
Figura 3-5: Perfil huella generación de condiciones.	40
Figura 3-6: Modelo riel bajo condiciones de frontera.	41
Figura 3-7: Diagrama dispositivos conexión ensayo martillo de impacto.	43
Figura 3-8: Acelerómetro uniaxial CTC AC210 y acoplamiento en riel.....	44
Figura 3-9: Acondicionador de señal PCB IPC 485B39.	45
Figura 3-10: Conjunto martillo de impacto PCB 086C04.....	45
Figura 3-11: Rango de cobertura de frecuencias por tipo de punta.	46
Figura 3-12: Interfaz gráfica (GUI) ensayo martillo.	47

Figura 3-13: Montaje experimental laboratorio.....	48
Figura 3-14: Conjunto sección rieles.	50
Figura 3-15: Puntos de impacto riel condición 1.	50
Figura 3-16: Vista detalle huella riel condición 1.....	51
Figura 3-17: Puntos de impacto riel condición 4.	51
Figura 3-18: Vista detalle huella riel condición 4.....	52
Figura 3-19: Sistema escáner 3D.	52
Figura 3-20: Sistema control de impacto.	54
Figura 3-21: Esquema general red convolucional profunda (CNN).....	57
Figura 3-22: Esquema relación exactitud – gasto computacional redes profundas.....	58
Figura 3-23: Escalograma recortado y escalado a 224x224.	59
Figura 4-1: Resultados FFT variación distancias fijaciones	64
Figura 4-2: Resultados FFT simulación remoción reperfilado.....	65
Figura 4-3: Resultados FFT simulación condiciones.....	67
Figura 4-4: Perfiles superpuestos tramos rieles condiciones.	68
Figura 4-5: Resultados FFT simulación condiciones tramos escaneados.....	69
Figura 4-6: FFT PSD variación distancia fijaciones 0-3000 Hz.	70
Figura 4-7: FFT PSD variación distancia fijaciones 1510-1600 Hz.	71
Figura 4-8: FFT PSD condiciones tramos 0-3000 Hz.....	72
Figura 4-9: FFT PSD condiciones tramos 1200-1500 Hz.....	73
Figura 4-10: FFT PSD riel sano diferentes puntos de impacto 1000-2600 Hz.	75
Figura 4-11: FFT PSD riel sano diferentes puntos de impacto 1300-1550 Hz.	75
Figura 4-12: FFT PSD condición 1 diferentes puntos de impacto 800-2500 Hz.....	76
Figura 4-13: Riel condición 1, puntos de impacto y vista detalle punto 3.	77
Figura 4-14: FFT PSD condición 1 diferentes puntos de impacto 800-2600 Hz.....	77
Figura 4-15: FFT PSD condición 1 diferentes puntos de impacto 1200-1500 Hz.....	78
Figura 4-16: FFT PSD condición 1 diferentes puntos de impacto 2400-2500 Hz.....	79
Figura 4-17: Riel condición 1, puntos de impacto y vista detalle punto 3.	79

Figura 4-18: FFT PSD condición 4 diferentes puntos de impacto.	80
Figura 4-19: FFT PSD condición 4 diferentes puntos de impacto 1200-1500 Hz.	81
Figura 4-20: FFT PSD condición 4 diferentes puntos de impacto 2300-2600 Hz.	81
Figura 4-21: FFT PSD riel sano, condición 1 y 4 puntos de impacto sobre defectos.....	82
Figura 4-22: FFT PSD martillo y dispositivo de impacto distancia 67 cm.	83
Figura 4-23: FFT PSD martillo y dispositivo de impacto distancia 67 cm.	84
Figura 4-24: FFT PSD martillo y dispositivo de impacto riel sano 63 cm.....	85
Figura 4-25: FFT PSD martillo y dispositivo de impacto riel sano 63 cm.....	85
Figura 4-26: Ensayo Z variación distancias con respecto a 63 cm. Donde a) Línea base 63 cm, b) Distancia 67 cm, c) Distancia 70 cm, d) Distancia 72 cm y e) Distancia 75 cm. 88	
Figura 4-27: Ensayo Z variación condiciones con respecto a tramo 63 cm sano. Donde a) Línea base riel sano, b) Condición 1, c) Condición 2, d) Condición 3 y e) Condición 4....	89
Figura 4-28: Ensayo Z variación puntos impacto condición 1. Donde a) Línea base riel punto 1, b) Punto 2, c) Punto 3, d) Punto 4 y e) Punto 5.....	91
Figura 4-29: Proceso comportamiento frecuencial variación distancias entre fijaciones escalogramas. Donde a) Distancia 63 cm, b) Distancia 67 cm, c) Distancia 70 cm, d) Distancia 72 y e) Distancia 75 cm.....	93
Figura 4-30: Proceso comportamiento frecuencial variación condiciones escalogramas. Donde a) Riel sano, b) Condición 1, c) Condición 2, d) Condición 3 y e) Condición 4.	95
Figura 4-31: Proceso comportamiento frecuencial variación condiciones escalogramas. Donde a) Punto 1, b) Punto 2, c) Punto 3, d) Punto 4 y e) Punto 5.....	96
Figura 4-32: Puntos de impacto riel condición 1.	97
Figura 4-33: Proceso comportamiento frecuencial variación puntos impacto condición 1 escalogramas. Donde a) Línea base punto 1, b) Punto 2, c) Punto 3, d) Punto 4 y e) Punto 5.....	98
Figura 4-34: Puntos de impacto riel condición 4.	99
Figura 4-35: Proceso comportamiento frecuencial variación puntos impacto condición 4 escalogramas. Donde a) Línea base punto 1, b) Punto 2, c) Punto 3, d) Punto 4, e) Punto 5 y f) Punto 6.....	100
Figura 4-36: Imágenes de entrenamiento variación distancias escalograma– señal temporal. Donde a) Distancia 63 cm, b) Distancia 67 cm, c) Distancia 70 cm, d) Distancia 72 cm y e) Distancia 75 cm.	103

Figura 4-37: Imágenes de entrenamiento variación distancias escalograma - FRF. Donde a) Distancia 63 cm, b) Distancia 67 cm, c) Distancia 70 cm, d) Distancia 72 cm y e) Distancia 75 cm.....	104
Figura 4-38: Matriz de confusión escalograma-señal temporal variación distancias fijaciones.	105
Figura 4-39: Curva ROC escalograma-señal temporal variación distancias fijaciones. .	106
Figura 4-40: Matriz de confusión escalograma-FRF variación distancias fijaciones.....	107
Figura 4-41: Curva ROC escalograma-FRF variación distancias fijaciones.	107
Figura 4-42: Matriz de confusión escalograma-señal temporal variación condiciones. .	108
Figura 4-43: Curva ROC escalograma- señal temporal variación condiciones.....	109
Figura 4-44: Matriz de confusión escalograma-FRF variación condiciones.	110
Figura 4-45: Curva ROC escalograma- FRF variación condiciones.....	110
Figura A-1: Donde a) Riel sano, b) Condición 1, c) Condición 2, d) Condición 3 y e) Condición 4.	116
Figura A-2: Donde a) Riel sano, b) Condición 1, c) Condición 2, d) Condición 3 y e) Condición 4.	116
Figura A-3: Donde a) GoogleNet, b) ResNet-50, c) EfficientNetb0 y d) ShuffleNet.....	117
Figura A-4: Donde a) GoogleNet, b) ResNet-50, c) EfficientNetb0 y d) ShuffleNet.	118
Figura A-5: Donde a) GoogleNet, b) ResNet-50, c) SqueezeNet y d) ShuffleNet.	119
Figura A-6: Donde a) GoogleNet, b) ResNet-50, c) SqueezeNet y d) ShuffleNet.	120
Figura A-7: Donde a) ResNet-50, b) EfficientNetb0, c) SqueezeNet y d) ShuffleNet. ...	121
Figura A-8: Donde a) ResNet-50, b) EfficientNetb0, c) SqueezeNet y d) ShuffleNet. ...	122
Figura A-9: Donde a) SqueezeNet, b) GoogleNet, c) ResNet-50 y d) ShuffleNet.	123
Figura A-10: Donde a) SqueezeNet, b) GoogleNet, c) ResNet-50 y d) ShuffleNet	124

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Tipos de FRF (Fuente Luis A. Bedian et al., 2010).....	20
Tabla 3-1: Propiedades riel UIC-54 (Fuente propia).....	37
Tabla 3-2: Etiquetas y profundidades del reperfilado. (Fuente propia).	39
Tabla 3-3: Dimensiones huella condiciones (Fuente propia).....	40
Tabla 3-4: Características redes profundas (Fuente: Deep Neural Network – Matlab Documentation).....	58
Tabla 4-1: Cálculo frecuencia por fijaciones. (Fuente propia).....	62
Tabla 4-2: Cálculo frecuencias remoción perfil (Fuente propia).	63
Tabla 4-3: Cálculo frecuencias MEF variación distancias. (Fuente propia).	65
Tabla 4-4: Cálculo frecuencias MEF reperfilado. (Fuente propia).....	66
Tabla 4-5: Cálculo frecuencias MEF huellas. (Fuente propia).	67
Tabla 4-6: Cálculo frecuencias MEF condiciones vía. (Fuente propia).	69
Tabla 4-7: Frecuencias experimentales variación distancias. (Fuente propia).....	71
Tabla 4-8: Frecuencias experimentales variación condición punto impacto fijo. (Fuente propia).....	73
Tabla 4-9: Resultados métricas desempeño redes profundas. (Fuente propia).....	104

Introducción

Dentro de los elementos más críticos de la vía ferroviaria se encuentra el riel, siendo este uno de los enfoques principales a la hora de generar el plan de mantenimiento. Distintas metodologías se han aplicado para abordar y analizar su estado, desde estudios puntuales en tramos de la vía, como monitoreos generales a condición mediante la interacción rueda-riel. En estos estudios se han realizado análisis bajo inspecciones visuales, mediciones de longitudes de onda por diferentes sensores, cambios de dureza por medio de durómetros, deformaciones mediante galgas extensiométricas, entre otros. En búsqueda de causas raíz de defectos y su avance a través del tiempo hasta generar la falla.

Adicionalmente a estos estudios realizados y al avance que se ha logrado en la caracterización de la vía, en el estado del arte se observó que un gran aporte a esta área de estudio se enfoca en el análisis dinámico de la vía a través de su caracterización en dominio de sus frecuencias naturales, y cómo estas cambian con la aparición de diferentes condiciones al estado del riel. Entre las cuales, el ensayo del martillo de impacto a través del análisis modal ha demostrado ser una de las metodologías más confiables en identificar el comportamiento dinámico de los elementos de la vía bajo fuerzas externas, esto permitiendo la caracterización del estado de los elementos y su clasificación bajo determinación de respuestas frecuenciales.

El propósito de este proceso investigativo se basa en desarrollar una metodología para la adquisición, procesamiento y transformación de señales en relación con el comportamiento dinámico del riel UIC-54 mediante el análisis modal. Se emplean tres enfoques principales. Un proceso analítico por medio de resolución de ecuaciones físicas, un segundo proceso de abordaje numérico para la validación de resultados bajo simulaciones computacionales y como tercero una estrategia experimental de extracción de datos en laboratorio.

El tercer proceso se realiza utilizando el ensayo de martillo de impacto donde se construyen la Función de Respuesta de Frecuencia (FRF), la transformada de Fourier y transformación de las señales en imágenes mediante Wavelets (CWT). Estas imágenes características se utilizan finalmente para entrenar redes neuronales profundas (CNN) con el fin de identificar y clasificar el estado en cada uno de los casos propuestos.

Este procedimiento en términos generales posibilita la reducción de los tiempos necesarios para la captación y transformación de las señales, así como la disminución de la imprecisión en el análisis, mitigando la influencia del juicio subjetivo humano. Como resultado, se lograría una mejora significativa en la eficiencia del proceso de caracterización de un componente tan crucial como el riel de tren.

Asimismo, la elaboración de este documento de investigación se realizó por medio de la vinculación contractual de la Universidad Nacional de Colombia con el Sistema de Transporte Masivo del Valle de Aburrá en el cual se realizaron prestación de servicios profesionales para la obtención y análisis de datos de respuesta dinámica de la vía en colaboración del grupo de investigación de tribología dirigido por el profesor Alejandro Octavio Toro Betancur acompañado de los profesores Juan Felipe Santa y Alejandro Restrepo Martínez. Lo que permitió la contribución mutua en aportes científicos en búsqueda del mejoramiento de identificación de estado de la vía férrea y el incremento de la eficiencia de su proceso integrado de mantenimiento. Adicionalmente, este proceso investigativo contribuyó al desarrollo del documento “A Field Review Of Metro Medellin” dirigido por el profesor Roger Lewis de la Universidad de Sheffield del Reino Unido.

Con base en lo mencionado, los objetivos desarrollados en esta tesis son los siguientes:

OBJETIVO GENERAL

Establecer una estrategia para caracterizar de la condición de los rieles de tren usando la función de respuesta de frecuencia y redes profundas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Establecer un método experimental para la obtención de las frecuencias naturales de los rieles de tren mediante la metodología del martillo de impacto.
2. Diseñar una estrategia para procesar las señales usando FFT, FRF, Wavelet e integrarlas a las redes neuronales.
3. Evaluar el desempeño de los métodos propuestos en la identificación de la condición del riel.

1. MARCO TEÓRICO

Con el objetivo de proporcionar una comprensión más clara y accesible para el lector acerca del proceso de desarrollo de la investigación, se organizan y definen los conceptos fundamentales esenciales. Este enfoque abarca los procesos clave de adquisición de señales, las variadas transformaciones a las que son sometidas estas señales y los métodos de clasificación, incluyendo sus correspondientes métricas de evaluación.

1.1 Análisis modal

El análisis modal es un método que se utiliza para estudiar el comportamiento dinámico de un elemento o estructura en el dominio de la frecuencia. El proceso se realiza mediante la excitación mecánica de la estructura de modo que se logre detectar los modos de vibración y factores de amortiguamiento mediante el uso de sensores.

Sus principales aplicaciones se enfocan en el monitoreo del estado de la estructura, debido a que si existen cambios en la frecuencia permite detectar generación de defectos bajo cambios en la geometría y propiedades del elemento. En el diseño mecánico permite definir las frecuencias de resonancia, cuáles son los rangos de frecuencia tanto externos como internos permitidos para que la estructura no falle por fatiga generada por dicha resonancia. Esto último, siendo una herramienta útil para las áreas de la ingeniería tanto aeroespacial como automotriz, entre otras, para la optimización del diseño mecánico en cuanto a reducción de vibraciones, ruidos y mejora del desempeño.

1.2 Transformación de las señales (FFT, FRF y Wavelet)

1.2.1 Transformada de Fourier (FFT) y (FFT PSD)

Es una técnica matemática utilizada para la transformación de una señal temporal en dominio de la frecuencia, es definida por la siguiente ecuación:

$$F(\omega) = \int [f(t) * e^{-i\omega t}] dt \quad (1.1)$$

Donde,

$f(t)$ es la señal temporal

$e^{-i\omega t}$ es el exponente complejo que relaciona la frecuencia angular con el tiempo.

Por lo tanto, el resultado de la transformada de Fourier es una función compleja que refleja el resultado de las frecuencias y sus amplitudes de la señal temporal ingresada.

Adicionalmente, cuando se cuenta con un rango de frecuencias aleatorias y expuestas al ruido se realiza una concentración de la energía de la respuesta de la transformada de Fourier por medio de PSD (Power Spectral Density por sus siglas en inglés), lo cual normaliza los valores frecuenciales y permite una mejor visualización de los distintos niveles de vibración en las señales.

1.2.2 Función de Respuesta de Frecuencia (FRF)

También llamada función de transferencia relaciona en el dominio de la frecuencia una fuerza de excitación con la de respuesta de la estructura. Con ello, logra caracterizar como el sistema responde dinámicamente a diferentes frecuencias donde su resultado refleja la amplitud de los modos de vibración y su cambio de fase angular.

Dicho comportamiento dinámico estructural bajo una fuerza externa se comporta como un sistema de un grado de libertad, el cual consiste en un arreglo masa-resorte con su respectivo amortiguamiento:

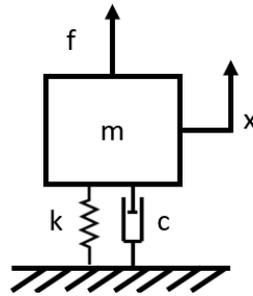


Figura 1-1: Diagrama cuerpo libre comportamiento dinámico de una masa bajo fuerza externa de un grado de libertad.

Fuente: propia.

Donde,

m es la masa en [kg].

k es la rigidez del sistema en [N/m]

c es el amortiguamiento del sistema en [Ns/m]

x es el desplazamiento en [m]

f es la fuerza aplicada al sistema en [N]

La frecuencia natural de respuesta del sistema se da con relación al desplazamiento x con respecto a la fuerza aplicada f. La fuerza de impacto dada en Newtons y la frecuencia de respuesta de la estructura excitada dinámicamente permite la generación de la función de transferencia o FRF:

$$FRF = \frac{\text{Señal impacto}}{\text{Señal respuesta}} \quad (1.2)$$

Dependiendo de la relación ya sea impacto/respuesta o respuesta/impacto y el parámetro de medición de respuesta de la estructura bajo análisis se determina el tipo de FRF como se muestra en la Tabla 1-1.

Tabla 1-1: Tipos de FRF (Fuente Luis A. Bedian et al., 2010)

Parámetro de respuesta	FRF dominio de la frecuencia (Respuesta/ Fuerza)	FRF inversa dominio de la frecuencia (Fuerza/ Respuesta)
Desplazamiento	Receptancia Admitancia Flexibilidad dinámica	Rigidez dinámica
Velocidad	Movilidad	Impedancia mecánica
Aceleración	Acelerancia o Inertancia	Masa aparente

Una gráfica ejemplo de una función de respuesta de frecuencia es como se muestra en la siguiente Figura 1-2.

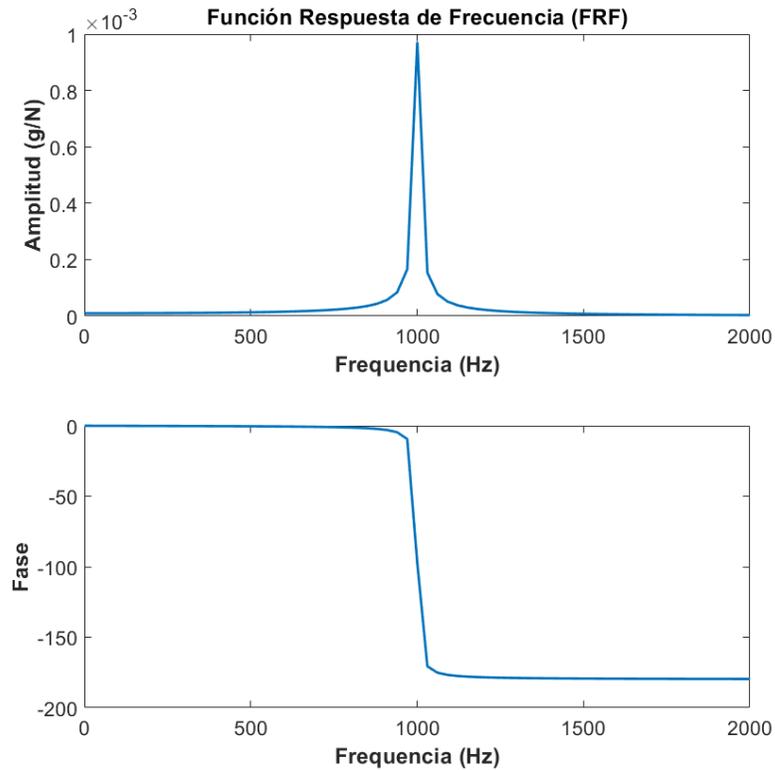


Figura 1-2: Gráfico ejemplo de amplitud y fase de FRF.

Fuente: propia.

En la cual se logra observar un pico en 1000 Hz y un cambio de fase que determina una frecuencia de resonancia, la relación se muestra como g/N un tipo de FRF de inercia. De la FRF se puede extraer información de las frecuencias de resonancia, los modos de vibración y el amortiguamiento de la estructura.

1.2.3 Transformada Continua de Wavelet (CWT)

Es una transformación la señal en dominio del tiempo y de la frecuencia en simultáneo. La cual permite la visualización de la concentración de la energía frecuencial de la señal por medio del gráfico denominado “escalograma”. Al igual que la transformada de Fourier su resultado es de números complejos tanto en magnitud como en fase angular. Su ecuación es como se muestra:

$$\text{CWT}(a, b) = \int \left[f(t) * \psi * \frac{(t-b)}{a} \right] dt \quad (1.3)$$

Donde,

f(t) es la señal temporal

a representa el parámetro de escala de transformación

b representa el parámetro de traslación

$\psi(t)$ es la “Wavelet madre” la cual representa la sección compleja de la función de Wavelet.

t es tiempo

Su transformación a escalograma permite una apropiada visualización de eventos o cambios físicos de la estructura a través del tiempo. Reflejando una concentración en determinadas frecuencias bajo escalas de colores, donde a mayor escala mayor es la energía en la zona de interés.

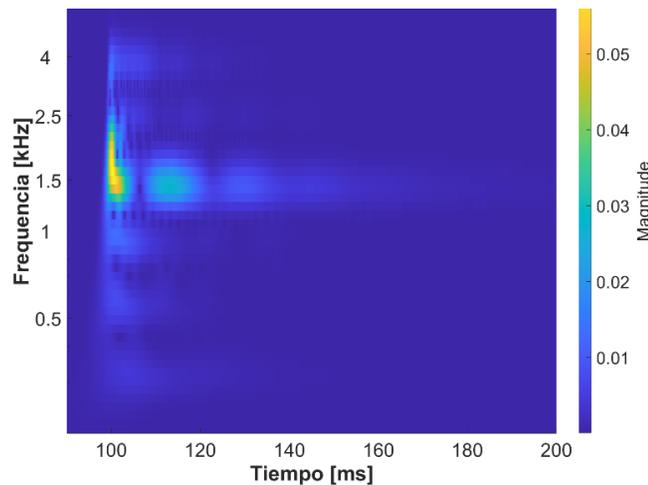


Figura 1-3: Escalograma ejemplo.

Fuente: propia.

En la Figura 1-3 se muestra un ejemplo de un escalograma desarrollado con CWT donde se refleja una distribución de energía frecuencial a lo largo de 200 ms concentrada principalmente en valores cercanos a los 1500 Hz en el cual existe la mayor magnitud de escala de colores.

1.3 Ensayo con martillo de impacto

El ensayo de martillo es una técnica no destructiva basada en el desarrollo del análisis modal en una estructura o elemento, que determina el rango de frecuencias en estudio mediante un impacto controlado. A través de la relación de la fuerza de impacto y la respuesta de la estructura se construye la Función de Respuesta de Frecuencia (FRF) y en ella se extraen las frecuencias naturales, los modos de vibración y el amortiguamiento de la estructura.

La fuerza de excitación se realiza como un impulso de corta duración y de manera puntual en la estructura. Para cubrir el rango de frecuencias de interés se realiza una selección adecuada del tipo de impactador con su respectiva punta en caso de excitación de frecuencias bajas o altas según corresponda y del sistema de captación de la respuesta de la estructura también bajo criterio de cobertura de este mismo rango frecuencial.

Bajo la correcta selección y uso de los elementos en la realización del ensayo de martillo se logra caracterizar un elemento bajo su comportamiento dinámico y determinar su estado

en relación con variaciones en sus propiedades, esta es una metodología usada en la ingeniería en clasificación de condición de elementos mecánicos y estructurales.

1.4 Modelos profundos de aprendizaje

Las redes profundas son un tipo de aprendizaje de maquina dentro de la inteligencia artificial que se caracteriza por su comportamiento en semejanza de las redes neuronales del cerebro humano para la toma de decisiones. Son un conjunto de capas de etiquetas que clasifican de manera jerárquica la información de entrada, en este proceso cuenta con unas capas intermedias ocultas que amplía el procesamiento y precisión en el entramiento, para entregar finalmente en una capa de salida la clasificación final en clases. En el caso de la clasificación de imágenes se utiliza un tipo de redes neuronales profundas llamadas convolucionales, es un proceso preciso a introducir los datos a las redes neuronales lo cual toma las imágenes de entrada y realiza procesos de convolución y agrupamiento para reducir en tamaño las matrices generales de las imágenes y facilitar la computación al ingresar a la red como tal, esto ha probado ser un proceso eficiente en la detección y clasificación de imágenes mejorando el aprovechamiento de los recursos computacionales y el desempeño en la elaboración del entrenamiento y validación del proceso. Un esquema ejemplo de una red convolucional profunda es la GoogleNet y es como se muestra en la Figura 1.4.

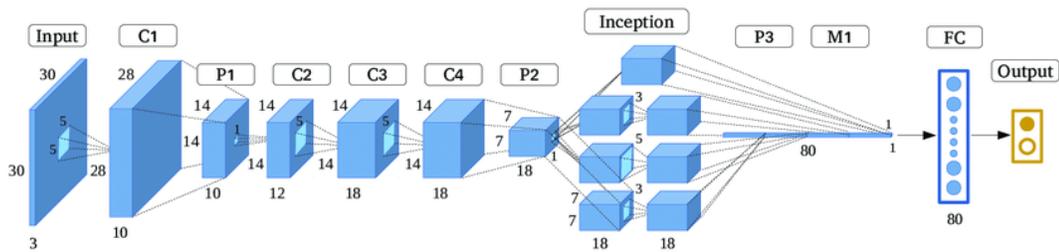


Figura 1-4: Esquema general red neuronal profunda convolucional GoogleNet.

Fuente: Zhiling Guo, Qi Chen 1,2, Guangming Wu , Yongwei Xu, Ryosuke Shibasaki and Xiaowei Shao. 2017.

1.4.1 Métricas de evaluación

Las métricas de evaluación de desempeño de las redes neuronales profundas permiten obtener medidas cuantitativas del comportamiento de la red bajo una tarea específica mediante la relación entre los datos de entrada con los de salida, tres de las métricas más usadas se muestra a continuación:

- **Exactitud:**

Es la relación entre los datos correctamente clasificados sobre el total de los datos. Su valor se da en porcentaje.

$$\text{Exactitud} = \frac{\text{Número de predicciones correctas}}{\text{Número total de predicciones}} * 100 \quad (1.4)$$

- **Matriz de confusión:**

La matriz de confusión permite la tabulación de los resultados obtenidos en relación de los datos de validación o prueba sobre los datos de entrenamiento, agrupa en una ubicación matricial si la clasificación de los datos ha obtenido verdaderos positivos (clasificación correcta según su clase), verdaderos negativos (clasificación correcta predicha para otra clase), falsos positivos (clasificación incorrecta predicha como positiva) y falso negativo (clasificación incorrecta predicho como negativo).

		Clase predicha	
		Negativo	Positivo
Clase verdadera	Negativo	Verdaderos negativos	Falsos positivos
	Positivo	Falsos negativos	Verdaderos positivos

Figura 1-5: Esquema matriz de confusión.

Fuente: propia.

Se suelen representar los recuadros de falsos resultados en rojo y los de verdaderos en verde. Cada valor dentro de cada recuadro finalmente se da en valores porcentuales según corresponda.

- **Curva ROC:**

Es una representación gráfica que refleja el desempeño de una red con factores de 0 a 1 con base a la relación de verdaderos positivos y falsos positivos. La tasa de verdaderos positivos o TPR en sus siglas en inglés se define como:

$$TPR = \frac{\text{Verdaderos positivos}}{\text{Verdaderos positivos} + \text{Falsos negativos}} \quad (1.4)$$

De la misma manera para los falsos positivos o FPR en sus siglas en inglés se define como:

$$FPR = \frac{\text{Falsos positivos}}{\text{Falsos positivos} + \text{Verdaderos negativos}} \quad (1.5)$$

La curva ROC se representa mediante graficar TPR contra FPR. En donde el área bajo la curva refleja la capacidad de clasificar entre positivos y negativos.

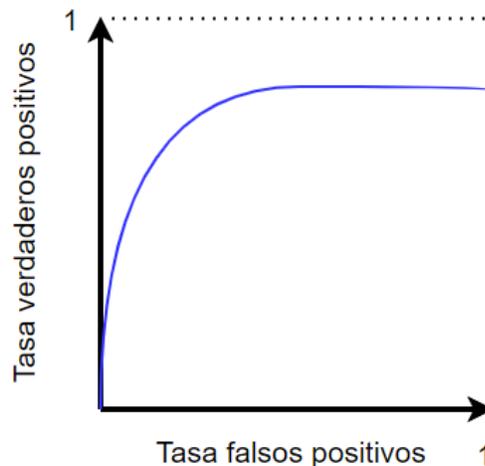


Figura 1-6: Esquema curva ROC.

Fuente: propia.

Su distribución se basa en un comportamiento binario donde la tasa de evaluación se distribuye para 1 como su mayor desempeño y 0 en su peor desempeño.

2. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo, se detalla y expone el avance de los más recientes aportes científicos en el análisis y caracterización de elementos estructurales a través de estudios dinámicos. Estos contribuyen significativamente al entendimiento y la experiencia relacionada con la caracterización de rieles de tren mediante el empleo del ensayo de martillo de impacto basado en la Función de Respuesta de Frecuencia (FRF).

Simultáneamente, se exploran otros avances científicos que destacan cómo la recopilación de información a través de estudios dinámicos alimenta redes neuronales profundas. Este enfoque no solo acelera el procesamiento de datos, sino que también mejora la precisión en la detección del estado de un tipo específico de elemento. Algunos estudios se centran en la aplicación de la FRF, mientras que otros optan por utilizar la Transformada de Wavelet para convertir señales brutas en imágenes, las cuales se organizan posteriormente en una base de datos. Este conjunto de enfoques se revela como información valiosa que enriquece el desarrollo de la presente tesis en la caracterización de estructuras y elementos en general.

2.1 Estudio de condiciones en vía

El progreso en los estudios ferroviarios ha posibilitado una mejora significativa en el enfoque del mantenimiento de la vía férrea, buscando continuamente la detección temprana de defectos y la prevención de fallas para reducir costos y riesgos asociados a posibles fallos. Este logro se ha alcanzado principalmente mediante la implementación de planes de mantenimiento [26] y procesos investigativos enfocados en los elementos críticos de la vía, con especial énfasis en el riel.

Dentro de los procesos investigativos lo principal es la determinación de cuáles son los tipos de condiciones que se logran encontrar en la vía y a partir de esto, por medio de diferentes metodologías de abordaje lograr su detección y prevención de daños. Entre los mecanismos de desgaste se han determinado algunos predominantes como la fatiga superficial y el desgaste ondulatorio producida por la interacción rueda-riel [2]. En el cual en los defectos que más se resaltan se encuentra la corrugación [21] y los denominados *Studs* y *Squads*, estudiados con base en su evolución en el tiempo [3].

En cuanto a las metodologías de caracterización del riel, los estudios dinámicos han ganado relevancia al analizar el comportamiento frecuencial para determinar su estado y su generación de defectos. Además, esta metodología de análisis dinámico se ha aplicado directamente en la vía, donde se han analizado las frecuencias generadas durante la interacción rueda-riel [14]. Se ha observado una variación en el comportamiento de estas frecuencias cuando aparecen condiciones distintas a las ideales en el riel. Utilizando sensores ubicados tanto en exteriores [21] como en el interior de los trenes [25], se han obtenido patrones que permiten la clasificación del estado de la vía.

2.2 Caracterización estructural mediante ensayo de martillo de impacto

La técnica del martillo de impacto ha demostrado ser un método confiable y eficaz para la caracterización estructural. Este ensayo se ha aplicado con base en el análisis modal [20], realizándose en laboratorios donde se ha probado en diversos perfiles estructurales. Se han determinado comportamientos dinámicos inherentes a la estructura mediante su ensamblaje [5] y evaluando su estado general.

Esta técnica ha sido empleada en diversos elementos de la vía férrea, abarcando desde durmientes [26], clips [27] y balasto [28] e incluso en juntas de vía [4]. Cuando se aplica al riel, la técnica ha permitido identificar frecuencias asociadas con su estado y ha demostrado ser eficaz en la detección de defectos, ya sea en condiciones reales de vía [1] o en experimentos controlados en entornos de laboratorio [9]. En cuanto a los sensores

utilizados para la captación de señales, se han empleado tanto acelerómetros [12] como micrófonos [24].

Estas investigaciones han posibilitado la determinación de rangos frecuenciales de trabajo que se extienden hasta los 3000 Hz, identificando puntos de impacto y evaluando sus efectos en las mediciones [1]. Esta labor se ha llevado a cabo en colaboración con métodos estadísticos de clasificación de estado. Además, se ha observado la variación de las frecuencias en presencia de algún defecto, validando dichas observaciones mediante métodos numéricos [9].

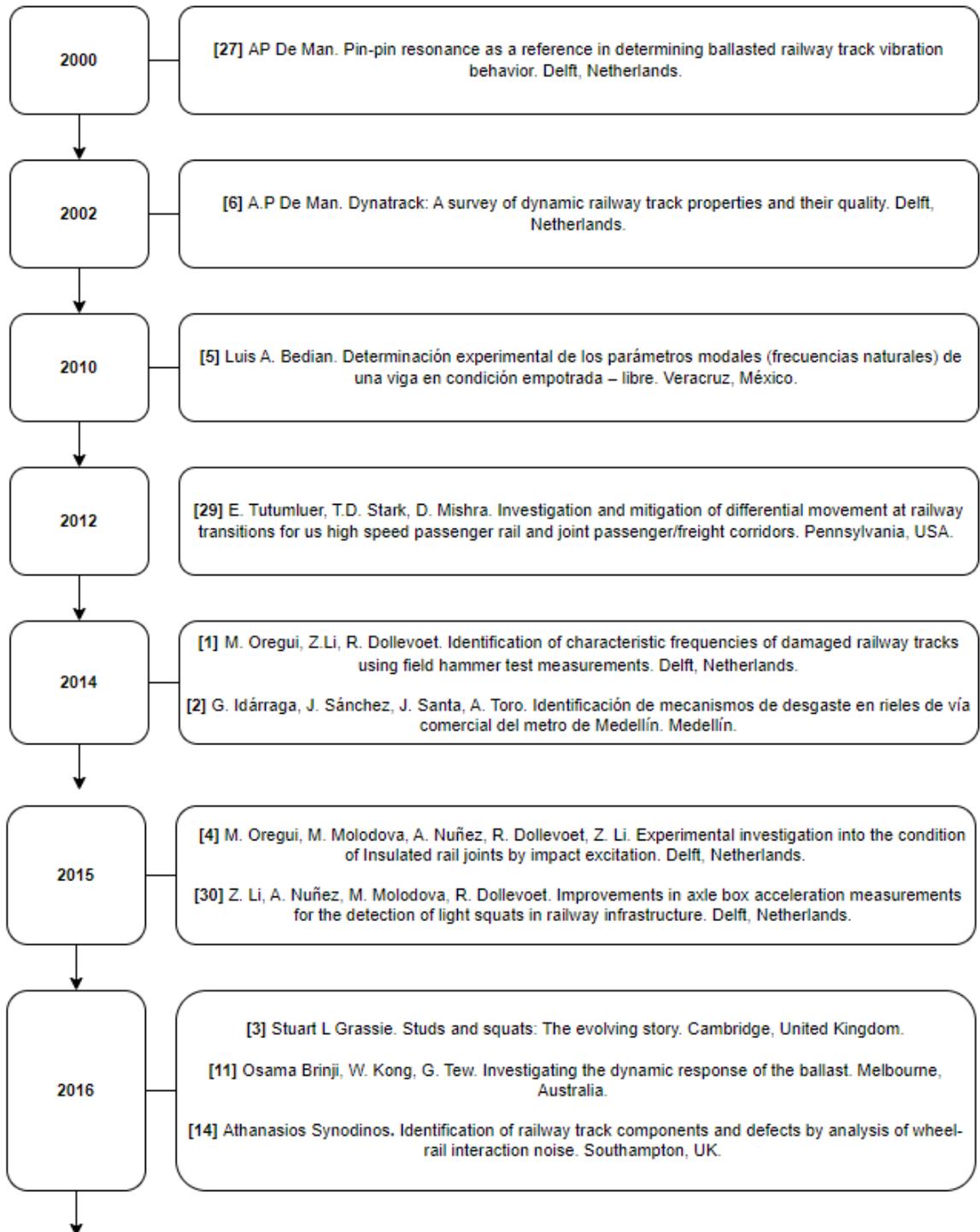
2.3 Clasificación de estado por redes profundas

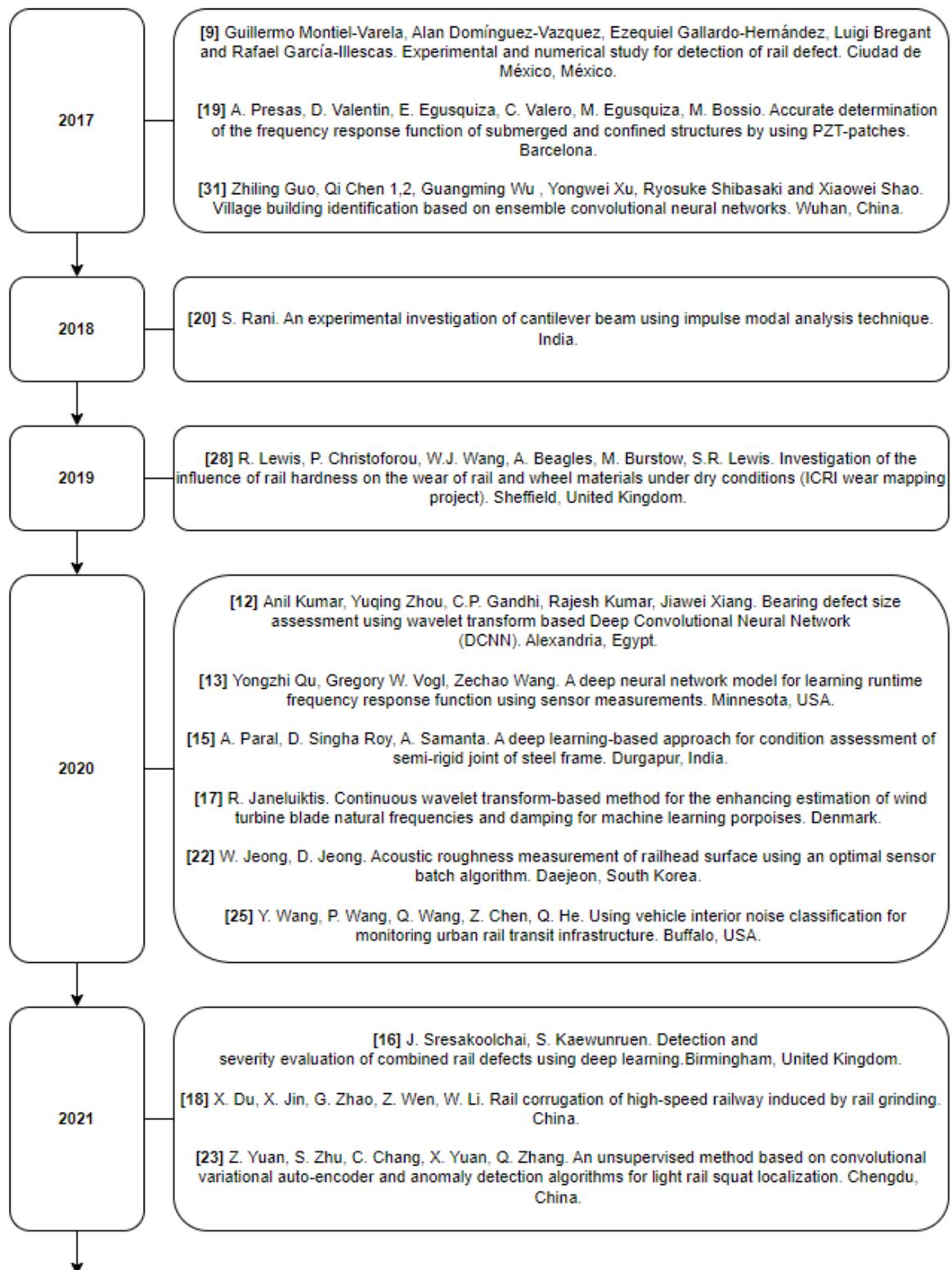
En la búsqueda de mejorar la practicidad y rendimiento del proceso de caracterización, distintos procesos investigativos han integrado el análisis dinámico de diversas estructuras con el aprendizaje de máquina. Este enfoque ha logrado agilizar la captura, procesamiento y clasificación de grandes volúmenes de datos en la caracterización del estado de elementos específicos.

Algunos de estos estudios han implementado entrenamientos de clasificación al combinar las Funciones de Respuesta de Frecuencia (FRF) [13] con redes profundas (DNN) [7]. Además, otras investigaciones han demostrado la eficiencia en la clasificación de estados al transformar las señales en imágenes mediante Wavelets [12]. Este último, permitiendo observar cambios en la concentración energética basados en propiedades físicas, siendo simultáneamente detectados por redes profundas convolucionales (CNN).

En la caracterización del riel, un estudio reciente realizó la implementación de un proceso de inspección de vía mediante la captación de señales a través de un dispositivo móvil en la vía. Durante este proceso, las señales eran transformadas y alimentaban una red profunda en simultaneo del recorrido del equipo, permitiendo la determinación del estado a lo largo de la vía [24].

Con el objetivo de lograr una mayor claridad en el progreso científico y en los aportes que constituyen la base para el desarrollo de esta tesis, se ha elaborado una línea del tiempo que presenta cada uno de los artículos en función de sus fechas respectivas:





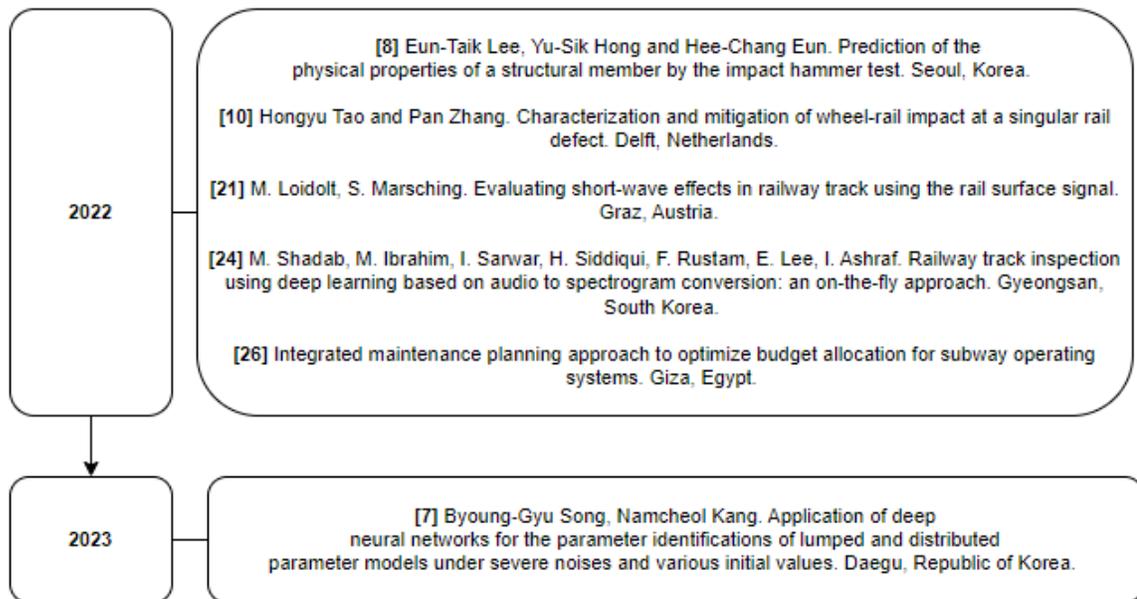


Figura 2-1: Estructura proceso de obtención frecuencias naturales del riel.

Fuente: propia.

Con base en las investigaciones realizadas y aportes científicos, el desarrollo de esta tesis tiene como objetivo ampliar el conocimiento en varias áreas:

A. Desarrollar una metodología integral:

- Crear una metodología que permita caracterizar el riel de tren UIC-54 no solo en presencia de condiciones particulares, sino también considerando la variación de las distancias entre fijaciones. Esto se logrará mediante el uso de técnicas como Transformada de Fourier (FFT), Función de Respuesta de Frecuencia (FRF) y Wavelet.

B. Montaje de laboratorio optimizado:

- Trabajar en la adaptación de un montaje de laboratorio, simplificando los componentes que se encuentran en la vía. El objetivo es obtener señales más cercanas a la realidad, facilitando la replicación de condiciones y defectos en entornos controlados.

C. Validación mediante simulaciones por elementos finitos:

- Validar el comportamiento frecuencial del riel en presencia de condiciones específicas mediante simulaciones por elementos finitos. Esto incluirá la generación de defectos controlados y la utilización de modelos 3D escaneados de rieles bajo estados específicos tomados de la vía.

D. Implementación de metodología eficiente:

- Desarrollar e implementar una metodología que mejore la eficiencia en la caracterización del riel por medio del ensayo de martillo teniendo en cuenta factores que puedan afectar el proceso y posibles soluciones. Esto por medio de la evaluación de resultados de la toma, transformación y uso de las señales en FFT, FRF y Wavelets en conjunto con las redes neuronales y procesos estadísticos.

3. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

El estudio del comportamiento dinámico del riel de tren permite la caracterización de sus modos de vibración dominio frecuencial. Y a partir de los cambios en las características de las frecuencias predominantes es posible asociar dichas variaciones a diversos tipos de defecto. Así que, para abordar la extracción de los datos y su clasificación, se diseñó un proceso que permite determinar los rangos de frecuencias naturales del riel desde diferentes metodologías con base en sus propiedades físicas y mecánicas el cual su estructura general se plasma en la Figura 3-1.

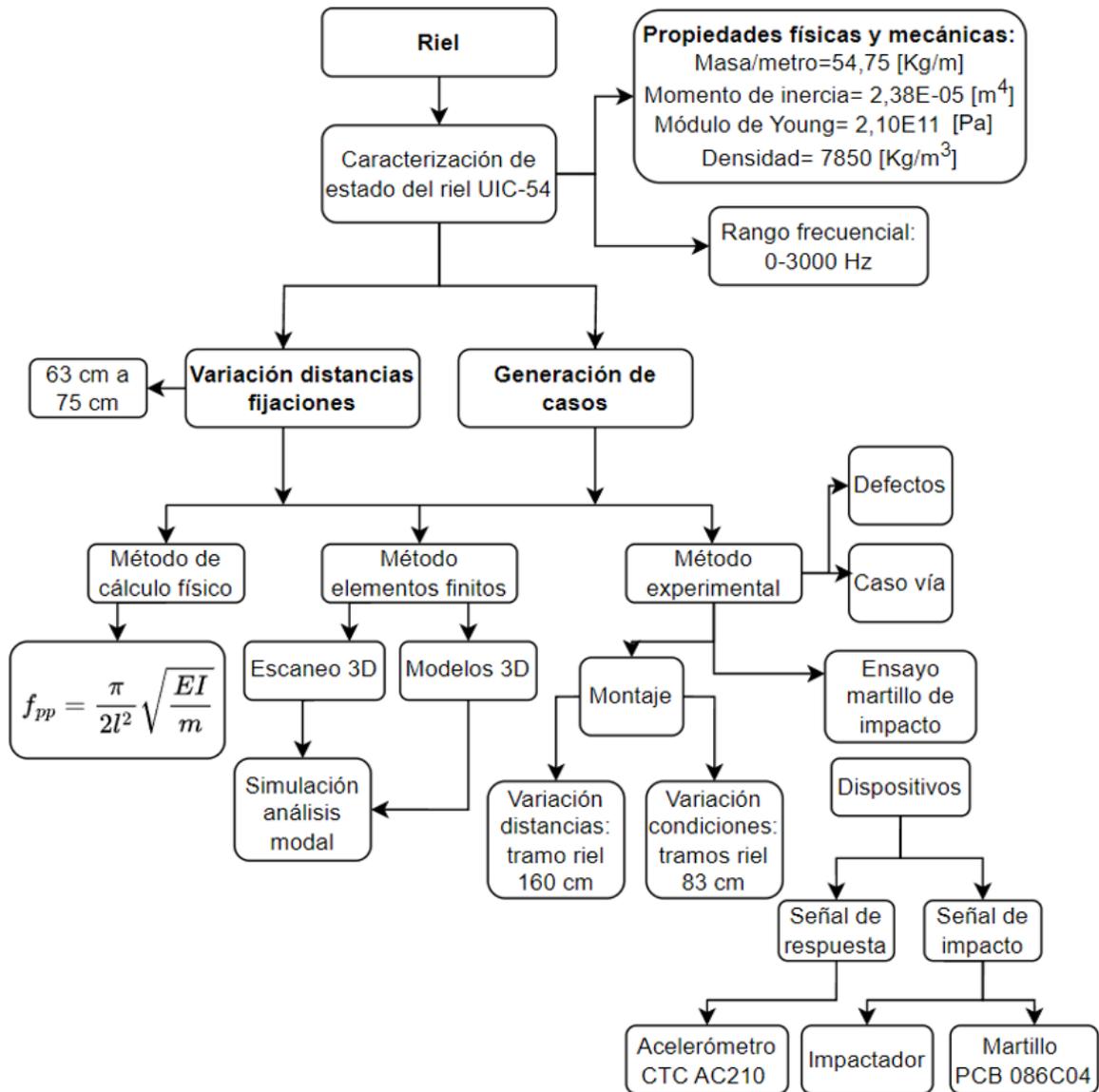


Figura 3-1: Estructura proceso de obtención frecuencias naturales del riel.

Fuente: propia.

Este proceso está centrado en el análisis modal, se compara por tres métodos: teórico, numérico y experimental. Los cuales asocian las variaciones a estados con base a cambios de la distancia entre durmientes o la aparición de defectos.

La etapa inicial del proceso arranca con la determinación de los rangos frecuenciales bajo análisis con base en estudios preliminares y para cubrir frecuencias relacionadas con otros elementos involucrados. Al mismo tiempo, se define el tipo de características a clasificar a

través de su cambio en el comportamiento dinámico, para ello, se estipula dos principales conjuntos de trabajo experimental, el análisis bajo el criterio de la variación de las distancias entre fijaciones y otro conjunto bajo el cambio de estado con variación de condiciones o aparición de defectos.

Por consiguiente, con base en la literatura se calcula teóricamente la frecuencia por fijaciones o también llamada pin-pin por sus siglas en inglés, el cual se obtiene con base a parámetros físicos del riel como su masa por unidad de longitud, momento de inercia, módulo de elasticidad y distancia entre durmientes.

Al tener un punto de partida con un rango de frecuencias, se prosigue con la validación del comportamiento de estos datos por medio de un análisis numérico, se modela en 3D el riel y se escanean tramos de riel de vía en condiciones específicas y se corre el análisis por el método por elementos finitos (MEF) para cada caso, tanto para la variación entre durmientes como para su generación de defectos. Para el caso de la variación de las distancias, en teoría, el riel debe contar con una distancia infinita, pero en términos prácticos y de consumo de recursos para cada caso se manejó una cantidad específica de distancias. Se realizó para la generación de defectos el análisis en una distancia específica donde su variación se dio a través de una huella en la superficie y con aumento gradual de remoción para observar su cambio frecuencial, adelante en este capítulo se explica en detalle el proceso realizado.

Para el tercer método de abordaje y con base al rango de frecuencias estipulado, se determina cual es la condición de trabajo en el método experimental. Se define la tasa de muestreo de los equipos de adquisición de datos, tanto para el martillo de impacto, como para el acelerómetro en conjunto con las tarjetas de adquisición conexión dispositivos a PC. En este caso, se trabaja bajo una sección de ensamble de tramo de vía en laboratorio con sus respectivos elementos principales, en donde, se cuenta con dos principales dimensiones de rieles, uno de 160 cm en perfectas condiciones donde se evalúa el cambio frecuencial con respecto a la variación de las distancias entre fijaciones y otro conjunto de secciones de riel con longitudes de 83 cm donde cada uno cuenta con una condición distinta y son base para analizar el cambio frecuencial con aparición de defectos.

En el caso del procesamiento de señales en el análisis modal se cuenta con una señal de impacto y otra de respuesta. El cual para visualizar su comportamiento frecuencial se transforman por FRF, FFT y por Wavelet. Para las señales transformadas por FRF se realiza una prueba estadística para observar su comportamiento con respecto a una señal base, es decir, con base en una condición inicial del riel cómo se comportan las señales con diferentes condiciones. Al mismo tiempo, la FFT permite la visualización de las frecuencias pico de resonancia del riel.

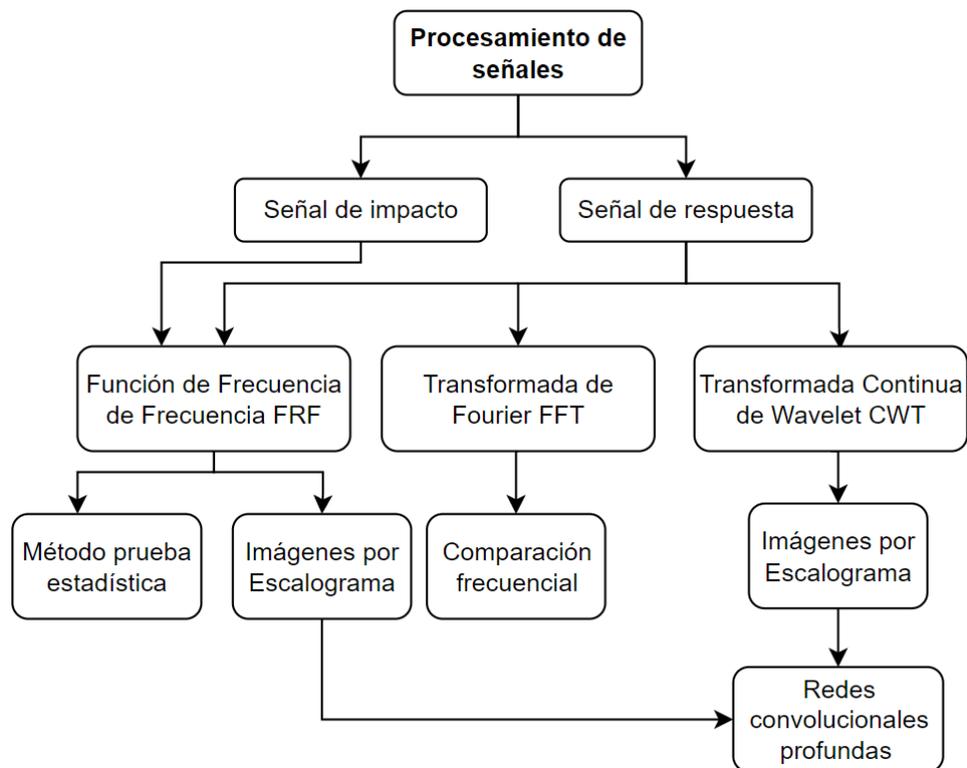


Figura 3-2: Estructura procesamiento de señales ensayo de martillo.

Fuente: propia.

Para la obtención de las imágenes que se introducen dentro de las redes profundas se realiza la transformación de las señales por la transformada continua de Wavelet (CWT) donde su resultado es el escalograma. Estas imágenes se agrupan según su tipo de caracterización (distancias o condiciones) donde cada uno cuenta con el conjunto de clases correspondiente a clasificar. Para evaluar el desempeño de la identificación frecuencial del riel se realiza un proceso de validación entre los métodos de abordaje. Adicionalmente mediante un método Z que se explicará más a detalle en este capítulo, se

utiliza un proceso matemático y estadístico para clasificar el estado del riel entre sano y malo. Finalmente, el rendimiento de las redes profundas es evaluado mediante métricas tales como la exactitud, la matriz de confusión y la curva ROC.

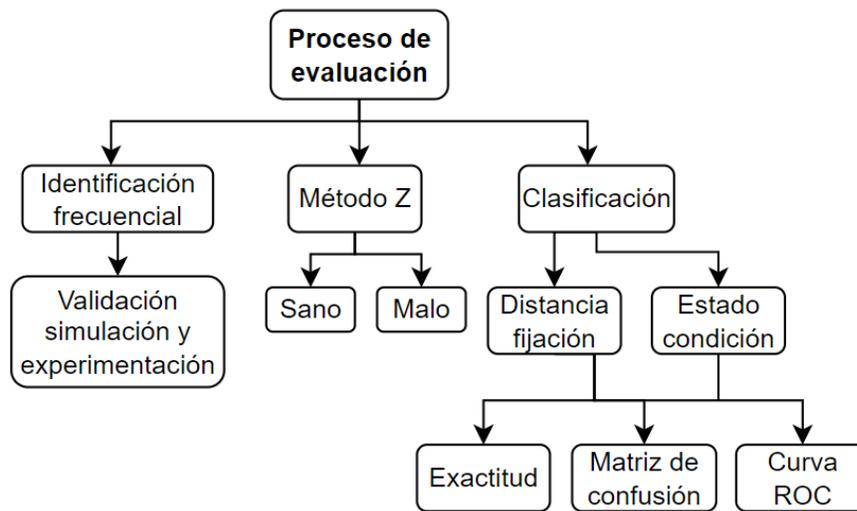


Figura 3-3: Estructura proceso de evaluación de metodología de caracterización riel.
Fuente: propia.

3.1 Propiedades y características del riel

El riel en estudio es la referencia UIC54 el cual es considerado bajo la norma europea EN 13674-1. Las propiedades generales del riel son las siguientes:

Tabla 3-1: Propiedades riel UIC-54 (Fuente propia).

Masa/metro [kg/m]	Momento de inercia [m4]	Módulo de young [Pa]	Densidad [kg/m3]	Área [m2]
54,75	2,38E-05	2,10E+11	7850	6,98E-03

Donde,

- La magnitud de la masa es dada por unidad de longitud.

- El área está asociada a la sección transversal.

3.2 Cálculo frecuencia por fijaciones

La frecuencia por fijaciones o su término en inglés pin–pin, es la frecuencia característica de una viga apoyada y fijada en dos puntos. En el cual su cálculo se realiza bajo la siguiente ecuación tomada de (A.P. de Man, 2000):

$$f_{ef} = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (3.1)$$

Donde,

f_{ef} es la frecuencia total calculada.

L es la distancia entre las fijaciones.

E es el módulo de Young.

I es el momento de inercia.

m es la masa/unidad de longitud.

En ella se observa que hay dos factores principales que influyen significativamente en la frecuencia natural: los cambios en la distancia entre las fijaciones y las alteraciones en la estructura física, especialmente debido a la presencia de defectos. La introducción de defectos en la estructura agrega un elemento adicional, provocando cambios en las propiedades fundamentales como masa y momento de inercia, en consecuencia, afectando la respuesta dinámica del sistema.

3.3 Parámetros de modelación para los modelos de elementos finitos

La modelación del riel en 3D se realiza mediante la extrusión de la sección transversal característica del perfil UIC-54 utilizando el software comercial CAD de Autodesk Inventor. Para el análisis de la variación de las frecuencias con base en el cambio de las distancias entre fijaciones, se realizan modelos de riel donde se repiten los puntos de fijación hasta

completar los 10 m de longitud total y así para separación entre durmientes. En el análisis de frecuencias basado en cambios en propiedades físicas, los modelos cuentan con una longitud total de 83 cm para una distancia entre fijaciones de 63 cm.

Para el análisis de variación de condiciones se dividieron en dos grupos ambos basados en situaciones que se pueden encontrar en la vía. Un grupo de estos rieles se analiza el proceso de reperfilado, se lleva a cabo como parte de un plan de mantenimiento destinado a corregir imperfecciones superficiales del riel mediante la remoción homogénea de material de acuerdo con el perfil.

Para simular este proceso en el modelo 3D, se toma el contorno del riel y se incrementa gradualmente su profundidad en 3 mm, alcanzando finalmente los 12 mm. El resultado final de este reperfilado simulado se muestra en la Figura 3-4.

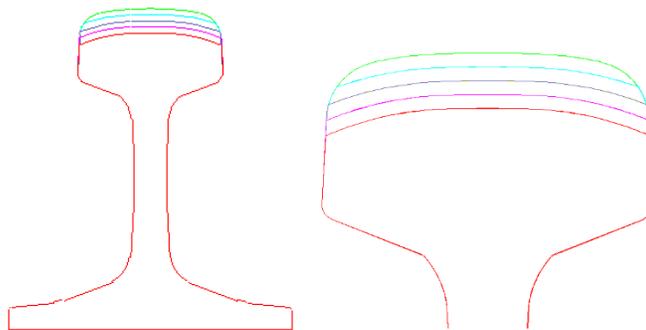


Figura 3-4: Esquema reperfilado riel.

Fuente: Propia

Tabla 3-2: Etiquetas y profundidades del reperfilado. (Fuente propia).

Etiqueta	Profundidad [mm]
Sano	-
Reperfilado 1	3
Reperfilado 2	6
Reperfilado 3	9
Reperfilado 4	12

El segundo conjunto de simulación abarca defectos comunes en la vía, nos enfocamos en uno en particular: los *Squads*, utilizando como base el artículo [6]. En dicho artículo, se establecen las geometrías de las huellas de remoción, incluyendo sus dimensiones y profundidades. La simulación se aproxima utilizando las dimensiones de una elipse, especificando su eje mayor, eje menor y la profundidad de la huella según lo definido en el estudio mencionado.



Figura 3-5: Perfil huella generación de condiciones.

Fuente: propia.

Para un mejor entendimiento cada condición fue codificada y se definieron sus características en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3: Dimensiones huella condiciones (Fuente propia).

Etiqueta	Eje mayor [mm]	Eje menor [mm]	Profundidad [mm]
Sano	-	-	-
Condición huella 1	30	45	2
Condición huella 2	40	55	3
Condición huella 3	50	65	4
Condición huella 4	60	75	5
Condición huella 5	80	85	6

3.3.1. Análisis modal software CAE

Los modelos creados mediante el software CAD son exportados y configurados para realizar el análisis modal a través del software CAE, utilizando dos programas: ANSYS y COMSOL. Con base en las licencias requeridas para el uso de recursos ANSYS se utilizó para el análisis de las frecuencias bajo variación de fijaciones y COMSOL para el cambio de condiciones.

Durante la creación de la malla para los modelos, se prefirió la utilización de elementos tipo tetraedros y se aplicaron refinamientos específicos en áreas críticas, como los defectos puntuales. Este enfoque tiene como objetivo mejorar la precisión de los resultados y lograr una convergencia eficiente en el análisis, evitando así la necesidad de una distribución homogénea de elementos en toda la estructura, que requeriría un mayor consumo de recursos y un mayor número de elementos para obtener resultados aproximados.

El número total de elementos finitos utilizado para el tramo de riel de 83 cm es aproximadamente de 450000. En el caso de los rieles sometidos al análisis de variación de distancias, donde no se requiere un nivel tan detallado de condición, se ha establecido un tamaño de elemento finito de 7 mm para mantener la eficiencia en los recursos computacionales, garantizando resultados precisos sin sacrificar la calidad del análisis.

En cuanto a las condiciones de frontera, se simplificaron con fijaciones en los puntos de apoyo a la distancia correspondiente a cada caso. El impacto se modeló mediante una fuerza de 1 [N], indicada por la flecha roja en la Figura 3-6, aplicada en dirección normal a la superficie del riel.

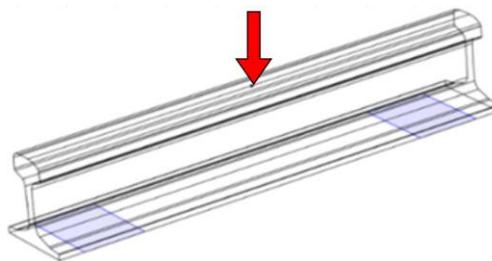


Figura 3-6: Modelo riel bajo condiciones de frontera.

Fuente: propia.

Además de las simulaciones con los modelos 3D del software CAD, se llevó a cabo un escaneo tridimensional de los tramos de rieles destinados a un examen posterior en el método experimental, con el objetivo de validar su comportamiento frecuencial. En la fase final del proceso, los datos respuesta del análisis modal se exportan los datos de respuesta de frecuencia para cada caso, expresados en unidades de aceleración, se procede a su graficación y análisis.

3.4 Proceso experimental ensayo martillo

El método experimental se basa en el análisis modal del riel, utilizando el ensayo del martillo de impacto para excitar frecuencias de interés. Se delimita un rango frecuencial de trabajo desde 0 hasta 3000 Hz, incluyendo la frecuencia de resonancia del riel. Este amplio rango permite detectar armónicos y otros elementos asociados que podrían no estar directamente presentes en el análisis teórico o numérico.

En cuanto a la implementación práctica, se seleccionan elementos clave para llevar a cabo el ensayo de impacto. Entre los elementos más relevantes se encuentran el martillo instrumentado de impacto, el acelerómetro y las tarjetas de adquisición de datos. Se procede al montaje del laboratorio, incorporando todos los elementos necesarios para llevar a cabo la experimentación de manera efectiva.

Para la captura de datos, se ha diseñado una interfaz gráfica de usuario (GUI) que simplifica la adquisición, visualización y almacenamiento de las señales. En esta interfaz, se grafican las señales brutas capturadas tanto del impacto como de la respuesta del riel. Además, se incluyen representaciones gráficas de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y la Función de Respuesta en Frecuencia (FRF) correspondientes a cada señal, proporcionando una herramienta integral para el análisis de los resultados experimentales.

El esquema general del sistema de toma, transformación y almacenamiento de datos es como se muestra en la Figura 3-7.

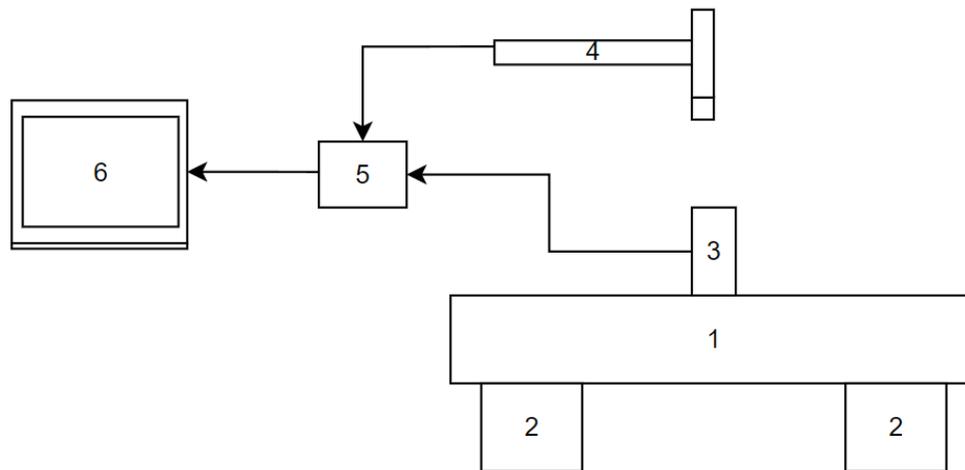


Figura 3-7: Diagrama dispositivos conexión ensayo martillo de impacto.

Fuente: propia.

Donde,

- 1) Riel UIC-54.
- 2) Durmiente de concreto.
- 3) Acelerómetro uniaxial CTC AC210.
- 4) Martillo de impacto PCB 086C04.
- 5) Acondicionador de señal PCB IPC 485B39.
- 6) PC con interfaz (GUI) para capturar y transformar las señales.

En el proceso de montaje, el riel, fijado en los durmientes de concreto, es sometido a pruebas para determinar su frecuencia de respuesta. Esto se logra utilizando un acelerómetro uniaxial que registra las vibraciones. La fuerza necesaria se aplica mediante un martillo de impacto instrumentado. Ambos dispositivos están conectados mediante cables al acondicionador de señal, donde los datos analógicos se transforman en digitales. Posteriormente, estos datos son enviados a una computadora (PC) donde se visualizan, transforman y analizan las señales obtenidas durante las pruebas.

3.4.1 Acelerómetros y tarjetas de adquisición

La selección del acelerómetro debe cubrir los rangos frecuenciales en relación con la cantidad de datos por segundo que puede tomar el dispositivo, la menor sensibilidad para disminuir el porcentaje de error en búsqueda de obtener resultados acertados. El acelerómetro seleccionado es el CTC AC210 con una frecuencia de respuesta hasta los 4000 Hz, una sensibilidad por este rango de 5%, un voltaje de 30 V y un rango dinámico que alcanza 80 g.

El impacto se realiza de manera normal a la superficie del riel, y para captar las frecuencias en este mismo eje, se posiciona el acelerómetro en la mitad de la cabeza del riel, en el centro del montaje donde se produce el mayor desplazamiento. Se utiliza un sistema de acoplamiento que aprovecha la rosca del dispositivo junto con pegamento. Este diseño asegura una excelente adhesión entre el acelerómetro y el riel, reduciendo la posibilidad de presencia de frecuencias no deseadas derivadas de un mal ajuste del sistema. La elección del acelerómetro y el montaje del sistema de acoplamiento se presentan en la Figura 3-8.



Figura 3-8: Acelerómetro uniaxial CTC AC210 y acoplamiento en riel.

Fuente: propia.

Desde el acelerómetro, se establece una conexión mediante cableado hacia la tarjeta de adquisición de señal para llevar a cabo la transformación de señales analógicas a digitales. Para este propósito, se seleccionaron los acondicionadores PCB IPC 485B39 (Figura 3-9), que proporcionan el voltaje de entrada necesario (30 V). Su tasa de muestreo alcanza los 48,000 datos por segundo, equivalente a una frecuencia máxima de 24,000 Hz. Este valor

es completamente adecuado para abarcar los rangos de trabajo previstos en el análisis, garantizando así una adquisición de datos efectiva y precisa.



Figura 3-9: Acondicionador de señal PCB IPC 485B39.

Fuente: propia.

3.4.2 Características del martillo

El martillo seleccionado es el PCB 086C04, diseñado específicamente para trabajar en superficies pesadas y de alta dureza. Este martillo presenta una frecuencia de resonancia que alcanza los 22 kHz, una fuerza máxima de impacto de 4448 N, un voltaje de 30 V y una masa neta de 0,16 gramos ajustable con la posibilidad de agregar hasta 75 gramos adicionales. Además, cuenta con un conjunto de puntas que le confieren un rango específico de cobertura de frecuencias, proporcionando versatilidad para el ensayo de impacto en diversas condiciones.



Figura 3-10: Conjunto martillo de impacto PCB 086C04.

Fuente: <https://www.pcb.com/products?m=086c04>

Las puntas en la Figura 3-10 van de derecha a izquierda de mayor dureza a menor dureza, para comprender más a detalle la cobertura de frecuencias por tipo de punta el proveedor suministra el siguiente gráfico:

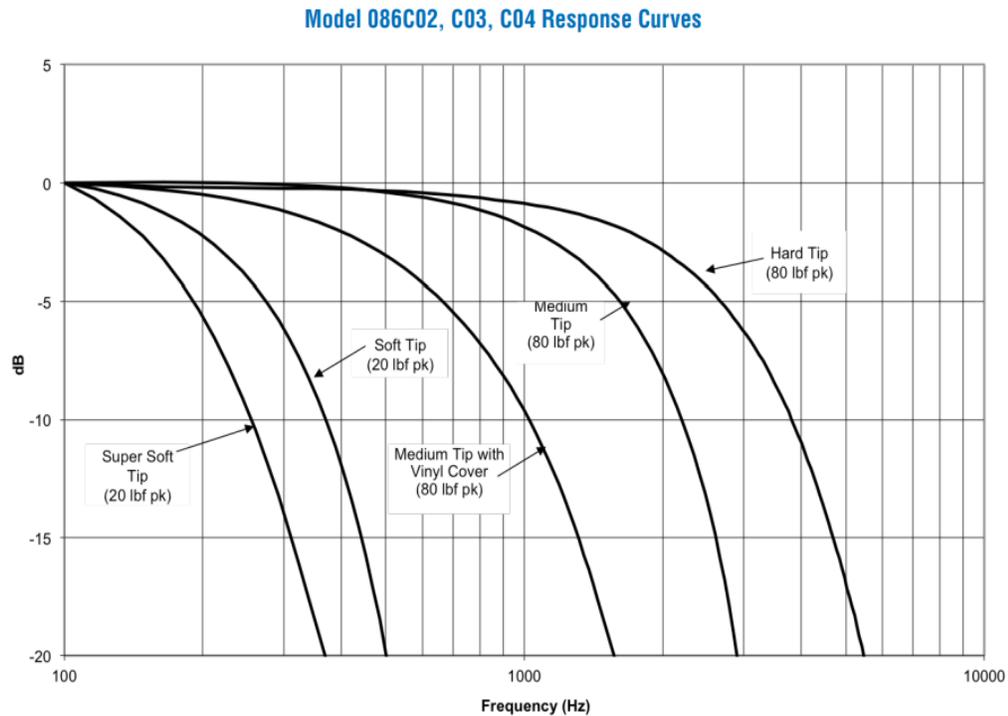


Figura 3-11: Rango de cobertura de frecuencias por tipo de punta.

Fuente: PCB documentación martillo de impacto 083C04.

Se ha elegido la punta de dureza media (*Medium tip*) debido a que alcanza una cobertura cercana a los 3000 Hz, lo cual se encuentra dentro del rango de frecuencias adecuado para el estudio dinámico del riel. Al mismo tiempo, esta punta asegura una variabilidad adecuada en los decibelios con respecto a la frecuencia de resonancia del riel. Aunque la punta dura (*Hard tip*) ofrece una mayor cobertura de frecuencias, su dureza tiende a excitar con mayor amplitud las frecuencias altas, que no son de interés en este estudio. Por lo tanto, la selección óptima se ha realizado con la punta de mediana dureza.

3.4.3 Interfaz de adquisición de señales

Para la adquisición y transformación de datos mediante el uso de un computador, se diseñó por medio del software Matlab una interfaz con la configuración de tasa de muestreo de 48000 Hz y con entrada para dos canales tanto para la señal del martillo como para el acelerómetro. Esta interfaz ejecuta el inicio de la toma de los datos y los almacena según la decisión del usuario para un tiempo de 3 segundos para un total de 144000 datos totales

por toma, lo suficiente para realizar el impacto, capturar las señales y permitir la estabilización del riel luego del impacto.

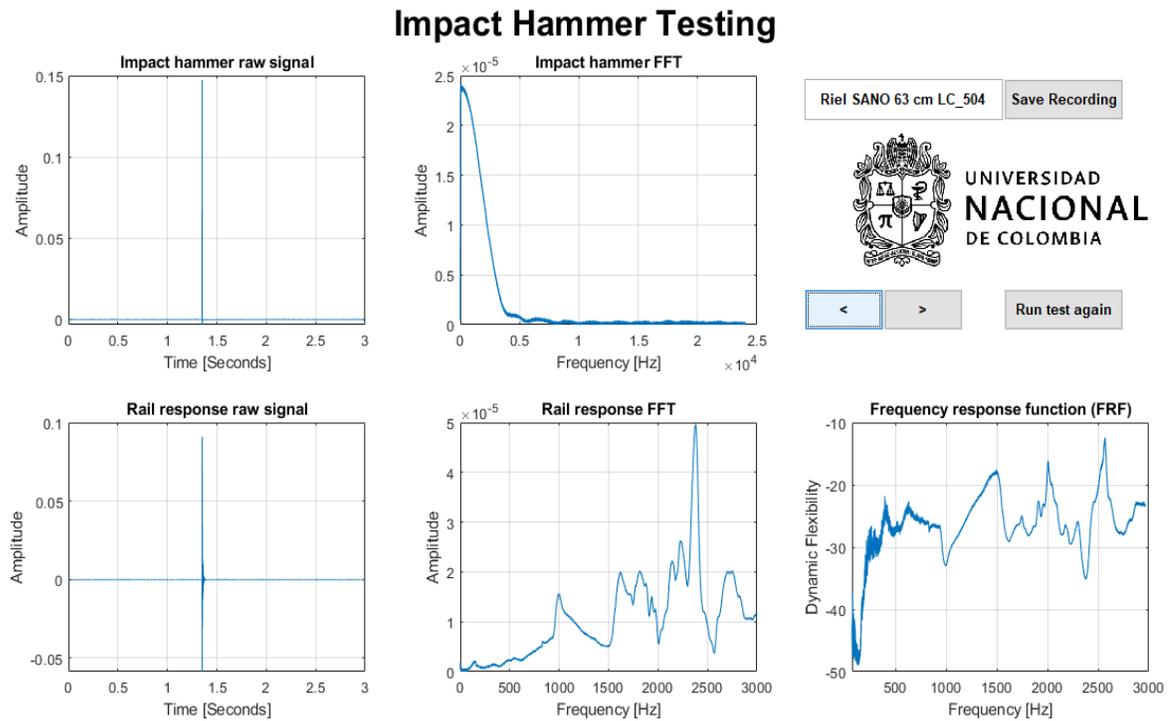


Figura 3-12: Interfaz gráfica (GUI) ensayo martillo.

Fuente: propia.

Dentro del interfaz se grafica la señal temporal del impacto, la señal temporal de la respuesta del riel bajo este impacto, transformada de Fourier tanto para el impacto como para la respuesta y finalmente la Función de Respuesta de Frecuencia (FRF) bajo criterio de análisis de la receptancia. La FRF se configuró con un filtro de frecuencias bajas de 70 Hz ya que las frecuencias de estos valores no permiten la correcta visualización de su graficación.

3.5 Montajes experimentales

El ensamblaje en el laboratorio implica la instalación del riel objeto de análisis, fijado en dos puntos mediante dos secciones de durmientes, pads y clips para su sujeción (Figura 3-13). Es importante destacar que en este montaje no se considera el uso de balasto.



Figura 3-13: Montaje experimental laboratorio.

Fuente: propia.

Durante este proceso, se identifican las frecuencias naturales asociadas a la variación de distancias entre las fijaciones utilizando un tramo de riel en condiciones óptimas. Para el estudio de las frecuencias relacionadas con el cambio de condición, se cuenta con un conjunto de tramos de riel tomados de vía cada uno con un estado específico y distinto.

Entre estos tramos se encuentran: un riel en óptimas condiciones y otros cuatro con diferentes estados, los cuales han sido evaluados mediante inspección visual general y un escaneo 3D, del cual se proporcionarán más detalles posteriormente.

3.1 Puntos de impacto

El riel se asume como una viga fijada en dos puntos lo cual al aplicar una fuerza normal a la superficie que excite las frecuencias naturales tiende a tener el mayor desplazamiento en el punto medio, por lo cual la ubicación del acelerómetro ha sido definida en este punto.

Los puntos de impacto se definieron principalmente cercanos a las fijaciones, esto para contar con espacio y tiempo del desplazamiento de la vibración a lo largo de la estructura hasta el sensor, disminuyendo la superposición entre los impactos, reflejando los efectos de amortiguamiento, permitiendo a su vez la visualización y distinción de elementos involucrados en el ensamble con respecto al comportamiento dinámico del riel.

Al mismo tiempo al definir el punto de impacto fijo permite disminuir el porcentaje de error entre las señales debido a la variación por la manipulación manual con respecto a la fuerza, posicionamiento y ángulo de impacto.

Adicionalmente, se lleva a cabo un proceso de experimentación en donde si se varían los puntos de impacto en rieles con defectos visualmente identificados. La ubicación del sensor se da donde se observe la mayor presencia del defecto. Se busca entender cómo varía la frecuencia del riel a lo largo de la estructura, tanto en condiciones normales como cuando presenta algún tipo de defecto aproximando el comportamiento de la interacción rueda-riel durante el paso del tren. El análisis de estas variaciones contribuirá a comprender mejor el comportamiento dinámico del sistema y a detectar posibles problemas o irregularidades en el riel.

3.1.1 Configuración sección laboratorio método experimental

En el montaje de laboratorio (Figura 3-13) se realizan los dos experimentos generales. La caracterización por variación de la distancia y por cambio de condiciones.

Para el primero, se cuenta con un riel de 160 cm donde se configuran las distancias determinadas con base desde 63 cm hasta 75 cm (63 cm, 67 cm, 70 cm, 72 cm y 75 cm), donde para cada caso se toman 45 señales. Estos valores de distancia se definieron con base en los valores máximos y mínimos existentes en vía.

El segundo caso, para la caracterización por condición se cuenta con un conjunto de tramos de riel con una longitud de 83 cm en total para una distancia entre fijaciones de 63 cm (Figura 3-8). Dentro del conjunto de tramos se encuentran 4 con una condición específica y uno en estado sano que sirve de punto de comparación.





Figura 3-14: Conjunto sección rieles.

Fuente: propia.

Se etiquetan para su identificación como: Condición 1 (DEF1), Condición 2 (DEF2), Condición 3 (DEF3) y Condición 4 (DEF4). Este conjunto de tramos además es modelado mediante su escaneo 3D para realizar el análisis modal por elementos finitos.

3.1.2 Análisis frecuencial bajo variación de puntos de impacto

Para realizar un análisis más detallado del comportamiento frecuencial del riel en relación con la generación de diferentes condiciones y su respuesta al variar los puntos de impacto se han seleccionado dos rieles con características particulares. El riel Condición 1 que exhibe visualmente una remoción de perfil a lo largo de la estructura y un indicio de la formación de una huella en el centro del tramo (ver Figura 3-15).



Figura 3-15: Puntos de impacto riel condición 1.

Fuente: propia.



Figura 3-16: Vista detalle huella riel condición 1.

Fuente: propia.

En este escenario, se han definido 5 puntos específicos de impacto donde se mantiene el punto de recepción de la señal del acelerómetro en la mitad de la superficie. Este enfoque permitirá capturar y analizar de manera exhaustiva las respuestas frecuenciales del riel en condiciones de remoción de perfil leve. Este análisis detallado contribuirá a una comprensión más profunda de cómo diferentes condiciones afectan las características dinámicas del riel.

El riel Condición 4, a diferencia del Condición 1, presenta una condición con cambios significativos en su perfil en varios aspectos. Se observan daños en la superficie a lo largo de la estructura, desprendimiento de material que ha dejado una huella pronunciada, y, mediante una inspección visual, se puede determinar que ha pasado por procesos de reperfilado. Para abordar esta condición específica, se han identificado 6 puntos de interés, considerando el tamaño del defecto, con el objetivo de obtener un detalle más exhaustivo del comportamiento del riel justo antes, durante y después de esta condición. Este enfoque permitirá una evaluación más precisa de cómo estos cambios en el perfil afectan las características dinámicas del riel en diferentes momentos del proceso.



Figura 3-17: Puntos de impacto riel condición 4.

Fuente: propia.



Figura 3-18: Vista detalle huella riel condición 4.

Fuente: propia.

Para cada uno de los casos se realiza una transformación por FFT, FRF y escalograma por Wavelet, se grafican y se analizan los resultados.

3.2 Sistema escaneo 3D

Mediante el sistema de escaneo 3D se logra extraer la información con gran precisión del contorno geométrico de la estructura en estudio. En este caso, se realiza un escaneo para los cuatro tipos de rieles con condición de la sección experimental, que permite tener a detalle su variación geometría con respecto al riel en estado óptimo, para ello se utilizó el escáner: EinScan HIX con una precisión de 0.2 mm en promedio para cada caso.



Figura 3-19: Sistema escáner 3D.

Fuente: propia.

Su proceso se realiza inicialmente con la validación de la conexión entre el equipo escáner y el PC. A partir de esto, se procede a instalar los puntos marcadores alrededor de la estructura como se muestra en la primera imagen de la Figura 3-19. Se da inicio al proceso pasando el dispositivo a una distancia de 40 cm aproximadamente, donde internamente

va indicando el paso a paso. Primero realiza un proceso de calibración y luego empieza la modelación en el software. La finalización del proceso se da manual dependiendo del criterio del usuario si es pertinente su finalización y se cumplió el objetivo.

La finalización del proceso se determina manualmente, según el criterio del usuario y si se ha logrado el objetivo deseado. Al concluir el escaneo, se obtiene un enmallado general de la estructura. A partir de este enmallado, se procede a generar un sólido mediante la creación de un volumen basado en el enmallado. Luego, se perfecciona el detalle del modelo eliminando excesos de geometría adicionales que pudieron haberse escaneado durante el proceso.

El objetivo de escanear los rieles es obtener modelos 3D precisos que posteriormente se introducirán en COMSOL para realizar un análisis modal similar al llevado a cabo en los rieles físicos. Este proceso permitirá una comparación más cercana a la realidad del comportamiento frecuencial basada en datos tanto del método experimental como del análisis numérico.

3.3 Sistema control de impacto

Las condiciones de la generación del impacto sobre el riel en el ensayo del martillo son principalmente manuales y dependen de la manipulación del usuario. Como resultado, la magnitud de impacto puede variar, al igual que el punto de impacto, ya sea debido a la ubicación o al ángulo final de impacto. Con el objetivo de garantizar un rango de variación más controlado en cuanto a fuerza y posicionamiento, se ha desarrollado un dispositivo en colaboración con el estudiante de ingeniería mecánica, Sebastián Gómez Durango.

El dispositivo cuenta con un actuador solenoide de marca Abletop con una longitud de carrera de 35 mm y con punta de acero que genera un impacto en la superficie del riel el cual tanto su fuerza como su duración pueden ajustarse en relación con su voltaje y corriente. Su sistema de control está liderado por un Arduino pro mini y su fuente eléctrica se configuró para trabajar a un voltaje de 12v y una corriente de 3A para una fuerza de 4N. Todo el sistema estructurado en tubo cuadrado hueco de 1 ½" en aluminio.



Figura 3-20: Sistema control de impacto.

Fuente: propia.

El impactador se llevó a prueba y se tomaron medidas tanto de las señales del golpe como de la respuesta de riel para ser validadas con el martillo de impacto PCB 086C04.

3.3.1 Modelo estadístico FRF

La caracterización del riel mediante el modelo estadístico se basa en la metodología utilizada en el artículo (M. Oregui, Z.Li, R. Dollevoet. 2014) el cual determina la clasificación del estado del riel mediante el proceso estadístico a través de los valores de la FRF de cada conjunto de datos. Para ello se toman 20 muestras para conformar el conjunto base para el caso sano y 20 datos para cada uno de los casos con variación de su condición.

Este proceso explica que inicialmente se debe comprobar que los datos cumplan con una distribución Gaussiana. Se procede a calcular la media y la varianza del riel en buen estado. Las señales al ser conjuntos de valores vectoriales su media y distribución estándar también se da bajo valores vectoriales. Con base en esto, para obtener el vector de la media del conjunto de datos para el riel sin defectos se calcula según la ecuación:

$$\hat{H}_0(j\omega) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \hat{H}_i(j\omega) \quad (3.1)$$

Y a partir de calcular la media, se procede al cálculo de la varianza, donde se realiza la sumatoria de la diferencia entre las líneas de cada muestra con cada valor del vector de la media:

$$\hat{\sigma}_0^2(\omega) = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (|\hat{H}_i(j\omega)| - |\hat{H}_0(j\omega)|)^2 \quad (3.2)$$

Para realizar la comparación entre el riel sano y uno con defectos se procede a calcular la media de los vectores de las señales del riel con la condición con daño y se realiza la siguiente operación:

$$\delta|\hat{H}_u(j\omega)| = |\hat{H}_0(j\omega)| - |\hat{H}_u(j\omega)| \sim N(0, 2\sigma_0^2(\omega)) \quad (3.3)$$

Donde,

$|\hat{H}_u(j\omega)|$ es el valor absoluto de la media del estado bajo análisis.

$|\hat{H}_0(j\omega)|$ es el valor absoluto de la media de la estructura sana.

Con base en la obtención de los valores de diferencia de medias del riel sano y el bajo análisis y con la varianza del riel sano se procede a calcular el valor Z el cual define la clasificación de estado del riel bajo la siguiente expresión:

$$Z(\omega) = \frac{|\delta|\hat{H}_u(j\omega)||}{\sqrt{2\hat{\sigma}_0^2(\omega)}} (\forall \omega) \quad (3.4)$$

Donde,

$$Z(\omega) \leq Z_{1-\frac{\alpha}{2}} (\forall \omega) \quad (3.5)$$

Finalmente, con este valor Z se determina si la estructura bajo análisis es sana sino sale de este margen y si sobresa es una estructura que presenta daño. Este proceso se realiza para la validación de las señales procesadas en el método experimental tanto del cambio de estado como de variación de distancia entre fijaciones. Donde la línea base para el cambio de distancias es 63 cm y para las condiciones es el riel en estado sano.

3.4 Automatización del proceso

En búsqueda de implementar dentro de la metodología general un proceso que permita el aumento de la eficiencia en la detección de patrones de las señales y una ejecución automática en la caracterización del riel se introducen modelos profundos de aprendizaje. Para obtener dichos patrones característicos se realiza un método de transformación de las señales en imágenes por medio de la Transformada Continua de Wavelet cuyo resultado es plasmado en escalogramas. Cada escalograma muestra la distribución

energética característica de cada condición mediante escalas de colores. Esta obtención de imágenes por Wavelet se realiza tanto para la señal bruta como para el resultado de los datos en FRF con el objetivo de visualizar si ambas metodologías alcanzan valores deseados en la probabilidad de detección. Se realiza una selección de las redes con base en los parámetros a procesar y con la cantidad de datos que se cuenta para la clasificación y posteriormente se mide el desempeño del entrenamiento de las redes mediante métricas de evaluación.

Este proceso en comparación con otros permite la caracterización de estado del riel a partir de una información de entrenamiento previo y por consiguiente en el caso del análisis modal de solo la respuesta a un impacto para su clasificación.

3.4.1 Selección redes profundas

En el proceso de clasificación de condición del riel se establecen clases etiquetadas para cada uno de los conjuntos de datos a analizar. En el caso de la clasificación con base en el comportamiento frecuencial a la variación de las distancias se etiquetan 5 clases (63 cm, 67 cm, 70 cm, 72 cm y 75 cm). Lo mismo se realiza para la clasificación por condición donde existen cuatro tramos de condiciones distintas al estado sano para un total de 5. Al contar con etiquetas antes del entrenamiento de las redes se procede a seleccionar un modelo de red de aprendizaje supervisado.

Al ser imágenes los datos que se van a ingresar a los modelos de aprendizaje se selecciona un tipo de red neuronal profunda convolucional (CNN). Adicionalmente al ser un conjunto de datos pequeño de 45 datos se utiliza la técnica de aprendizaje de transferencia o *Transfer Learning* que permite que bajo entrenamientos previos de las redes profundas bajo bases de datos robustas cuente con previas características que complementan el reentrenamiento con el nuevo conjunto de datos haciéndolo más eficiente y con mayor probabilidad de detección.

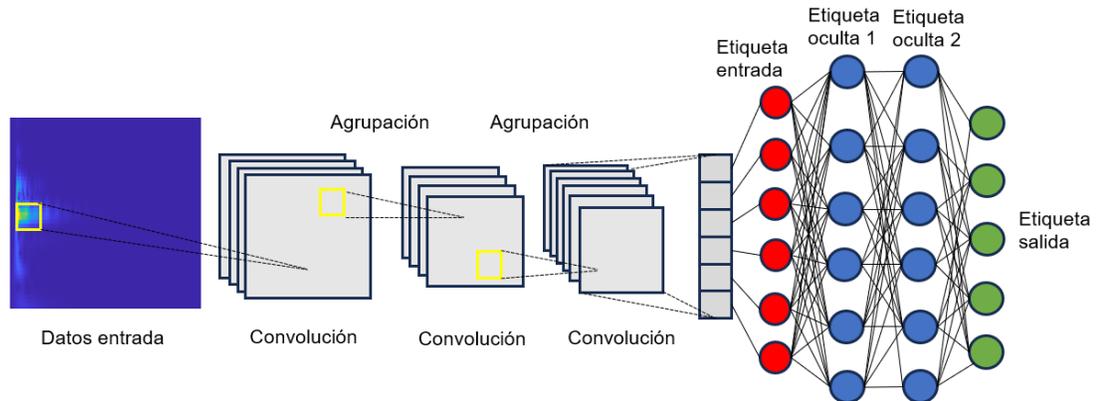


Figura 3-21: Esquema general red convolucional profunda (CNN).

Fuente: propia

Este tipo de red realiza un preprocesamiento de las imágenes antes de ingresarlas a las capas de etiquetado. Se realiza un proceso de convolución logra encontrar patrones dentro de la imagen y darles un valor específico para formar una matriz, de esta matriz se van seleccionando los valores más altos y se disminuye el tamaño de la matriz inicial por medio del agrupamiento hasta que estos valores forman el vector de etiqueta de entrada.

Para seleccionar redes convolucionales pre-entrenadas se debe verificar con respecto a ImageNet. Siendo una base de datos que contiene millones de imágenes etiquetadas con amplios rangos de objetos y características haciendo una plataforma viable para la transferencia de características a nuevos entrenamientos.

Se realizó la selección de 5 redes profundas (SqueezeNet, ShuffleNet, GoogleNet, ResNet-50, EfficientNet-b0) que cumplen con los requerimientos determinados.

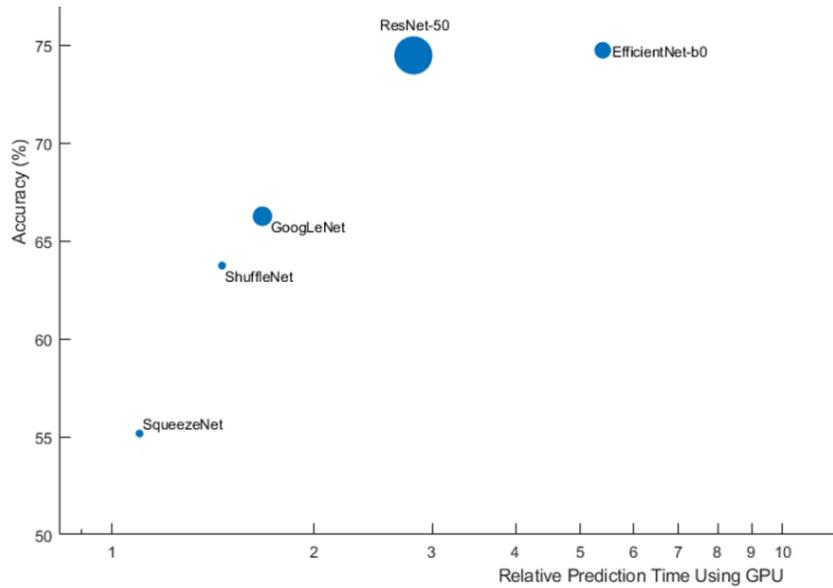


Figura 3-22: Esquema relación exactitud – gasto computacional redes profundas.

Fuente: Deep Neural Network - Matlab Documentation

Su selección adicionalmente se dio bajo el criterio de la relación de la eficiencia con respecto al gasto computacional (Figura 3-22), su grado de profundidad de capas y con respecto a que el tamaño de imágenes de entrada fuera el mismo o con una variación mínima lo cual se observa en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4: Características redes profundas (Fuente: Deep Neural Network – Matlab Documentation).

Red neuronal	Profundidad	Tamaño de entrada de imagen
SqueezeNet	18	227x227
GoogLeNet	22	224 x224
ResNet-50	50	224 x224
ShuffleNet	50	224 x224
EfficientNetb0	82	224 x224

3.4.2 Transformación de señales en imágenes

Por medio de la CWT se realiza la transformación de las señales tanto de la temporal en aceleración como el resultado de la FRF para cada toma en el software Matlab con la herramienta *Wavelets* del *Toolbox*. Posterior a su transformación se realiza un proceso de normalización para cada conjunto de imágenes. Dependiendo de la red se hace un escalado y recorte de imagen del tamaño original a 224x224 o 227x227 pixeles según corresponda para obtener una imagen limpia y de las dimensiones requeridas como se muestra en la Figura 3-17. Este recorte se realiza en el dominio del tiempo de 0 a 200 ms donde se observa el total de duración de la vibración del riel bajo el impacto.

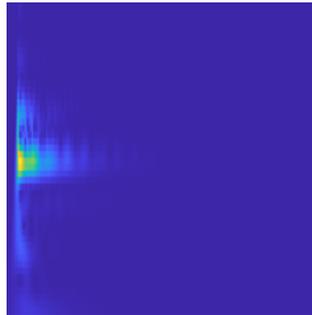


Figura 3-23: Escalograma recortado y escalado a 224x224.

Fuente: propia

Estas imágenes son organizadas en clases según corresponda. Para el caso de clasificación por variación de distancia entre fijaciones serían cinco clases (63, 67, 70, 72 y 75 cm). Para la clasificación por cambio de condiciones físicas son cinco clases igualmente (riel sano, condición 1, condición 2, condición 3 y condición 4).

Para el entrenamiento del modelo se separa de la totalidad de las imágenes en: 80% para entrenamiento y 20% para validación seleccionadas aleatoriamente. Esta segregación se hace directamente dentro del código y posteriormente se usa para la evaluación del desempeño de cada una de las redes trabajadas.

3.5 Evaluación desempeño

3.5.1 Evaluación identificación frecuencias

El propósito de realizar tres metodologías de abordaje para obtener las frecuencias naturales del riel y su variación con respecto a su ensamblaje o generación de condiciones específicas es observar la relación y la validación de su tendencia de cambio tanto en sentido como en valor. En otras palabras, la validación del comportamiento frecuencial si su valora tiende a disminuir o aumentar en la misma proporción.

Para ello, se realiza un proceso de promediar el conjunto de señales para cada clase tanto en variación distancias como en generación de condiciones, se tabulan y se grafican los resultados. Cabe resaltar que la amplitud puede llegar a ser un valor muy variable debido a que este valor depende primordialmente del accionamiento manual del martillo.

3.5.2 Evaluación clasificación por redes

La evaluación del desempeño de las redes profundas se realiza por las métricas indicadas en el numeral 1.4.1 (Exactitud, matriz de confusión y curva ROC). En el cual se calculan valores porcentuales de funcionamiento de la red con base a parámetros como la cantidad de datos utilizados, el funcionamiento del *transfer learning*, la correlación de resultados entre las redes por las métricas y la validación por medio de datos que no hicieron parte del entrenamiento.

La determinación de los valores aceptados para evaluar si una red neuronal está cumpliendo con su funcionamiento se basa en los criterios establecidos para alcanzar los objetivos para los cuales fue entrenado el modelo. En este contexto, dado que se trata de un proceso experimental y se dispone de una cantidad limitada de datos, lo ideal sería un porcentaje de precisión con tendencia a la existencia de errores. Esto permitiendo abrir el camino a procesos adicionales de mejora tanto del modelo como de la caracterización del riel. Este enfoque más riguroso facilitaría la identificación de áreas de oportunidad y la optimización continua del desempeño de la red neuronal en relación con los resultados deseados.

3.5.3 Evaluación prueba estadística Z

El criterio de evaluación del funcionamiento de la prueba estadística Z en la determinación del estado del riel se basa principalmente en dos tipos de resultados, define si el riel está dentro de los parámetros de considerarse sano o no lo está. Si no lo está, debe iniciarse un proceso más riguroso de identificación del tipo de condición que lo está sacando del margen de estado optimo, para este proceso investigativo lo esencial es identificar si se encuentra en la línea base o no.

4. Análisis de resultados

4.1 Método teórico de cálculo frecuencia natural de viga empotrada

4.1.1 Cálculo frecuencia variación distancias fijaciones

Para el cálculo de las frecuencias por fijaciones para cada una de las distancias se utiliza la ecuación (3.1). Con base en las distancias estipuladas para el análisis y las propiedades del riel UIC-54 se tabulan los valores obtenidos:

Tabla 4-1: Cálculo frecuencia por fijaciones. (Fuente propia).

Distancia fijaciones [m]	Frecuencia calculada (pin-pin) [Hz]
0,63	1.195
0,67	1.056
0,70	968
0,72	915
0,75	843

Los resultados indican una disminución del valor de la frecuencia al aumentar la distancia entre las fijaciones, donde, para un rango de 0,63 m hasta 0,75 m la variación de la frecuencia natural del riel varía en un aproximado de 350 Hz un 30%.

4.1.2 Cálculo frecuencia por reperfilado

Para el cálculo de del comportamiento frecuencial con respecto al desgaste en vía se simuló una remoción de perfil uniforme de la superficie de la cabeza del riel, donde la profundidad se estipula desde riel sano hasta 12 mm, cada 3 mm. Se determina la variación de la masa por longitud y el nuevo momento de inercia para cada uno de los casos y se tabulan los resultados:

Tabla 4-2: Cálculo frecuencias remoción perfil (Fuente propia).

Distancia fijaciones [m]	Cálculo [Hz]	Cálculo reperfilado 3 mm [Hz]	Cálculo reperfilado 6 mm [Hz]	Cálculo reperfilado 9 mm [Hz]	Cálculo teórico reperfilado 12 mm [Hz]
0,63	1195	1180	1166	1153	1141

En teoría según el cálculo de la frecuencia por fijaciones, cuando se realiza una remoción de material y se calcula nuevamente la frecuencia con base en la variación del momento de inercia y el cambio de área trasversal su valor disminuye según el aumento de la profundidad del reperfilado.

Cada intervalo de 3 mm presenta variaciones en la frecuencia de 12 a 15 Hz. Además, al comparar un perfil de riel nuevo con otro que ha pasado por múltiples procesamientos, se observa una variación significativa de 54 Hz en el pico de frecuencia, incluso en condiciones que los operadores del Metro consideran "correctas" como llevar al riel hasta 12 mm de profundidad. Esto indica una disminución de alrededor del 5% con respecto al valor esperado de la frecuencia entre pines. Esta reducción en la frecuencia puede dar lugar a la generación de resonancia del riel, especialmente a velocidades más bajas.

Es importante destacar que estas variaciones pueden tener un impacto significativo en la integridad y el rendimiento del sistema ferroviario, por lo que se recomienda realizar un

análisis detallado y considerar medidas correctivas para asegurar un funcionamiento óptimo y seguro del sistema.

4.2 Método numérico

Mediante el método numérico se establece una validación del comportamiento frecuencial para cada una de las condiciones, en el cual la simulación se corre bajo los parámetros mencionados anteriormente.

4.2.1 Simulación variación distancias fijaciones

Se corre la simulación del análisis modal con la configuración de las distancias entre fijaciones con un impacto en la superficie del riel de 1 N. Los valores obtenidos son como se muestran en el siguiente gráfico:

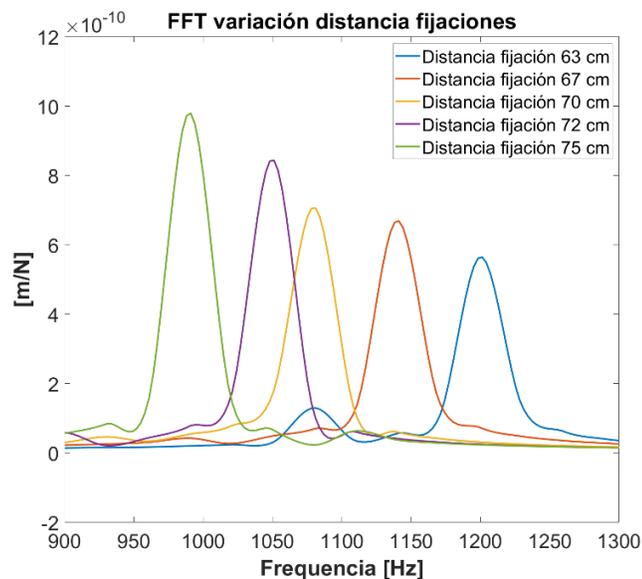


Figura 4-1: Resultados FFT variación distancias fijaciones

Fuente: propia

Se observa que se valida lo que se obtuvo en el método teórico cuando la distancia entre las fijaciones aumenta la frecuencia natural disminuye, en este caso se estipula una variación aproximada del 18% entre la máxima y la mínima distancia entre fijaciones.

Tabla 4-3: Cálculo frecuencias MEF variación distancias. (Fuente propia).

Distancia fijaciones [m]	Frecuencia calculada (pin-pin) [Hz]
0,63	1200
0,67	1141
0,70	1080
0,72	1050
0,75	990

4.2.2 Simulación reperfilado

La remoción de material se realiza con base en el proceso de la parte teórica con el mismo perfil del riel, se modifican los modelos 3D, se corre la simulación y se grafican los resultados.

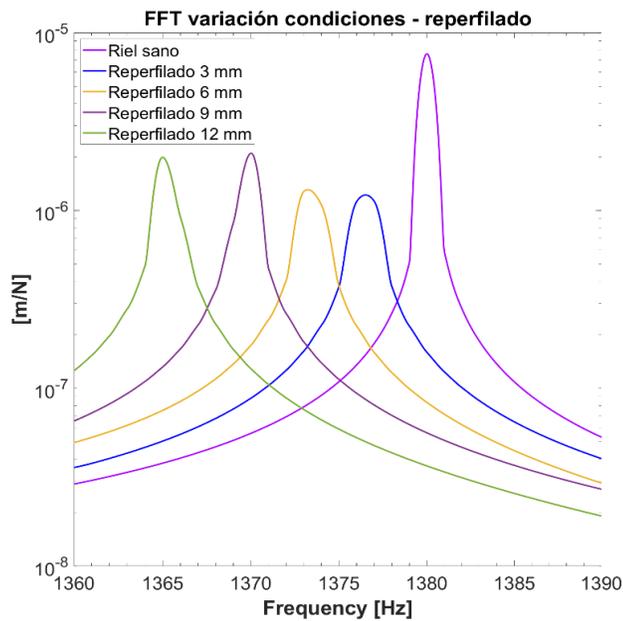


Figura 4-2: Resultados FFT simulación remoción reperfilado.

Fuente: propia

El gráfico refleja una tendencia de disminución del valor de las frecuencias naturales del riel a medida que se aumenta la profundidad del reperfilado en la estructura. Este resultado valida lo obtenido en el cálculo teórico en el obtenido en el numeral 4.1.2.

Tabla 4-4: Cálculo frecuencias MEF reperfilado. (Fuente propia).

Distancia fijaciones [m]	Frecuencia sano [Hz]	Frecuencia reperfilado 3 mm [Hz]	Frecuencia reperfilado 6 mm [Hz]	Frecuencia reperfilado 9 mm [Hz]	Frecuencia reperfilado 12 mm [Hz]
0,63	1380	1376	1373	1370	1364

En el caso teórico la variación de las frecuencias entre riel sano y el valor máximo de reperfilado es de 54 Hz un porcentaje de 5%. En el método numérico la variación es de 16 Hz un 1%. Es importante resaltar que el cambio en el valor entre la frecuencia de riel sano entre métodos se debe a que la longitud del riel en la simulación es de 83 cm ya que cubre no solo la distancia entre durmientes sino la distancia total de apoyo del riel en durmientes de ancho de 20 cm y en la parte teórica se simplifica más a la fijación en durmientes de manera puntual.

4.2.3 Simulación variación condición

Cuando el riel se desgasta en vía por la interacción rueda riel y el cambio de cargas que soporta no solo se genera remoción de perfil de riel uniforme a lo largo de la vía, también se generan otras condiciones puntuales como se han mencionado anteriormente, para ello se realizaron este tipo de condiciones según el numeral 3.4. Se corren las simulaciones y se graficaron los resultados:

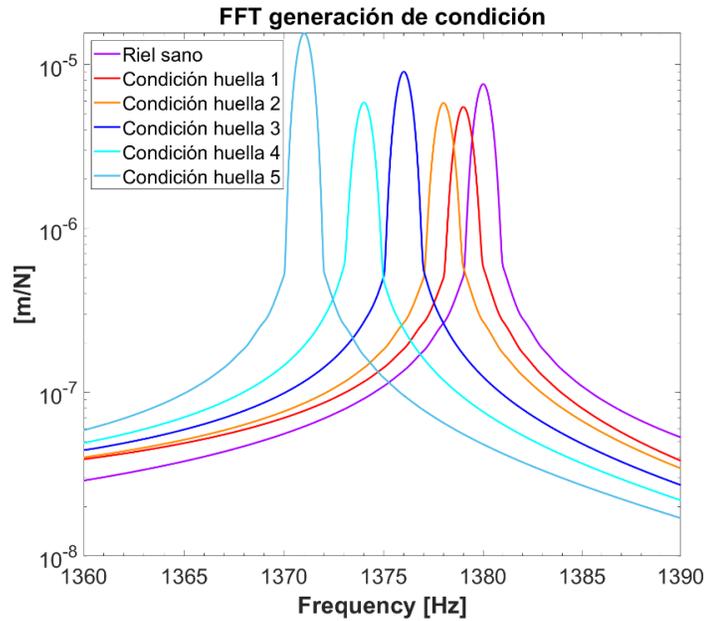


Figura 4-3: Resultados FFT simulación condiciones.

Fuente: propia

Se observa un comportamiento muy similar a la remoción uniforme de perfil del riel donde entre más volumen de material se remueve más la frecuencia natural tiende a disminuir.

Tabla 4-5: Cálculo frecuencias MEF huellas. (Fuente propia).

Distancia fijaciones [m]	Frecuencia sano [Hz]	Frecuencia condición huella 1 [Hz]	Frecuencia condición huella 2 [Hz]	Frecuencia condición huella 3 [Hz]	Frecuencia condición huella 4 [Hz]	Frecuencia condición huella 5 [Hz]
0,63	1380	1379	1378	1376	1374	1370

En este caso, la variación entre la frecuencia de riel sano y la condición con mayor volumen de huella logra ser de 10 Hz. Un valor bastante bajo que en términos prácticos que podría llegar a ser casi imperceptible. Lo importante a resaltar es que este método permite observar que si existe un cambio frecuencial por la remoción puntual de material por defectos con características similares a los llamados *Squats*.

4.2.4 Simulación tramos escaneados condiciones

Los tramos de riel con defectos generados en vía y cortados para su análisis en laboratorio se llevaron a la modelación 3D mediante el sistema de escaneo explicado en el numeral 3.2. Las secciones transversales superpuestas son como se muestran en la Figura 4-4.

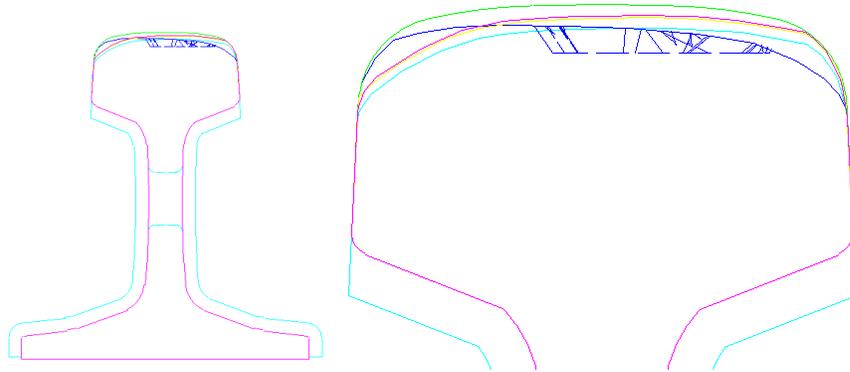


Figura 4-4: Perfiles superpuestos tramos rieles condiciones.

Fuente: Propia

Se realiza el mismo proceso de extracción de las frecuencias por análisis modal aplicado para los modelos realizados en 3D. Se extraen las frecuencias y se grafican los resultados en un rango de 1320 Hz hasta 1400 Hz como se muestra en la Figura 4-6. En ella se puede observar que existen cambios principalmente de la sección transversal, en los cuales la condición 4 cuenta con un defecto puntal y la condición 3 tiene agujeros y uniones de soldadura, estos detalles se pueden comprobar en la Figura 3-17.

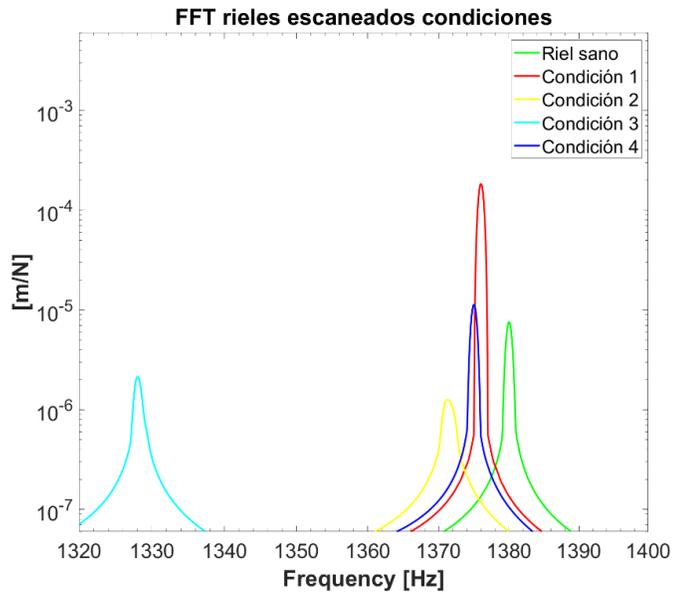


Figura 4-5: Resultados FFT simulación condiciones tramos escañados.

Fuente: propia

La Figura 4-5 ilustra una clara tendencia a la disminución del valor de la frecuencia a medida que nos alejamos del riel en su estado óptimo, siendo cada condición específica representada con su propio valor característico. Las condiciones 1, 2 y 4 exhiben una proximidad notable al valor del riel en su estado sano. Sin embargo, la condición 3 muestra un cambio significativo en la frecuencia, registrando una disminución de 52 Hz.

Tabla 4-6: Cálculo frecuencias MEF condiciones vía. (Fuente propia).

Distancia fijaciones [m]	Frecuencia sano [Hz]	Frecuencia condición 1 [Hz]	Frecuencia condición 4 [Hz]	Frecuencia condición 2 [Hz]	Frecuencia condición 3 [Hz]
0,63	1380	1376	1375	1371	1328

Esto confirma nuevamente la relación entre la disminución de la frecuencia y la presencia de defectos o la alteración del perfil. El riel en la condición 3 experimenta el cambio más pronunciado, atribuible a diversas modificaciones, como la remoción de perfil, la presencia de agujeros y la unión por soldadura.

4.3 Método experimental

4.3.1 Frecuencias variación distancias fijaciones

Mediante el montaje de laboratorio, se establece el rango de distancias entre fijaciones, variando desde 63 cm hasta 75 cm en un riel de longitud total de 160 cm. En este escenario, la frecuencia de respuesta no se ajusta exactamente a la de una viga fijada en dos puntos, ya que presenta una variación debido a la presencia de dos tramos del riel en voladizo. En el contexto de esta investigación, se ha examinado la variación de la frecuencia natural en función de la configuración de las distancias de las fijaciones. A fin de realizar un análisis más detallado sobre los comportamientos vibracionales, se sugiere explorar combinaciones de configuraciones estructurales en futuros trabajos.

En análisis se llevó a cabo mediante el ensayo de martillo de impacto para medir la frecuencia de respuesta del riel. Los resultados de las señales superpuestas se observan en la Figura 4-6 para un rango de 0 a 3000 Hz. Se logran observar distribuciones frecuenciales a lo largo de este rango de frecuencias con mayor presencia cercano a la frecuencia pin-pin en 1500 Hz y un armónico cercano a los 3000 Hz.

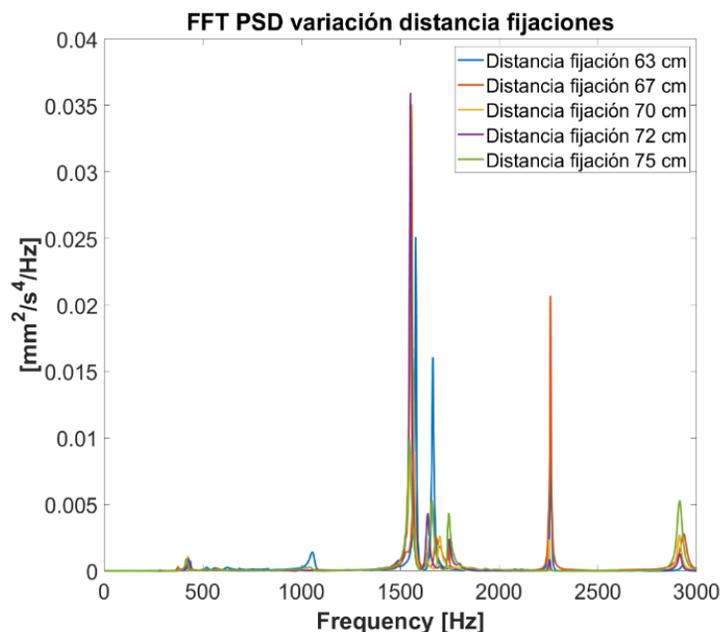


Figura 4-6: FFT PSD variación distancia fijaciones 0-3000 Hz.

Fuente: Propia

Haciendo énfasis en el comportamiento vibracional del riel a partir de la frecuencia entre fijaciones cercana a los 1500 Hz se realiza un gráfico en detalle entre el rango de 1510 y 1600 Hz que se observa en la Figura 4-7.

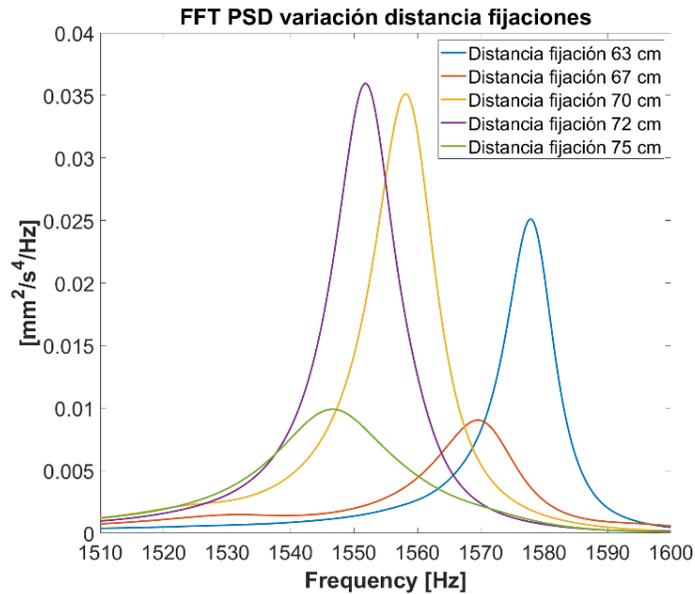


Figura 4-7: FFT PSD variación distancia fijaciones 1510-1600 Hz.

Fuente: propia

Recordando la ecuación 3-1, la variación de la frecuencia debe tender a cambiar inversamente proporcional al aumento de la distancia entre durmientes manteniendo el resto de los parámetros sin alguna modificación (indicando el estado sano del riel).

Tabla 4-7: Frecuencias experimentales variación distancias. (Fuente propia).

Distancia fijaciones [m]	Frecuencia calculada (pin-pin) [Hz]
0,63	1578
0,67	1569
0,70	1558
0,72	1549
0,75	1546

Esto se logra reflejar en el resultado del método experimental donde la frecuencia en 63 cm inicia en 1578 Hz y disminuye a 1546 Hz a la distancia entre fijaciones de 75 cm. Una variación de 29 Hz en total y un valor porcentual del 2%.

4.3.2 Frecuencias variación condición punto impacto fijo

Se realiza el proceso de toma de señales tanto para el riel sano como el conjunto de rieles bajo condiciones específicas, se promedia y se grafican sus resultados. En la Figura 4.8 se observan las señales resultantes superpuestas de los cinco casos bajo análisis.

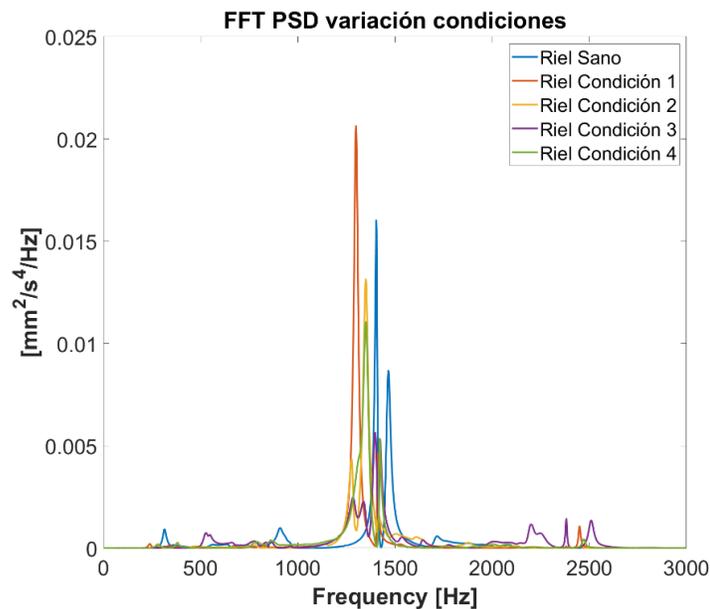


Figura 4-8: FFT PSD condiciones tramos 0-3000 Hz.

Fuente: Propia

Se observa una concentración de valores cercanos a la frecuencia por fijaciones entre un rango de 1200 y 1500 y otro para los armónicos cercanos a 2500 Hz. Se realiza una vista en detalle del comportamiento en la frecuencia por fijaciones y se grafica como se muestra en la Figura 4-9.

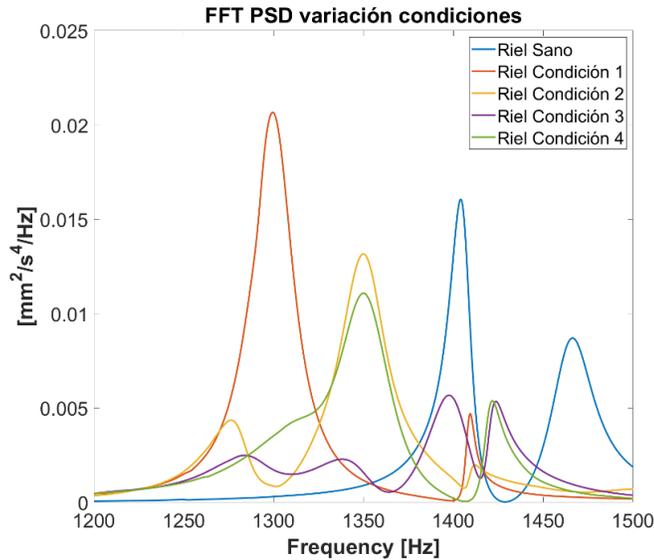


Figura 4-9: FFT PSD condiciones tramos 1200-1500 Hz.

Fuente: Propia

Tabla 4-8: Frecuencias experimentales variación condición punto impacto fijo. (Fuente propia).

Distancia fijaciones [m]	Frecuencia sano [Hz]	Frecuencia condición 3 [Hz]	Frecuencia condición 2 [Hz]	Frecuencia condición 4 [Hz]	Frecuencia condición 1 [Hz]
0,63	1400	1398	1350	1349	1300

En este contexto, se aprecia una variación en la distribución de los valores de frecuencia en comparación con los resultados obtenidos mediante el método numérico.

Es crucial resaltar esta discrepancia entre los dos métodos debido a la simplificación de las condiciones de frontera y de la estructura del riel en el método numérico. Adicionalmente, es importante tener presente que, para los objetivos de esta tesis, el enfoque principal ha sido la categorización visual de defectos y la evaluación de los cambios en la frecuencia. No obstante, es posible que internamente existan otros tipos de defectos que requieran enfoques más precisos, como tintas penetrantes, ultrasonido, entre otros, para su detección.

En términos generales, persiste la relación de disminución de los valores frecuenciales con respecto a la presencia de defectos. El valor mínimo se observa en la condición 1, con un cambio de 71 Hz respecto al riel sano, representando una variación del 5%. Aunque este porcentaje pueda parecer relativamente pequeño, resulta significativo en la caracterización y clasificación del riel.

4.3.3 Frecuencias variación condición punto impacto variable

Los resultados anteriores se llevaron a cabo para analizar el comportamiento frecuencial en función de la variación de condiciones, manteniendo constante el punto de impacto. Ahora, se procede a realizar una comparación del cambio frecuencial al variar el punto de impacto en función del riel sano y comprar resultados con respecto a dos distintas condiciones una definida a criterio como la más cercana al estado óptimo y otra con características que supondrían mayor cambio frecuencial (condición 1 y condición 4 respectivamente).

- **Riel sano:**

Para el riel sano se definen cinco puntos de impacto distribuidos al largo de la superficie del riel entre las distancias de fijaciones donde se busca analizar principalmente la frecuencia pin-pin. El resultado de las señales en el rango de 0-3000 Hz se grafica en la Figura 4-11.

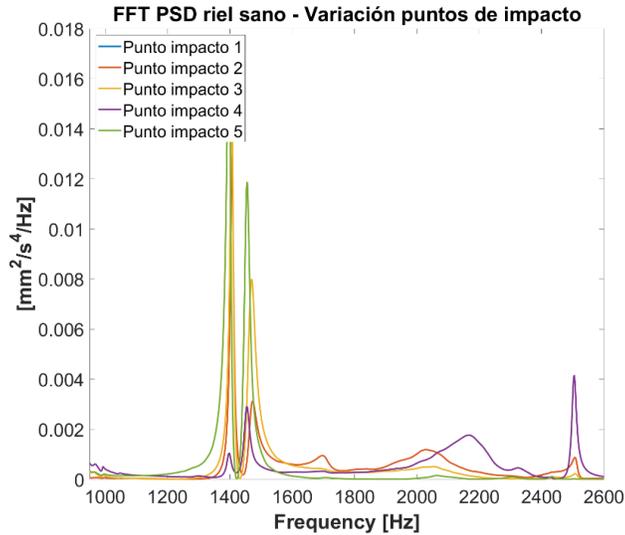


Figura 4-10: FFT PSD riel sano diferentes puntos de impacto 1000-2600 Hz.

Fuente: propia

Para el enfoque de la frecuencia por fijaciones se observa un conjunto de señales agrupadas cercanas a los 1400 Hz. Se define un rango de 1300 a 1550 Hz para ver en detalle su comportamiento, esto se puede observar en la Figura 4-11.

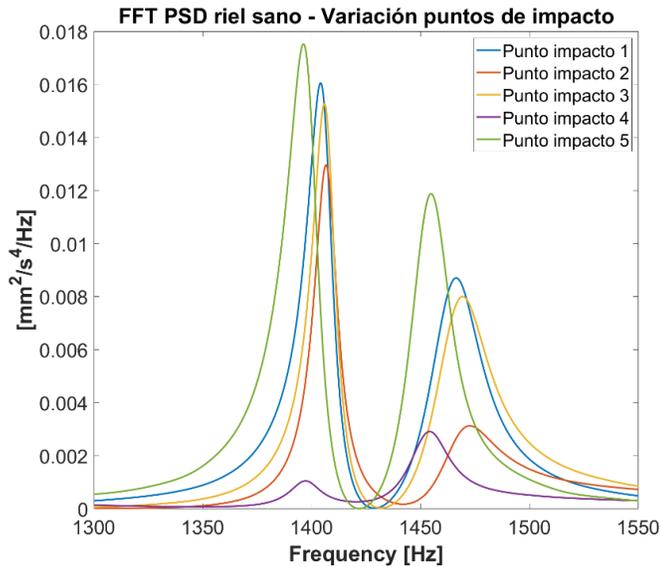


Figura 4-11: FFT PSD riel sano diferentes puntos de impacto 1300-1550 Hz.

Fuente: propia

En ella se logra interpretar un patrón de comportamiento frecuencial que varía en sus valores de frecuencia y amplitud con respecto al punto de impacto.

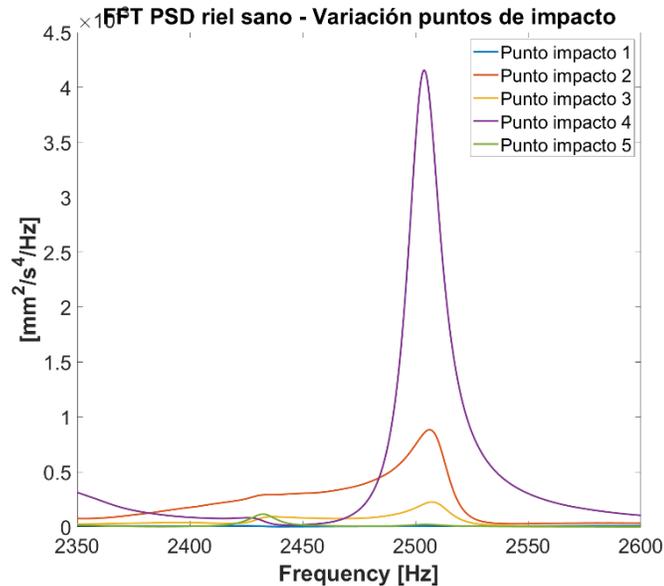


Figura 4-12: FFT PSD condición 1 diferentes puntos de impacto 800-2500 Hz.

Fuente: propia

Lo mismo se hace para observar en el rango del armónico ubicado entre 2350 y 2600 Hz en la Figura 4-13. En donde, la frecuencia tiende a concentrarse más en el mismo punto, pero con distinta amplitud a valores cercanos a los 2500 Hz.

Cabe destacar que la condición 1, evaluada mediante inspección visual, presenta la menor generación de defectos, mientras que la condición 4 exhibe la mayor cantidad. Los puntos de impacto se especificaron en la Figura 3-15 para la condición 1 y en la Figura 3-17 para la condición 4. Para comparar estos resultados con el riel en estado óptimo, se ha generado un gráfico con los datos superpuestos, considerando el mismo punto de impacto.

- **Riel condición 1:**



Figura 4-13: Riel condición 1, puntos de impacto y vista detalle punto 3.

Fuente: propia

Se realiza el proceso de impacto en los cinco puntos estipulados en el riel condición 1 en donde el acelerómetro se ubica en el punto medio (punto 3) cercano a donde se visualiza una huella superficial.

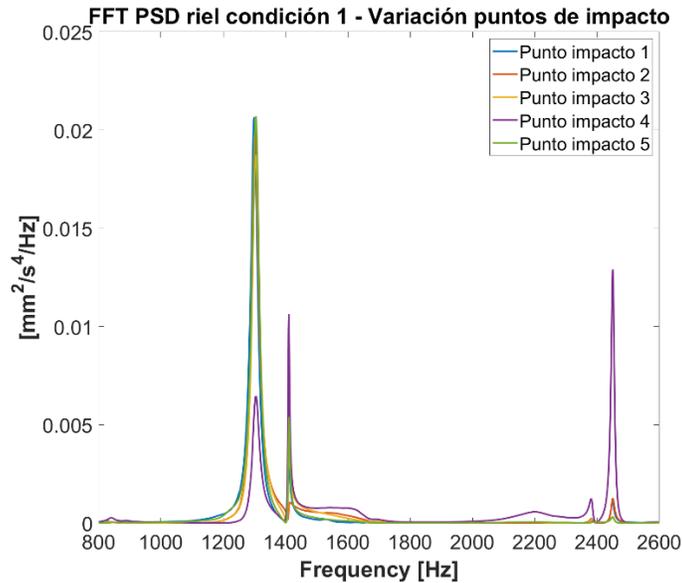


Figura 4-14: FFT PSD condición 1 diferentes puntos de impacto 800-2600 Hz.

Fuente: propia

En la Figura 4-14 se grafican los resultados en un rango de 800 a 2600 Hz que son los dos agrupamientos de señales que se resaltan en los resultados. El primero relacionado con la frecuencia por fijaciones y el segundo en relación con su armónico. Para este caso se realiza una vista en detalle para cada conjunto de agrupaciones de frecuencias graficado en la Figura 4-15.

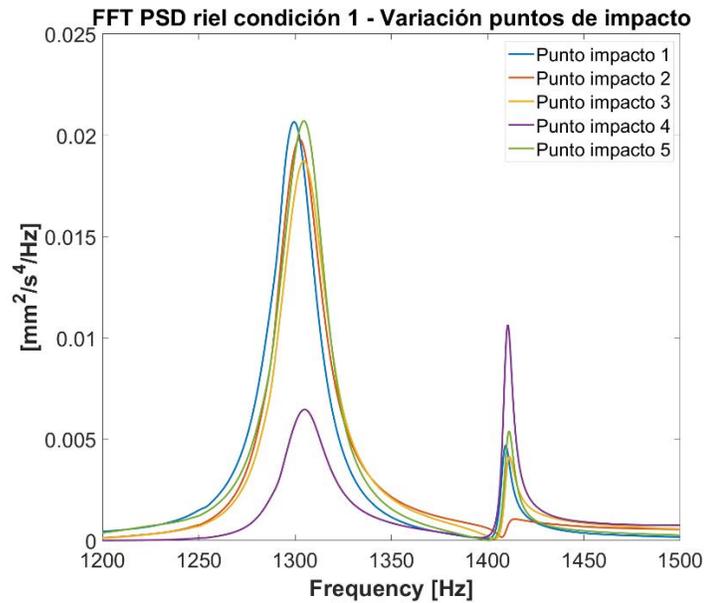


Figura 4-15: FFT PSD condición 1 diferentes puntos de impacto 1200-1500 Hz.

Fuente: propia

En el intervalo de frecuencias entre 1200 y 1500 Hz en la Figura 4-15, se aprecia una tendencia de comportamiento similar entre los diversos puntos de impacto, con variaciones mínimas en los valores de frecuencia cercanos a los 1300 Hz y un cambio destacado principalmente en la amplitud en el punto de impacto 4. Este fenómeno se atribuye a que la magnitud del impacto no es uniforme y a la redistribución de la energía entre el punto de impacto y la recepción de la respuesta.

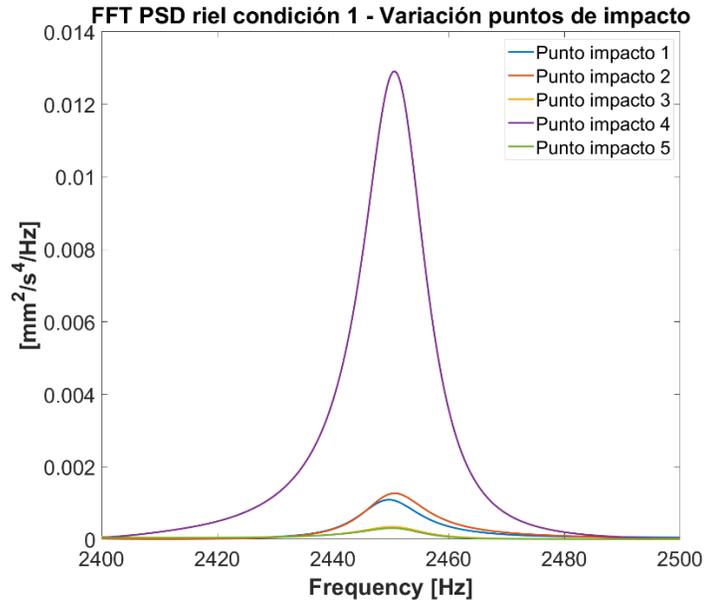


Figura 4-16: FFT PSD condición 1 diferentes puntos de impacto 2400-2500 Hz.

Fuente: propia

En el análisis del siguiente armónico de la frecuencia se repite el comportamiento de la tendencia a un valor, en este caso cercano a los 2450 Hz y un cambio en las amplitudes principalmente en el punto 4.

- **Riel condición 4:**



Figura 4-17: Riel condición 1, puntos de impacto y vista detalle punto 3.

Fuente: propia

Se repite el proceso para el riel condición 4 con los puntos de impacto definidos y se grafican en la Figura 4-18. El rango que frecuencias se define entre 800 y 2650 Hz en donde se encuentra el conjunto de señales cercanos a la frecuencia por fijaciones y el otro grupo a su armónico.

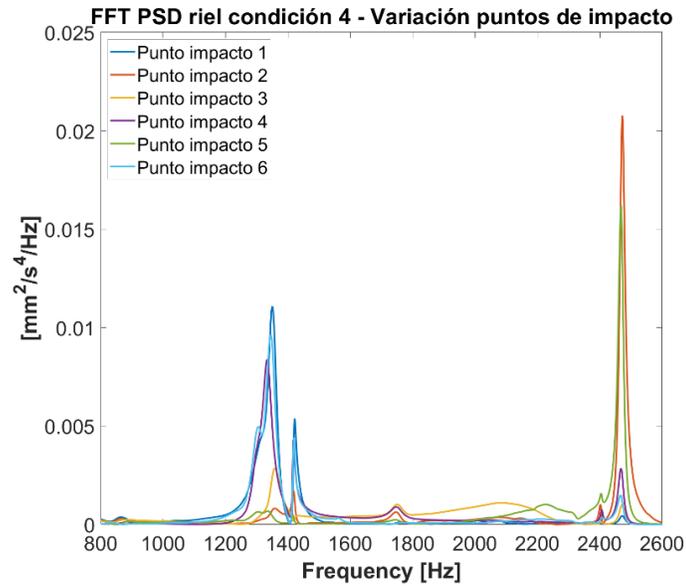


Figura 4-18: FFT PSD condición 4 diferentes puntos de impacto.

Fuente: propia

Para ver en detalle se realiza dos vistas en los rangos frecuenciales que abarcan cada conjunto de datos. El primero de 1200 a 1500 Hz en la Figura 4-19. En el rango de frecuencias entre 1200 y 1500 Hz, se aprecia que trata de existir un patrón de frecuencias similar a lo ocurrido con el riel sano y con el de condición 1 pero existen algunas frecuencias que tienden a variar este patrón más sobre todo en los puntos 2 y 5, antes y después del defecto.

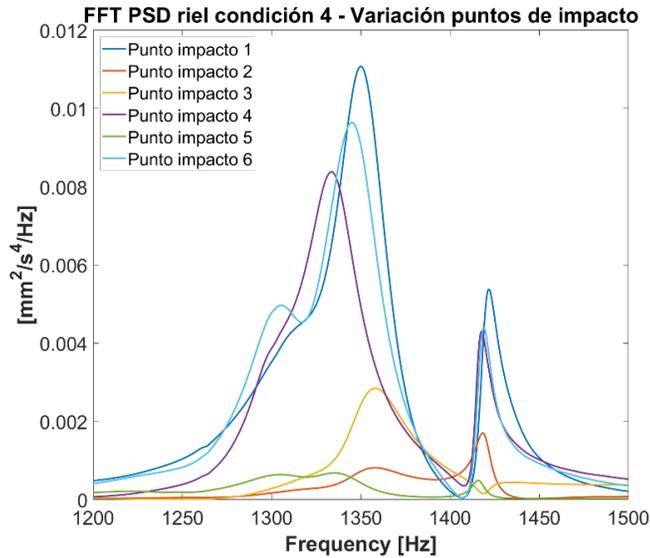


Figura 4-19: FFT PSD condición 4 diferentes puntos de impacto 1200-1500 Hz.

Fuente: propia

En el armónico dentro del rango de 2300 a 2600 Hz en la Figura 4-20, se observa un cambio en la amplitud y una sutil variación en el valor de la frecuencia, pero no es tan relevante ni notable como lo reflejado en el rango de frecuencias por fijaciones entre 1200 y 1500 Hz.

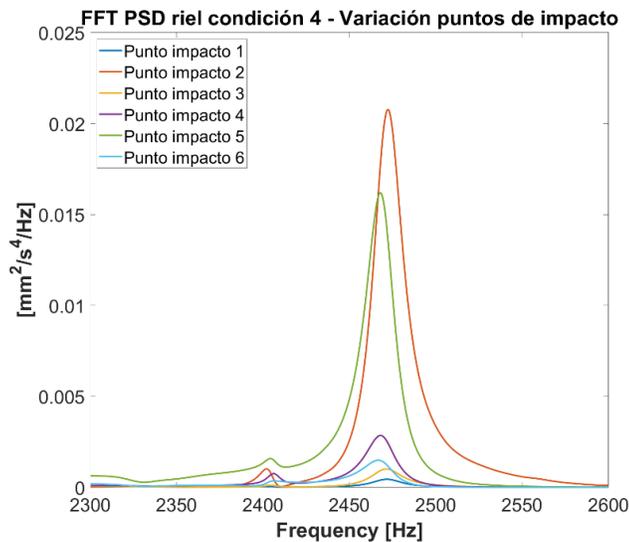


Figura 4-20: FFT PSD condición 4 diferentes puntos de impacto 2300-2600 Hz.

Fuente: propia

- **Comparación riel sano, condición 1 y 4 punto de impacto medio**

Se realiza una comparación del comportamiento frecuencial de los tramos de riel analizados, variando el punto de impacto. En este caso, se observa el resultado en el punto de impacto medio, donde se registra el mayor desplazamiento y está más cercano a los defectos en las condiciones 1 y 4. Los resultados se grafican en la Figura 4-21, abarcando un rango de 1250 a 1500 Hz.

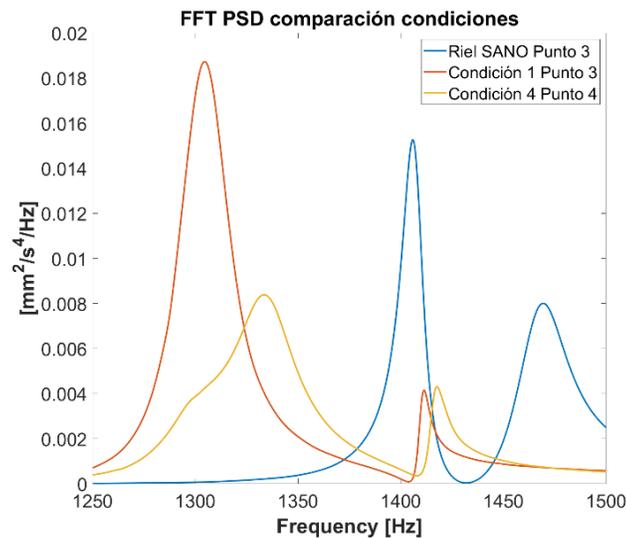


Figura 4-21: FFT PSD riel sano, condición 1 y 4 puntos de impacto sobre defectos.

Fuente: propia

Se aprecia una tendencia de curva frecuencial similar en los tres casos, indicando claramente que, en las condiciones 1 y 4, esta curva se desplaza hacia valores de frecuencia menores. Evidentemente, el valor de la frecuencia en la condición 4 es mayor que en la condición 1. Este patrón podría sugerir que, a pesar de que el defecto sea más visible en la condición 4, la condición 1 experimenta una mayor remoción en la relación de momento de inercia y masa, lo que se reflejaría en su valor inferior de frecuencia. Con este gráfico, se valida que el riel en estado óptimo refleja el mayor valor de frecuencia, y que la existencia de condiciones distintas disminuye el valor y el rango frecuencial, a pesar de tener similitudes en la curva inicial.

4.3.4 Dispositivo de impacto

A partir del diseño del dispositivo de impacto, se llevaron a cabo ensayos para determinar su comportamiento, y se comparó su desempeño con el obtenido mediante el martillo instrumentado en el mismo proceso.

- **Riel 160 cm distancia fijaciones 67 cm**

En el primer caso de validación, se realizó el ensayo en el riel de 160 cm con una distancia entre fijaciones de 67 cm. Se recolectó el mismo número de muestras que con el martillo manual y en el mismo punto de impacto un total de 45 tomas. Posteriormente, los resultados fueron transformados y graficados, como se ilustra en la Figura 4-22, abarcando un rango de frecuencias de 1000 a 3000 Hz.

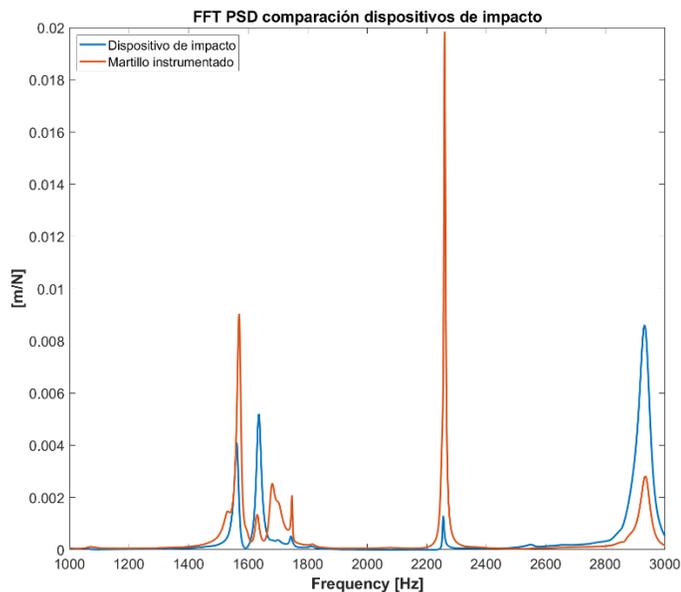


Figura 4-22: FFT PSD martillo y dispositivo de impacto distancia 67 cm.

Fuente: Propia

Al examinar de cerca los datos, se evidencian ciertos valores de frecuencia similares entre el martillo manual y el dispositivo de impacto, si bien con amplitudes divergentes. Sin embargo, también se identifican frecuencias adicionales que no se destacan de manera

significativa en el martillo manual, a diferencia del dispositivo de impacto. Estas observaciones se detallan más exhaustivamente en la Figura 4-23.

Cabe resaltar que el dispositivo de impacto exhibe una amplitud superior en las frecuencias altas, atribuible a la elevada dureza del material en su punta, en contraposición al martillo manual, cuya punta posee una dureza intermedia y tiende a mostrar una mayor amplitud en las frecuencias medias o bajas.

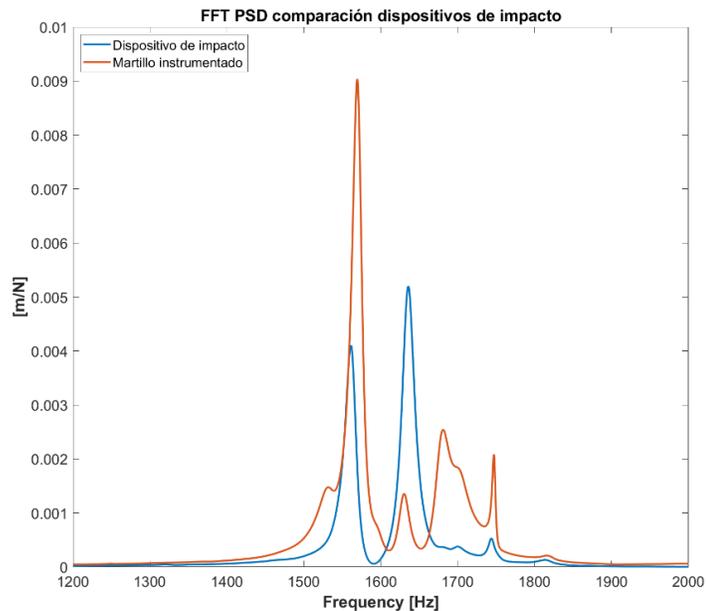


Figura 4-23: FFT PSD martillo y dispositivo de impacto distancia 67 cm.

Fuente: propia

- **Riel 83 cm sano distancia fijaciones 63 cm**

Se realizó el mismo proceso para el caso de tramo de riel de 83 cm y distancia entre fijaciones de 63 cm. El cual se realizó el mismo gráfico de la FFT PSD para el rango de 0 a 3000 Hz como se observa en la Figura 4-24.

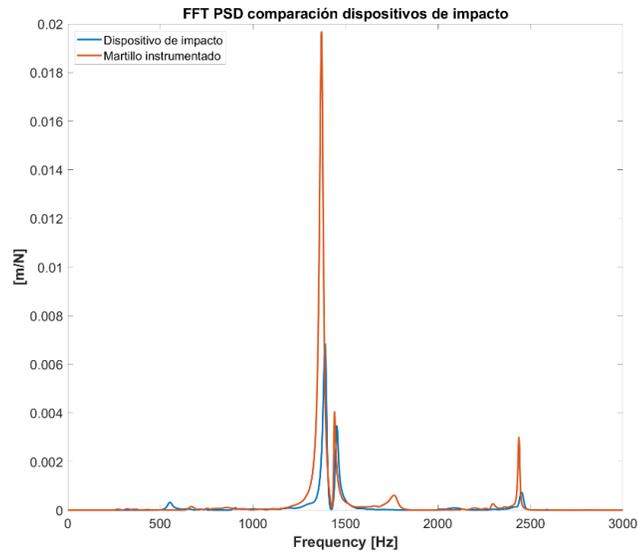


Figura 4-24: FFT PSD martillo y dispositivo de impacto riel sano 63 cm.

Fuente: propia

En el cual se presenta un fenómeno similar, valores de frecuencias cercanos, distintas amplitudes, pero en ciertos rasgos una tendencia próxima. Esto se puede observar mas en detalle en la Figura 4-25.

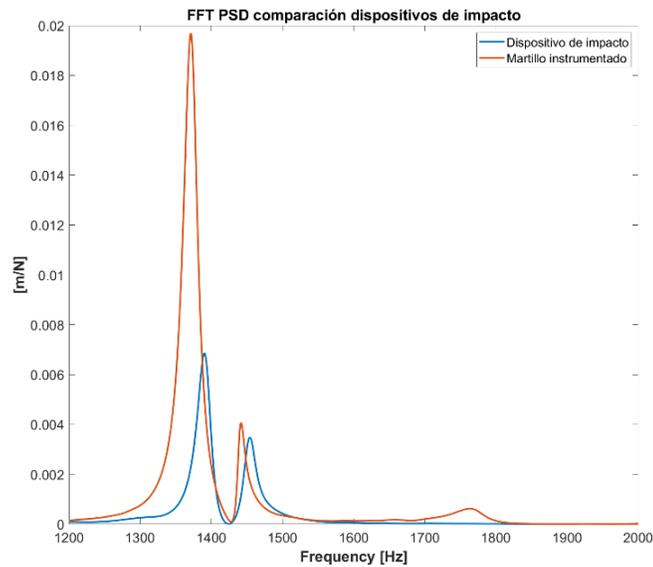


Figura 4-25: FFT PSD martillo y dispositivo de impacto riel sano 63 cm.

Fuente: propia

La tendencia del comportamiento frecuencial muestra similitudes entre el dispositivo de impacto y el martillo instrumentado. No obstante, sus amplitudes varían notablemente y serían importante trabajar en su homogenización y mayor control sobre los rangos frecuenciales.

Adicionalmente, en la ejecución del impacto, la distancia entre el recorrido del accionador y el punto de impacto en el riel no está totalmente regulada, y la fuerza de impacto puede ocasionar marcas e incluso grietas. Estas observaciones sugieren la posibilidad de contribuir a un proceso de mejora del dispositivo en algunas áreas específicas, pero en rasgos generales este avance en el dispositivo abre un camino claro de permitir garantizar la eliminación de errores generados por el impacto manual.

Algunas áreas específicas que podrían abordarse en el proceso de mejora incluyen:

A. Control de posición:

Mejorar el sistema de acoplamiento dispositivo-estructura para garantizar un impacto homogéneo tanto en ubicación como en fuerza.

B. Mejoramiento de la punta:

Generar un rango de puntas adecuadas que se acoplen a un rango de estudio frecuencial más amplio y que no originen algún daño en la estructura por el contacto acero con acero.

C. Homogeneidad en las fuerzas de impacto:

Realizar un análisis detallado de las variaciones en los valores de fuerza generados por el dispositivo, ya que estas variaciones pueden afectar las amplitudes y la cobertura frecuencial dependiendo de las propiedades de la estructura bajo estudio.

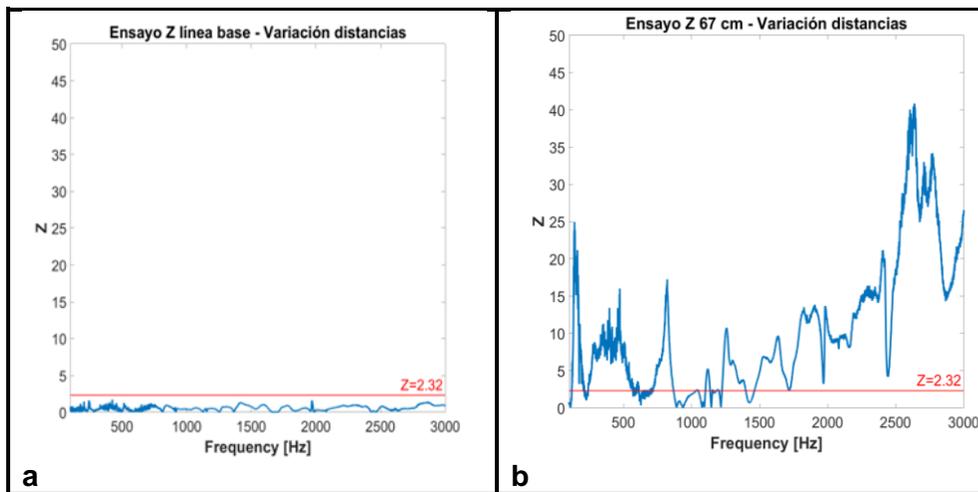
Es fundamental abordar estos aspectos adicionales para garantizar que el dispositivo pueda ser una alternativa efectiva en la búsqueda de una aplicación más precisa y confiable en el análisis modal.

4.3.5 Método estadístico de clasificación

El método Z se emplea para determinar el estado del riel en relación con una línea base, como se detalló en el numeral 3.4.2. Se establece el valor de Z en 2,32 como límite para clasificación. Cualquier tendencia que supere este límite se considera que no cumple con el comportamiento FRF dentro de los parámetros iniciales. El proceso se realiza para determinar cambios de condiciones, variaciones de distancias entre fijaciones, frecuencias dentro del mismo riel sano variando puntos de impacto y comportamiento con base a un riel sano con respecto a otras condiciones cambiando el punto de impacto a la mitad del riel.

- **Clasificación variación distancias:**

Para la variación de distancias, la línea base FRF de 63 cm entre fijaciones se compara consigo misma, cada grupo de datos con una cantidad de 30 tomas (60 tomas en total). En la Figura 4-26a, se observa que ambos conjuntos de señales no sobrepasan el límite y forman parte de la línea base.



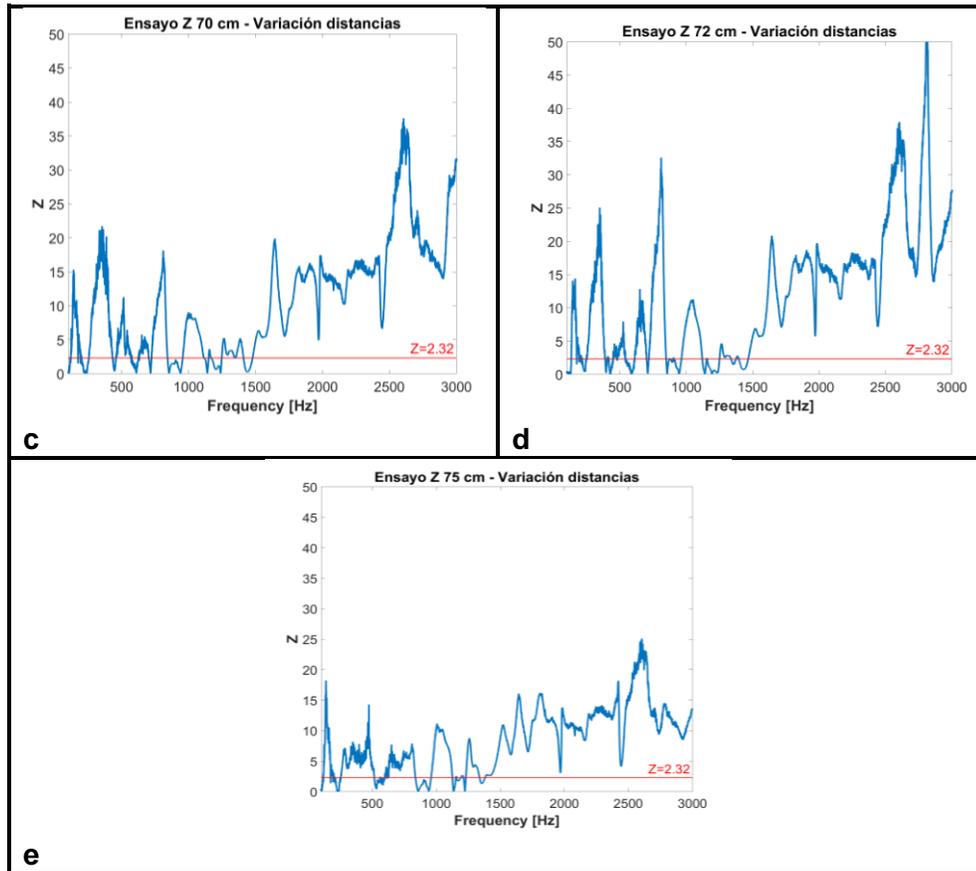


Figura 4-26: Ensayo Z variación distancias con respecto a 63 cm. Donde a) Línea base 63 cm, b) Distancia 67 cm, c) Distancia 70 cm, d) Distancia 72 cm y e) Distancia 75 cm.

Fuente: propia

En los casos siguientes (67, 70, 72 y 75 cm) de la Figura 4-26, se sigue el mismo proceso, y se observa que superan el límite del valor Z en múltiples valores de frecuencia. Al tratarse de una determinación de solo dos resultados (comportamiento FRF como línea base o no), se confirma que efectivamente el resto de las distancias no exhibe un comportamiento estadístico FRF relacionado con la distancia de 63 cm.

- **Clasificación variación condiciones**

Se realiza el mismo procedimiento que con la variación de distancias en donde la línea base son dos conjuntos de 30 datos de la línea base que se comparan consigo para validar que el funcionamiento de la comparación entre datos no sobrepase el límite Z en la línea base.

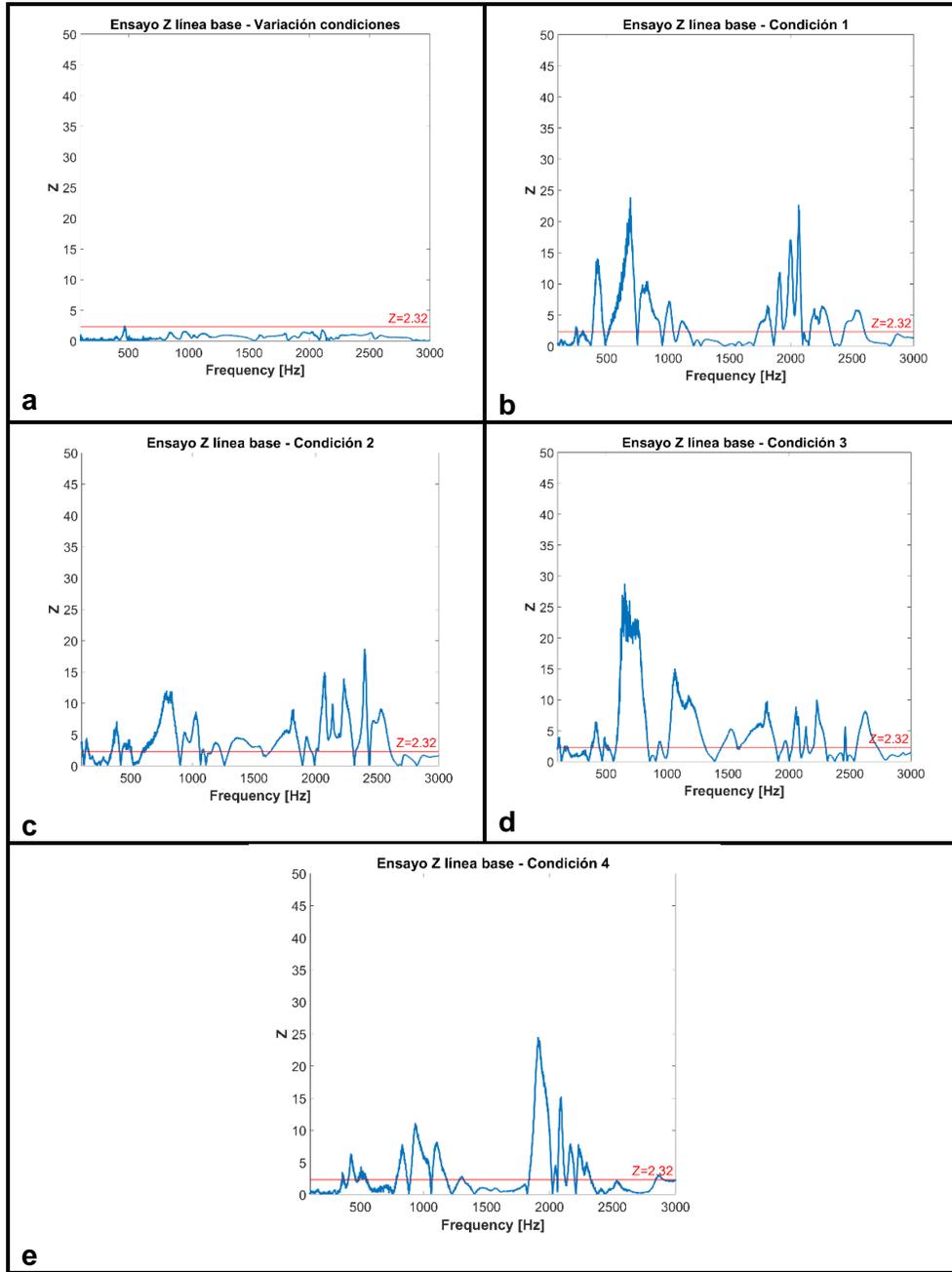


Figura 4-27: Ensayo Z variación condiciones con respecto a tramo 63 cm sano. Donde a) Línea base riel sano, b) Condición 1, c) Condición 2, d) Condición 3 y e) Condición 4.

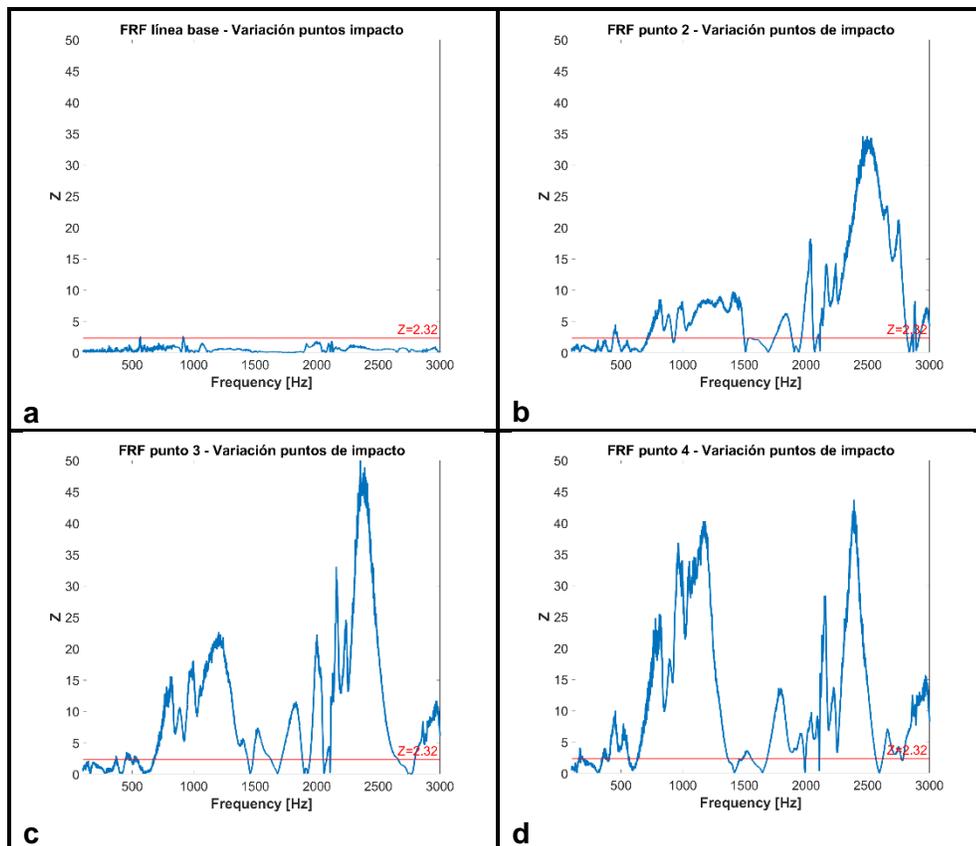
Fuente: propia

En los tramos restantes bajo análisis, se confirma la presencia de un cambio en la condición, ya sea debido a la remoción del perfil o al desprendimiento de material. Este

cambio se manifiesta al superar el valor Z, indicando que el comportamiento observado no se ajusta a la tendencia frecuencial FRF asociada a un riel en buen estado.

- **Riel sano variación puntos de impacto**

Para observar el cambio del comportamiento frecuencial FRF dentro de la misma estructura, se tomó el riel sano y se tomaron las señales para los cinco puntos estipulados en el numeral 3.1.2. Estos resultados se muestran en la Figura 4-28 en donde el punto 1 es la condición base para realizar el proceso de clasificación.



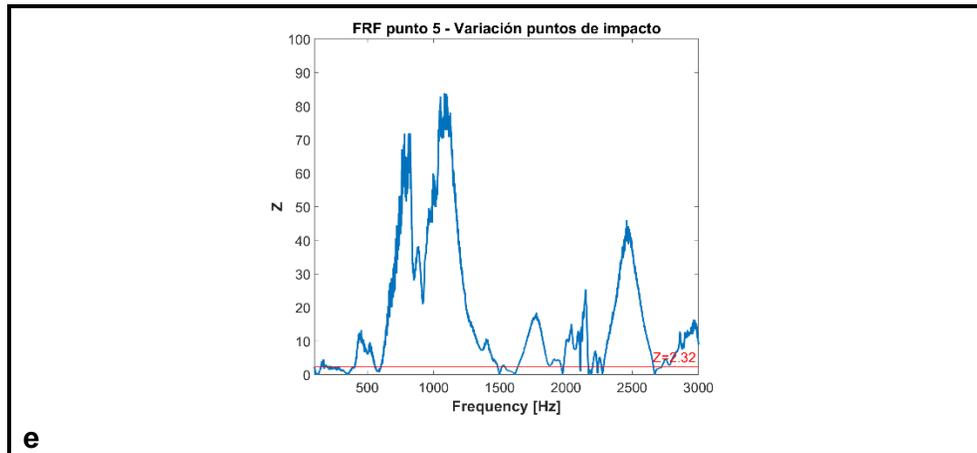


Figura 4-28: Ensayo Z variación puntos impacto condición 1. Donde a) Línea base riel punto 1, b) Punto 2, c) Punto 3, d) Punto 4 y e) Punto 5.

Fuente: propia

El comportamiento frecuencial FRF en todos los puntos difiere de el impacto en el punto 1, recordando que los puntos 1 y 5 son los cercanos al durmiente se asumiría que deberían comportarse de manera similar, pero refleja lo contrario. Recordando que la relación de FRF depende de la respuesta del riel y de la manipulación de impacto por el usuario se hace una tarea compleja el garantizar que los parámetros sean siempre constantes y que lo único que refleje su respuesta sea la vibración de la estructura. Por lo tanto, se observa que es importante para mejorar este proceso que se garantice la magnitud del impacto y su posicionamiento con una solución de la forma del impactador mencionado en el numeral 4.3.4 y que cuente con algún tipo de sensor para capturar la fuerza de impacto.

4.3.6 Transformación señales en imágenes

Se lleva a cabo el proceso de transformación de las señales en imágenes mediante la transformada Wavelet continua (CWT). Este método proporciona resultados que, en los dominios de tiempo y frecuencia, reflejan la concentración de energía a diferentes escalas durante la aplicación del impacto en la estructura. Este proceso busca caracterizar comportamiento frecuencial bajo variación de distancias, cambio de condiciones y variación de puntos de impacto dentro de la misma estructura.

Para garantizar una comparación consistente entre casos, se procede con la normalización y el recorte de las imágenes, lo que permite obtener patrones de visualización estandarizados. Estos patrones son esenciales para la tabulación de los resultados, facilitando así el análisis y la interpretación de las características identificadas en el riel bajo las condiciones definidas en la metodología.

El intervalo temporal de estas imágenes se ajusta desde aproximadamente 100 ms hasta 200 ms. Esta elección se fundamenta en la variabilidad en el inicio de la respuesta del riel, y el objetivo es establecer un punto de partida estandarizado para un análisis coherente de las señales.

En cuanto al rango de frecuencias del escalograma, se amplía hasta 8000 Hz, en lugar de limitarse a 3000 Hz. Este ajuste se realiza con la finalidad de obtener imágenes cuadradas para garantizar un escalado adecuado al integrarlas en las redes. Es importante destacar que, debido a las configuraciones de los dispositivos, no se alcanza el rango completo de frecuencias, y como resultado, áreas en color azul indican la ausencia de concentración de energía en esas regiones.

- **Variación distancias fijaciones:**

Se lleva a cabo el proceso de normalización de las imágenes obtenidas mediante la transformada Wavelet continua (CWT) para cada clase de longitud de riel (63, 67, 70, 72 y 75 cm). Se avanza a procesar y graficar de manera progresiva estas imágenes mostradas en la figura 4.29, proporcionando una representación visual del análisis llevado a cabo en relación con las distintas clases de longitud de riel.

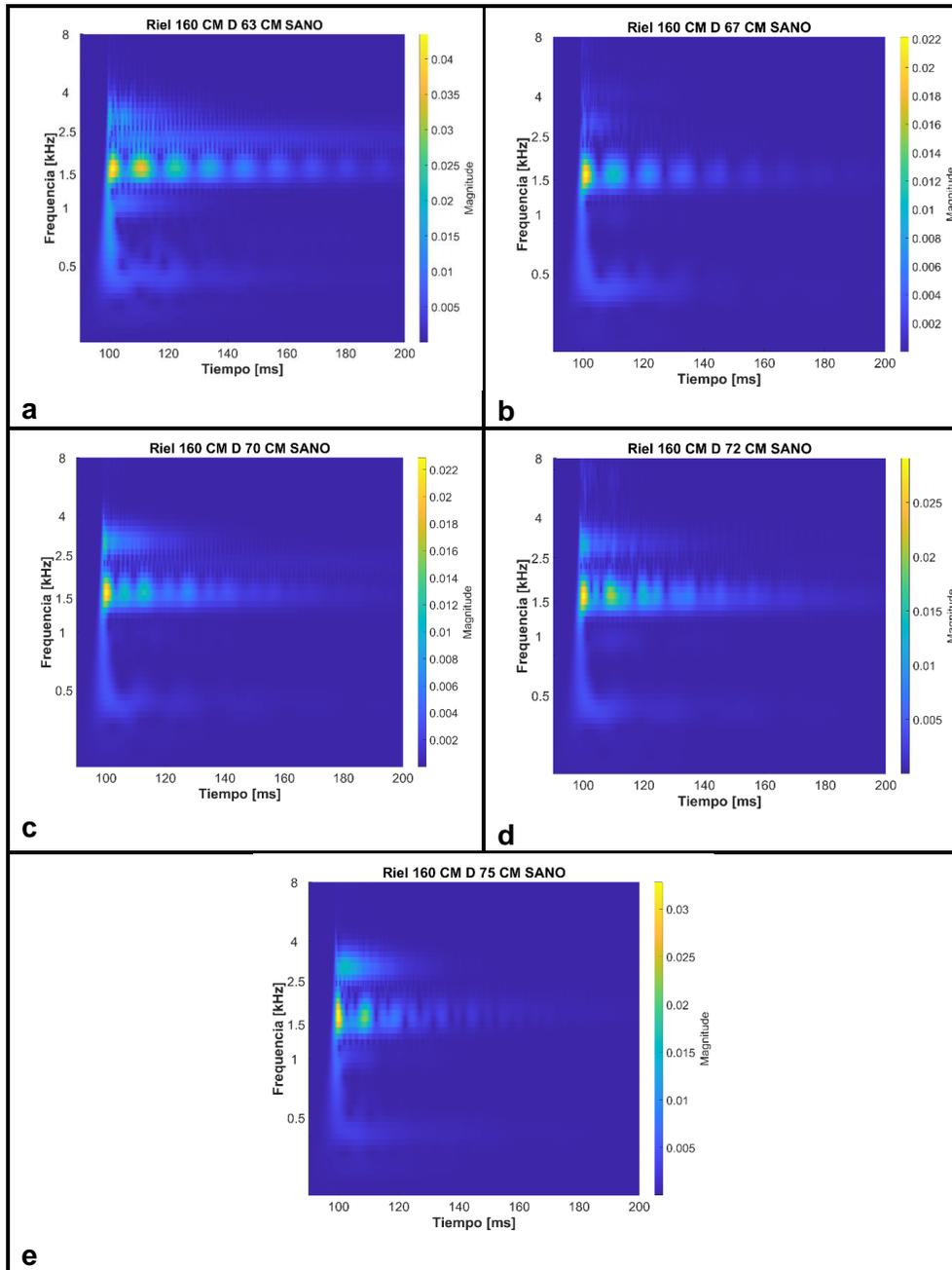


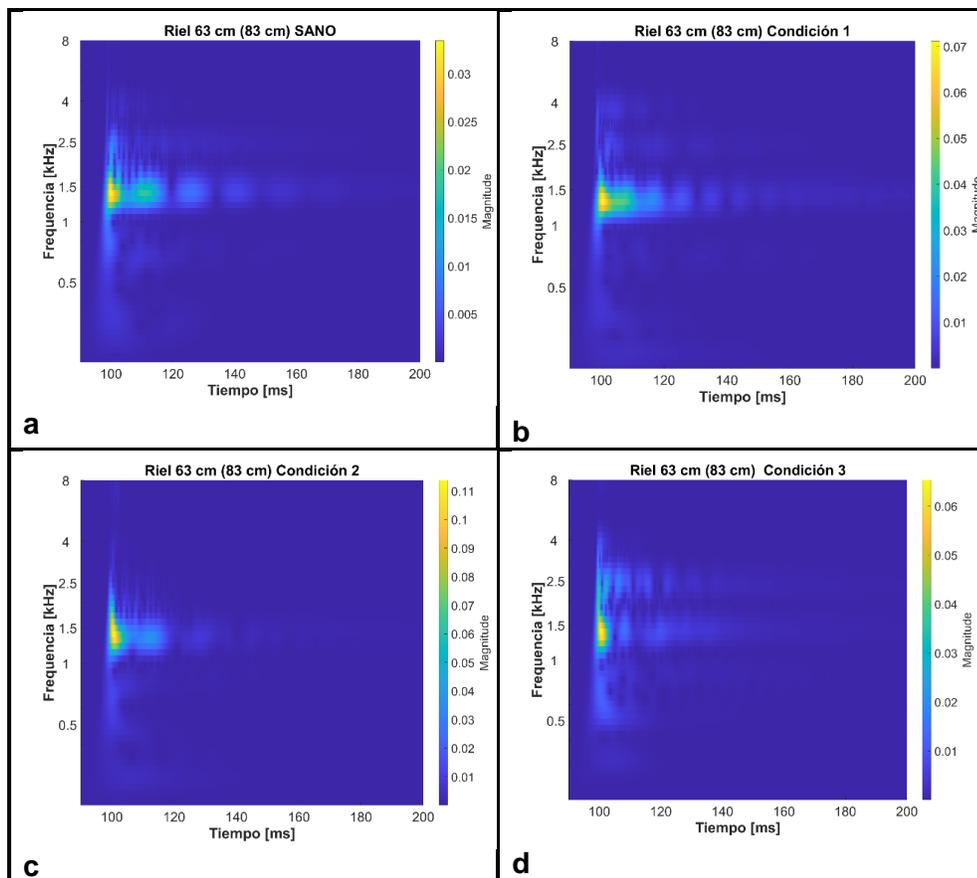
Figura 4-29: Proceso comportamiento frecuencial variación distancias entre fijaciones escalogramas. Donde a) Distancia 63 cm, b) Distancia 67 cm, c) Distancia 70 cm, d) Distancia 72 y e) Distancia 75 cm.

Fuente: propia

Es evidente que el comportamiento frecuencial del riel experimenta cambios con las variaciones en las distancias entre fijaciones. En todos los casos, se observa una tendencia hacia una concentración alrededor de los 1500 Hz, sin embargo, la distribución tanto en términos de tiempo como de frecuencia muestra variaciones. A medida que se incrementa la distancia entre fijaciones, se nota una disipación más rápida de la energía en un intervalo de tiempo menor, con una disminución en la cantidad de concentración.

- **Variación condiciones:**

Este mismo proceso se realiza para la clasificación de estado del riel en comparación de su estado óptimo y evaluación con base al cambio de condición, y los resultados son como se muestran a continuación:



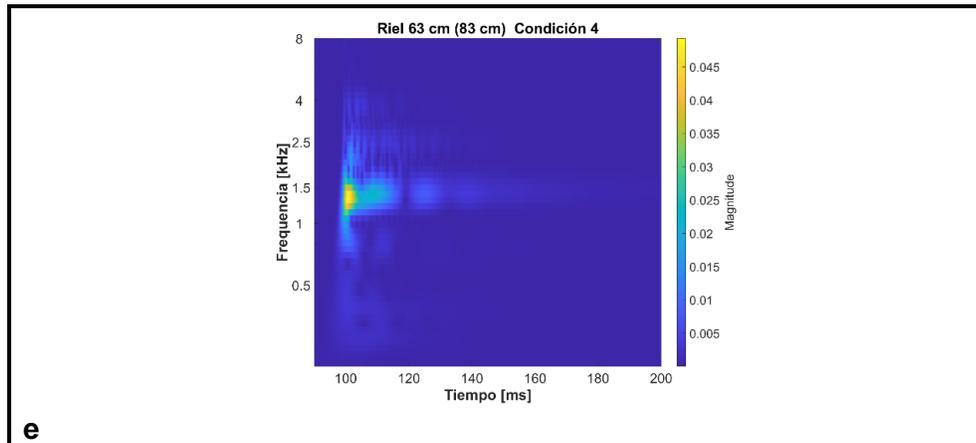


Figura 4-30: Proceso comportamiento frecuencial variación condiciones escalogramas. Donde a) Riel sano, b) Condición 1, c) Condición 2, d) Condición 3 y e) Condición 4.

Fuente: propia

El comportamiento y la concentración frecuencial de cada muestra tienden a ubicarse principalmente alrededor de los 1400 Hz, mostrando, en términos generales, la mayor concentración a esta escala. A diferencia de los cambios en la distancia entre fijaciones, las diferencias en el patrón de comportamiento entre las clases no son tan evidentes, pero aun así se generan modificaciones detalladas que difieren del comportamiento de un riel en buen estado.

El tramo de condición 3 exhibe el cambio más significativo, y esto está directamente relacionado con su estado, ya que presenta una mayor cantidad de modificaciones estructurales. Estas modificaciones incluyen desgaste superficial, agujeros de unión en el alma del riel y uniones por soldadura.

En los dos experimentos anteriores, se examinaron los resultados del comportamiento frecuencial en el tiempo al aplicar un impacto aproximado en el mismo punto (sobre los durmientes). Sin embargo, también es crucial analizar cómo varía el comportamiento cuando se golpea a lo largo del tramo. Por lo tanto, se llevó a cabo este experimento para el riel sano, condición 1 y condición 4

- **Variación puntos de impacto riel sano:**

Se realiza el proceso de capturar las señales en el punto medio de los impactos distribuidos en la superficie del riel sano. Son cinco puntos equidistantes. Se transforman las señales y se organizan en la figura 4-31.

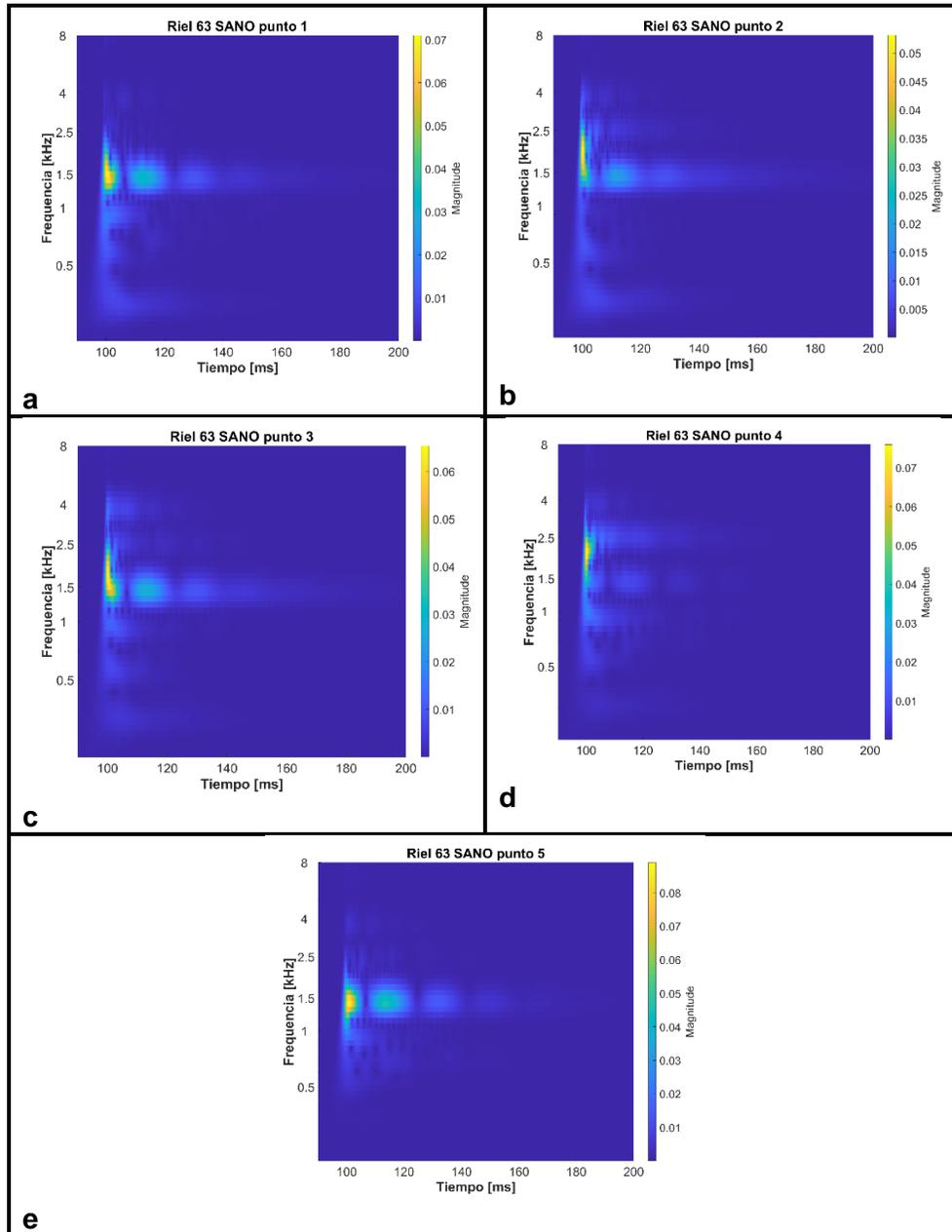


Figura 4-31: Proceso comportamiento frecuencial variación condiciones escalogramas.

Donde a) Punto 1, b) Punto 2, c) Punto 3, d) Punto 4 y e) Punto 5.

Fuente: propia

Lo ideal en el comportamiento frecuencial, partiendo de que el punto de captura de la señal de respuesta esté en el centro y que los parámetros físicos y componentes sean homogéneos en ambas direcciones, es que exista una concordancia en la distribución energética entre puntos de impacto a la misma distancia del punto de recepción.

Esta tendencia se observa en la Figura 4-31, donde los puntos de impacto situados a la misma distancia del centro tienden a comportarse de manera similar. Por ejemplo, el punto 1 y 5 muestran una concentración en la frecuencia de 1500 Hz, y su amortiguamiento en el tiempo también es similar. Los siguientes puntos a la misma distancia, el 2 y el 4, reflejan una distribución con una concentración más fina pero que abarca valores en rangos de frecuencias entre los 1200 y los 2500 Hz. En cuanto al punto 3, podría considerarse una mezcla entre los puntos cercanos y lejanos, ya que concentra gran parte de su energía en los valores de 1500 Hz, pero al mismo tiempo abarca finamente frecuencias mayores hasta los 2500 Hz.

- **Variación puntos de impacto condición 1:**

Para el riel en condición 1 se cuentan con cinco puntos a lo largo de la superficie del riel. Donde, 1 y 5 sobre los durmientes, 4 y 2 antes y después de la huella y 3 en toda la huella mostrado en la Figura 4-34 (mismo posicionamiento del riel sano). Se realizaron 45 tomas para cada caso y se transformaron las señales en escalogramas que se visualizan en la Figura 4.33.



Figura 4-32: Puntos de impacto riel condición 1.

Fuente: propia

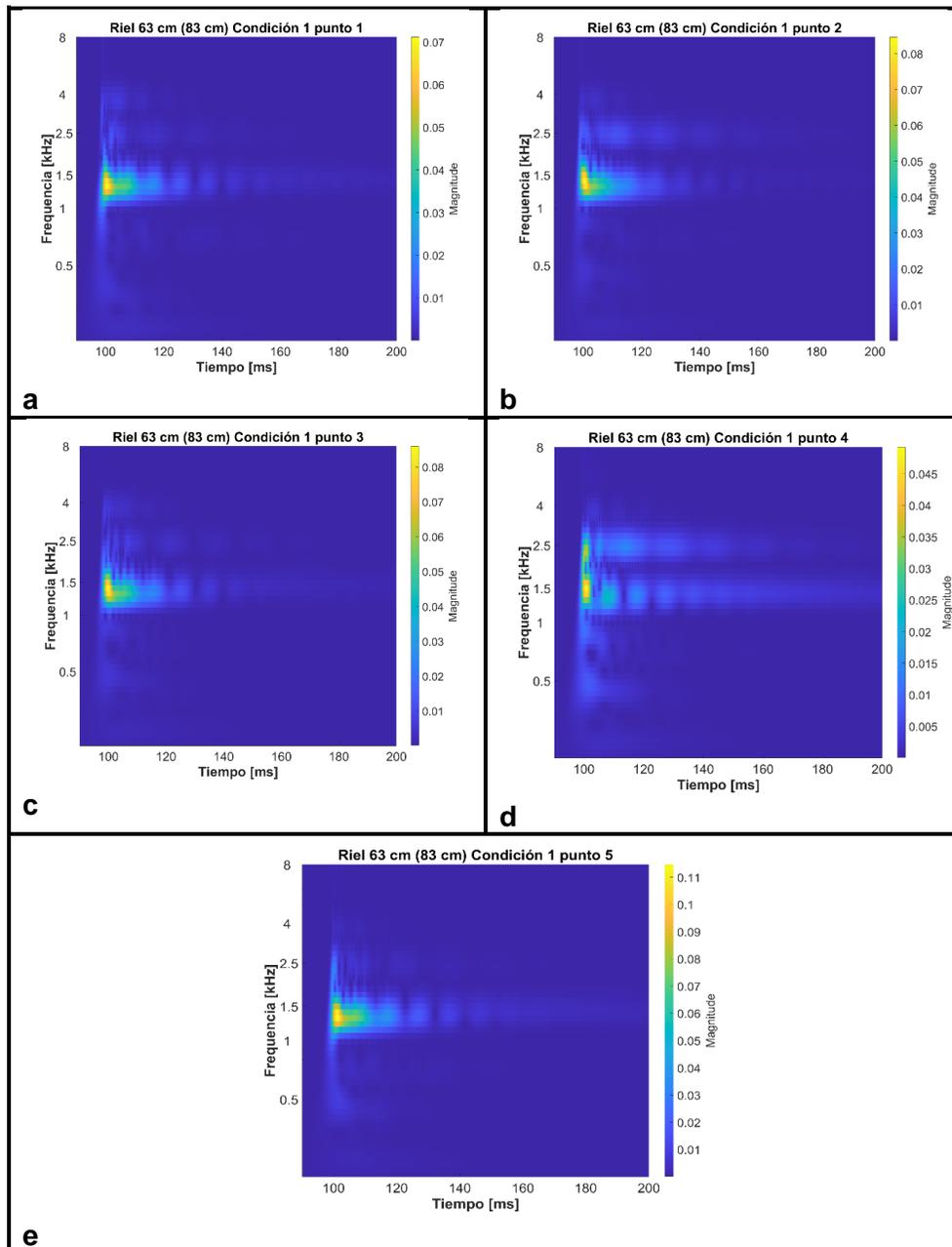


Figura 4-33: Proceso comportamiento frecuencial variación puntos imapcto condición 1 escalogramas. Donde a) Línea base punto 1, b) Punto 2, c) Punto 3, d) Punto 4 y e) Punto 5.

Fuente: propia

Los resultados muestran un patrón que indica comportamientos similares a simple vista entre los puntos 1, 2, 3 y 5 en términos de concentración de energía y amortiguamiento. Sin embargo, en el punto 4 se observa un cambio en la concentración de energía que se agrupa en 2500 y 1500 Hz, pero de manera no homogénea ni similar al punto 4 en el riel en buen estado. Además, la agrupación de frecuencias se presenta de manera más separada y hay alteraciones en su amortiguamiento, a diferencia del resto de los puntos.

Este comportamiento sugiere que en este punto podría haber efectos en las frecuencias debido a la presencia de la huella de remoción de perfil ubicada entre el punto 4 y el 3. Al mismo tiempo, la concentración mayor de frecuencias se evidencia en valores por debajo de los 1500 Hz, a diferencia de lo observado en el riel en buen estado esto también con respecto al defecto y al reperfilado.

- **Variación puntos de impacto condición 4:**

En el caso de la condición 4, se añadió un punto adicional debido a que se presenta una remoción notable y extendida del material a lo largo de la superficie del riel. Por lo tanto, para este escenario, se consideraron los puntos 1 y 6 sobre los durmientes, 3 y 4 sobre el defecto, y 2 y 5 cercanos a los durmientes, tal como se visualiza en la Figura 4-34. Se llevaron a cabo 45 tomas para cada uno de estos puntos, y las señales fueron transformadas en imágenes, como se ilustra en la Figura 4.36.



Figura 4-34: Puntos de impacto riel condición 4.

Fuente: Propia

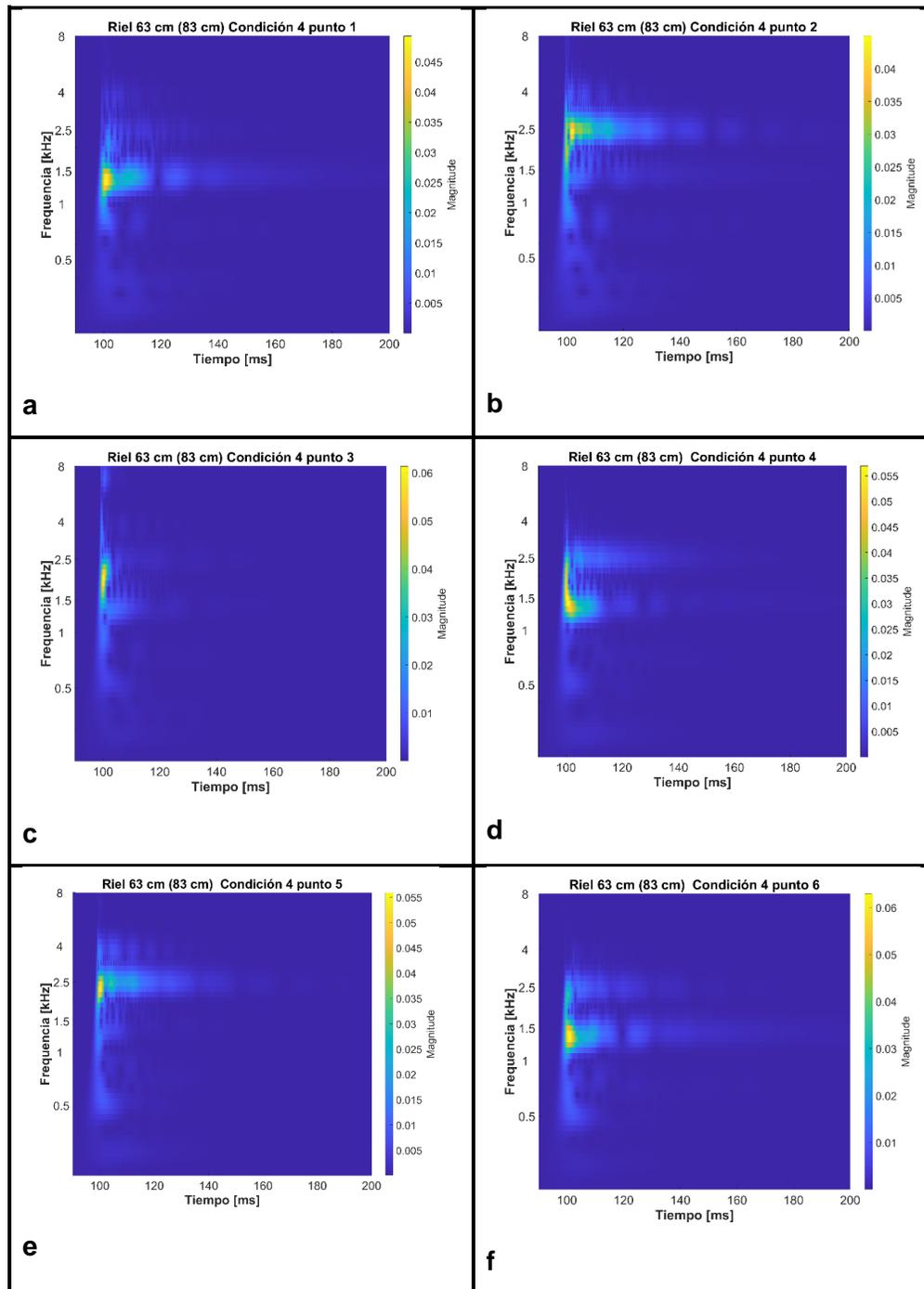


Figura 4-35: Proceso comportamiento frecuencial variación puntos impacto condición 4 escalogramas. Donde a) Línea base punto 1, b) Punto 2, c) Punto 3, d) Punto 4, e) Punto 5 y f) Punto 6.

Fuente: propia

Se observa un comportamiento completamente distinto en comparación con el riel en buen estado y el riel bajo condición 1. Cada punto muestra un comportamiento particular, aunque aún existen similitudes que permiten ciertas asimilaciones. En los puntos extremos, 1 y 6, ambos tienden a concentrar energía por debajo de los 1500 Hz y presentan un amortiguamiento similar. Para los puntos 2 y 5, también hay similitudes con algunas diferencias en la cantidad y distribución de energía, tanto puntual como en términos de amortiguamiento.

En el caso del punto 3, se observa poca energía concentrada y distribuida en valores que van desde menos de 1500 Hz hasta alcanzar los 2500 Hz. En el punto 4, ubicado en el centro del defecto, se aprecia una concentración de energía por debajo de los 1500 Hz, reduciendo su magnitud a medida que se acerca a los 2500 Hz. Estos resultados indican que cada punto en el riel con la condición 4 presenta un comportamiento único, caracterizado por variaciones en la concentración y distribución de energía en diferentes rangos de frecuencias.

4.3.7 Resultados entrenamiento redes profundas

El entrenamiento de las 5 redes convolucionales seleccionadas se realiza con las clases de cada uno de los dos grandes casos analizados (variación distancias y variación condiciones), para ambos casos se realizó la transformación de las señales en imágenes directamente de la señal temporal de la respuesta del riel y con la señal transformada por FRF. La idea es comparar el desempeño y el funcionamiento en cada uno de los casos y si ambos procesos se logran considerar como métodos de caracterización.

En este caso se muestran ejemplos de las imágenes que se ingresaron para el entrenamiento en cada caso, se retiran los valores de las coordenadas y los marcos externos ya que esto es información constante y no afecta en el resultado final. Para garantizar que las señales no se desfasen del valor de las frecuencias ni su comportamiento en tiempo el recorte es estandarizado para todos los casos. Posteriormente al recorte de las imágenes se escala a las dimensiones correctas para

cada red, recordando que gran parte de ellas son 224x224 y solo la SqueezeNet es 227x227.

- **Escalogramas variación distancias– señal temporal:**

En la Figura 4-36 se muestra un ejemplo de cada imagen por clase que se ingresa al modelo de red profunda. Para el ojo humano se torna complejo la caracterización y diferenciación de imágenes, caso contrario que pasa con las redes de identificación de imágenes. Por consiguiente, se realiza el proceso de entrenamiento validación y medición de eficiencia por las métricas para cada uno de los entrenamientos en las cinco redes. En este caso para la identificación del comportamiento frecuencial para cada una de las distancias entre durmientes.

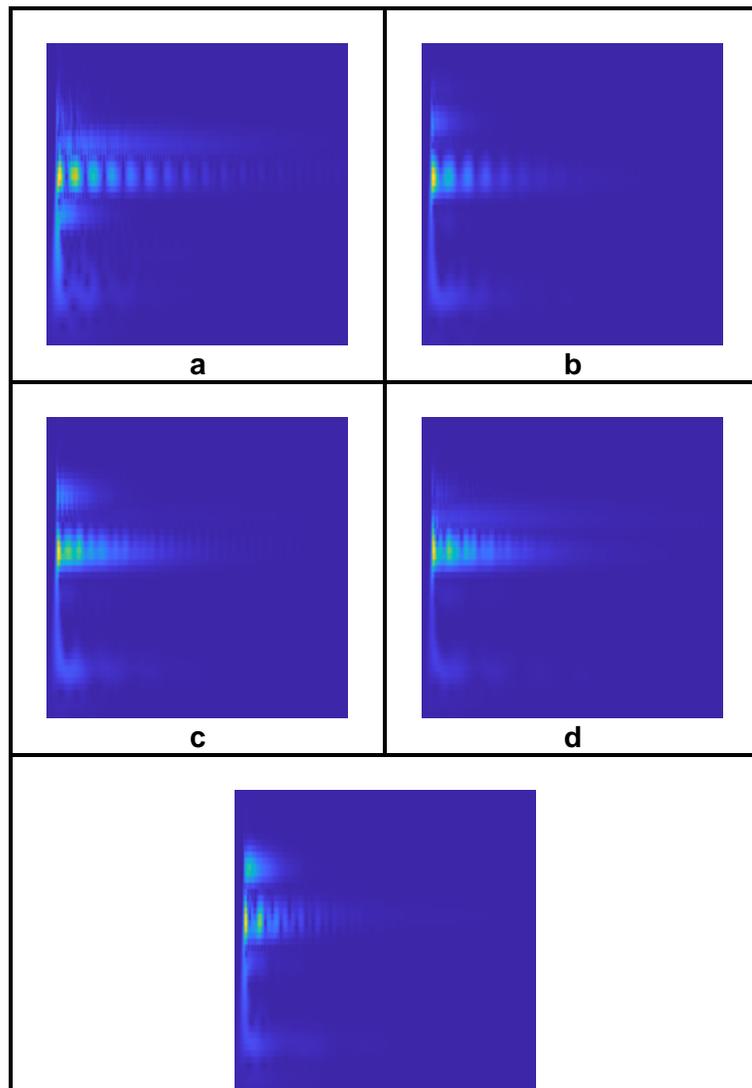


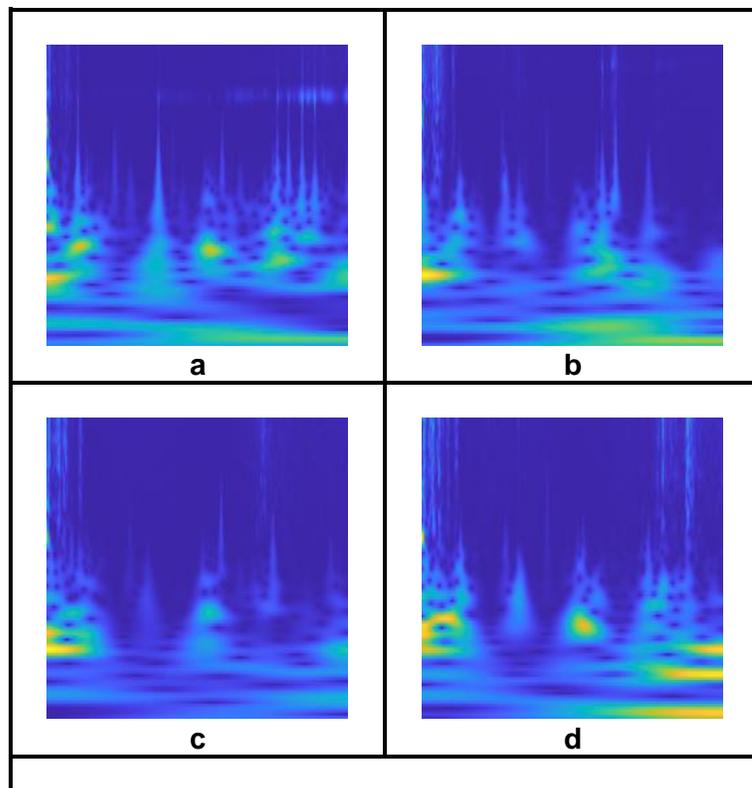


Figura 4-36: Imágenes de entrenamiento variación distancias escalograma– señal temporal. Donde a) Distancia 63 cm, b) Distancia 67 cm, c) Distancia 70 cm, d) Distancia 72 cm y e) Distancia 75 cm.

Fuente: propia

- **Escalogramas variación distancias - FRF:**

La señal FRF tomada para cada una de las distancias se transforman en escalograma por CWT, se recortan y se escalan para cada red correspondientemente. En la Figura 4-37 se puede observar la secuencia de este comportamiento frecuencial en relación con los datos extraídos por FRF y transformados por CWT.



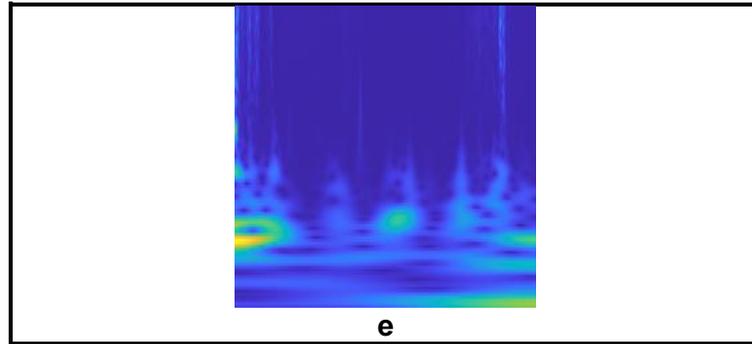


Figura 4-37: Imágenes de entrenamiento variación distancias escalograma - FRF. Donde a) Distancia 63 cm, b) Distancia 67 cm, c) Distancia 70 cm, d) Distancia 72 cm y e) Distancia 75 cm.

Fuente: propia

Cada conjunto de imágenes, organizado en cinco clases (63 cm, 67 cm, 70 cm, 72 cm y 75 cm), es introducido y entrenado en los cinco modelos de redes profundas. Posteriormente, son procesados y evaluados mediante las tres métricas de rendimiento: exactitud, matriz de confusión y curva ROC. El objetivo es analizar y comparar el desempeño de las redes en la caracterización y clasificación del estado del riel, así como validar que ambas alcancen sus objetivos. Los resultados de la exactitud se presentan en la Tabla 4-9, detallando los resultados por red y su porcentaje para cada caso.

Tabla 4-9: Resultados métricas desempeño redes profundas. (Fuente propia).

Nombre red profunda	Exactitud distancias CWT de señal temporal [%]	Exactitud distancias CWT de FRF [%]	Exactitud condición CWT de señal temporal [%]	Exactitud condición CWT de FRF [%]
GoogleNet	97,2	86,7	97,8	91,1
ResNet-50	97,2	88,9	100	95,6
SqueezeNet	100	86,7	95,6	93,3
ShuffleNet	91,7	80	97,8	93,3
EfficientNetb0	94,4	95,6	93,3	88,9

Los resultados revelan una consistente relación entre los datos de validación y los de entrenamiento, con porcentajes de exactitud superiores al 80% en todos los casos. Es importante destacar que, al utilizar redes previamente entrenadas, los resultados son significativamente elevados, especialmente teniendo en cuenta que se emplearon 45 tomas de señales por cada dato, un número que no se considera pequeño. Este hecho resalta la eficacia del *Transfer Learning*, que permite transferir características y facilita la identificación de las clases etiquetadas en cada caso.

Las métricas de evaluación adicionales incluyen la matriz de confusión y la curva ROC, las cuales aportan una percepción cuantitativa del rendimiento de la red. Las representaciones más destacadas del desempeño del modelo, en cuanto a la transformación de la señal temporal en escalogramas, se presentan en las Figuras 4-38 y 4-39 para la matriz de confusión y la curva ROC, respectivamente.

- **Escalogramas variación distancias– señal temporal:**

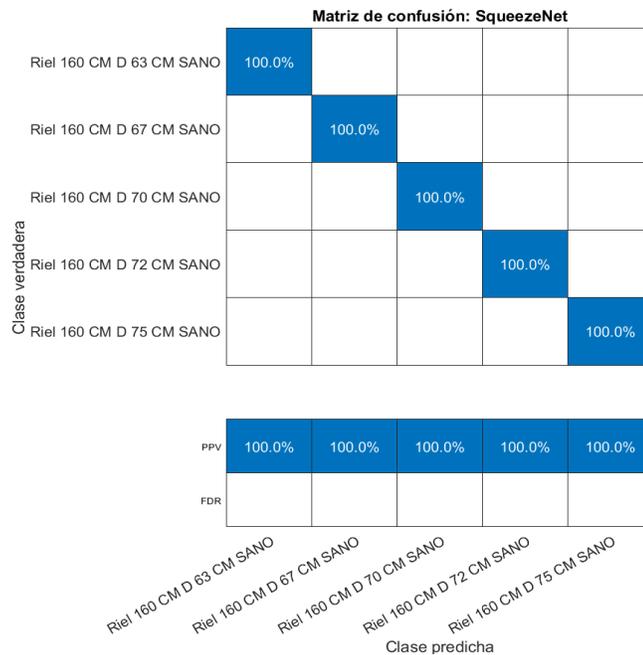


Figura 4-38: Matriz de confusión escalograma-señal temporal variación distancias fijaciones.

Fuente: propia

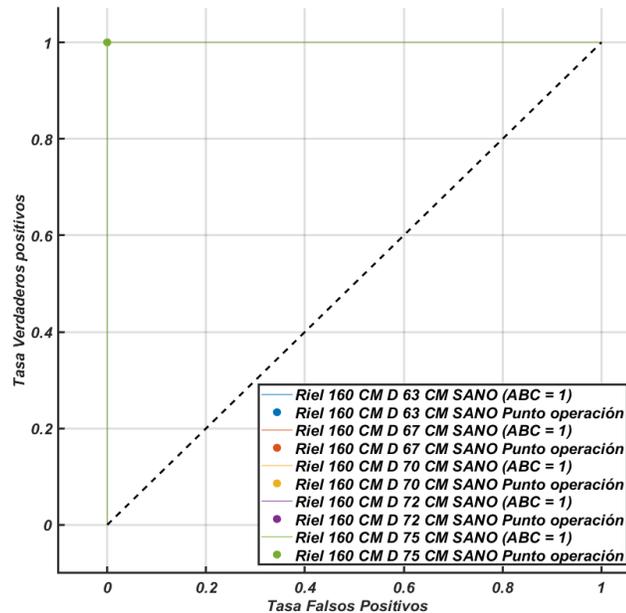


Figura 4-39: Curva ROC escalograma-senál temporal variación distancias fijaciones.

Fuente: propia

Las redes exhiben un comportamiento objetivo, cumpliendo con un porcentaje aceptable en la relación entre las clases estipuladas y las predichas. En particular, la SqueezeNet, en la clasificación de distancias con base en escalogramas por señal temporal, demuestra una eficiencia del 100%. Este resultado se obtuvo a partir del proceso realizado, lo que sugiere una efectividad confiable en la clasificación del estado del riel bajo este parámetro.

- **Escalogramas variación distancias– FRF:**

Para el caso de la caracterización de la variación de distancias con base en el uso de la señal FRF en imagen la de mayor desempeño fue la EfficientNetb0 se observa en la matriz de confusión en la Figura 4-40 y en la curva ROC Figura 4-41. En donde, no muestra unos porcentajes del 100% como lo que realizó la SqueezeNet con la señal temporal, pero si demuestra que los porcentajes ascienden de 80%, bajo criterio es un resultado relativo, pero no deja de ser un valor alto.

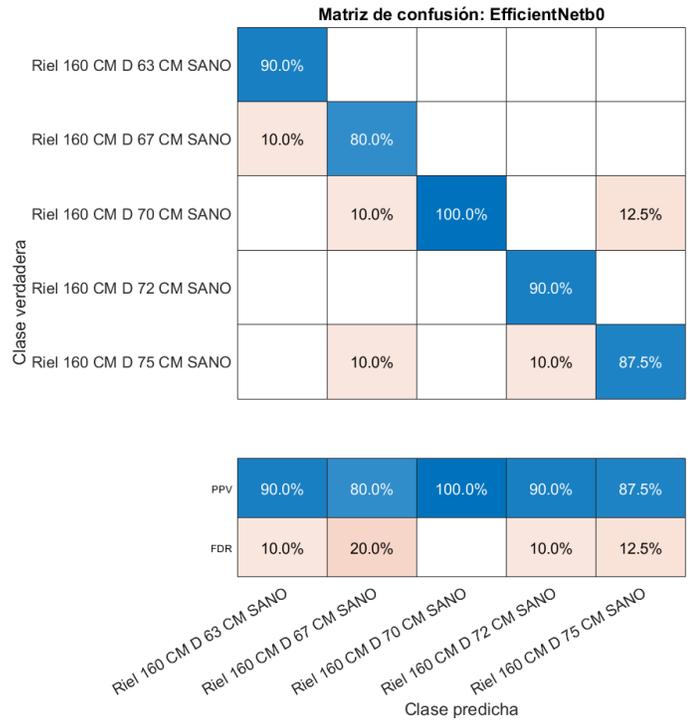


Figura 4-40: Matriz de confusión escalograma-FRF variación distancias fijaciones.

Fuente: propia

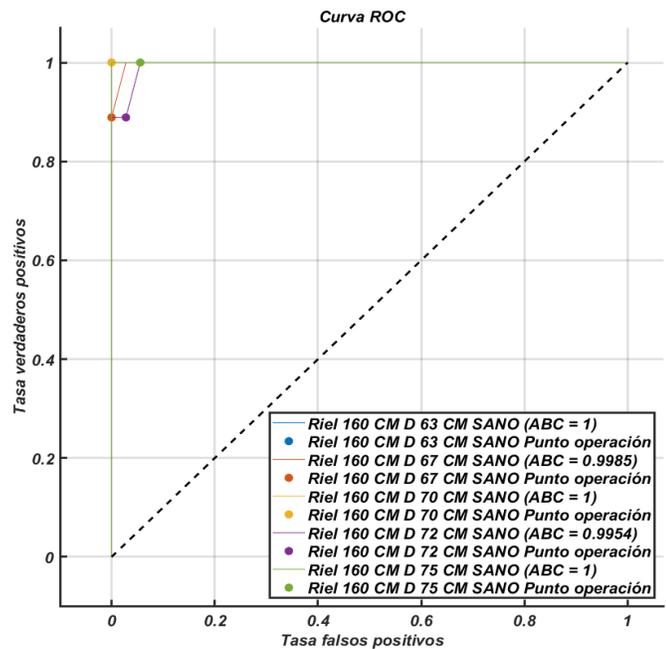


Figura 4-41: Curva ROC escalograma-FRF variación distancias fijaciones.

Fuente: propia

Aunque esta metodología no alcanza porcentajes ideales de confiabilidad en el proceso de clasificación, sigue siendo un método aceptable que puede ser eficaz en el futuro para la caracterización de estructuras. Para mejorar el entrenamiento, se podrían considerar varios parámetros, como el aumento de datos, el *Transfer Learning* y la mejora de las imágenes en términos de colores o tamaños para permitir una detección óptima. Por lo tanto, no se descarta su uso para la caracterización del riel basada en la variación de distancias entre fijaciones.

- **Escalogramas variación condición– señal temporal:**

En lo que respecta a la clasificación del riel según la variación de condiciones, el modelo con el mayor porcentaje general en la matriz de confusión fue la GoogleNet tal como se observa en las Figuras 4-42 y 4-43. Alcanzando aproximadamente el 100% en todas sus relaciones de clases. Esto valida que, para el proceso de caracterización del riel en términos de variación de condiciones, especialmente bajo el parámetro de análisis de clasificación por comportamiento frecuencial en el tiempo, la GoogleNet demuestra ser eficaz.

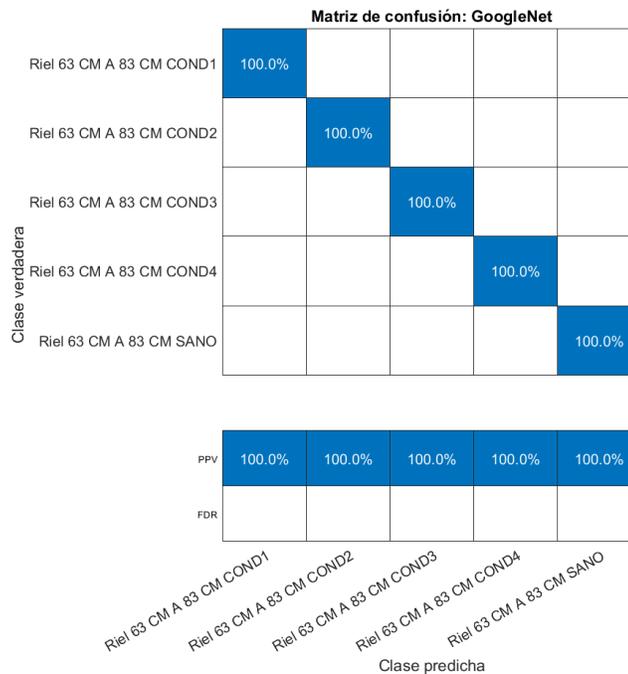


Figura 4-42: Matriz de confusión escalograma-senal temporal variación condiciones.

Fuente: propia

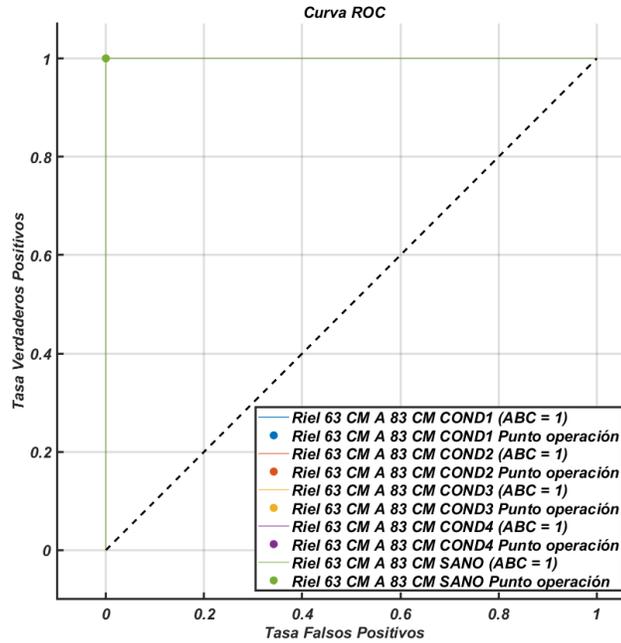


Figura 4-43: Curva ROC escalograma- señal temporal variación condiciones.

Fuente: propia

- **Escalogramas variación condición– FRF:**

El mismo enfoque se aplica al escalograma por señal FRF, y su rendimiento general permite concluir que también es un entrenamiento válido de clasificación. La imagen resultante de la relación entre impacto y respuesta FRF refleja una caracterización del comportamiento del riel bajo los parámetros que permiten determinar su estado. Cada tramo de riel presenta particularidades en la variación de su momento de inercia y masa debido a desprendimientos de material y cambios en propiedades, lo que se refleja en su característica frecuencial, convirtiéndolo en otro parámetro válido para la caracterización del riel. En este caso, la red GoogleNet obtuvo el mayor porcentaje en la matriz de confusión, destacándose como una red que sobresale en el desempeño de la clasificación.

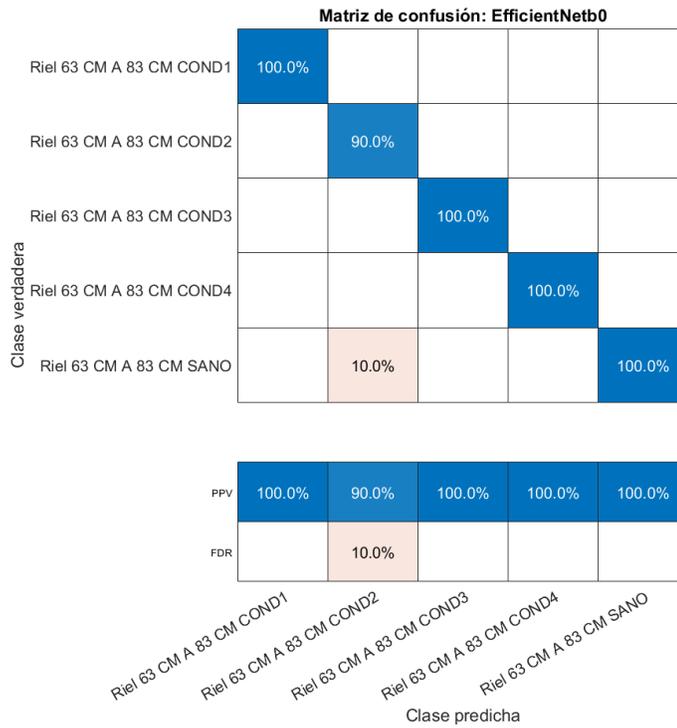


Figura 4-44: Matriz de confusión escalograma-FRF variación condiciones.

Fuente: propia

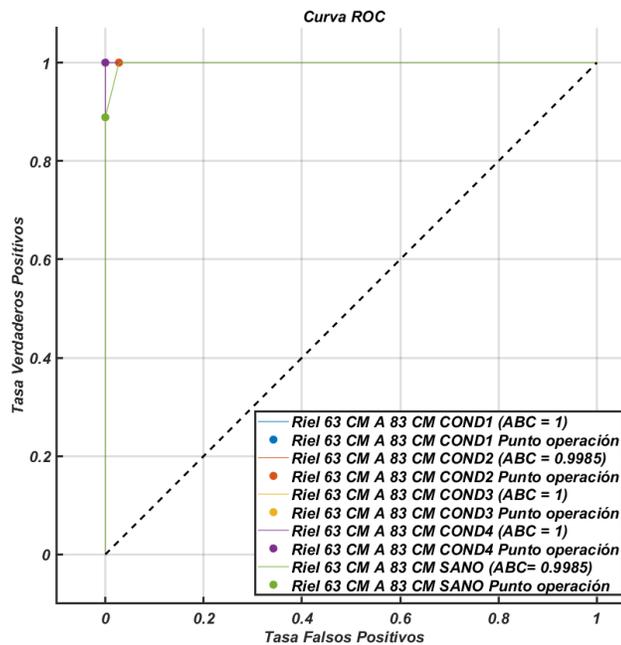


Figura 4-45: Curva ROC escalograma- FRF variación condiciones.

Fuente: propia

El procesamiento y entrenamiento de las redes utilizando la transformación de la señal temporal y los datos de la FRF en escalogramas logran llevar a cabo el proceso de caracterización del riel, cada uno con porcentajes distintos pero aceptables.

Cada método podría beneficiarse de mejoras en el desempeño para alcanzar valores porcentuales superiores en las métricas de evaluación; no obstante, cumplen con su funcionalidad. En términos generales, todas las redes obtuvieron valores por encima del 80% en todas las métricas y en todos los casos, resultados que se consideran buenos en líneas generales. Los demás resultados de las métricas para el resto de los entrenamientos se encuentran detallados en el anexo A.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con el propósito de abordar de manera integral el establecimiento de una estrategia para caracterizar la condición de los rieles de tren mediante el empleo de la función de respuesta de frecuencia y redes profundas, se derivan conclusiones fundamentales del trabajo realizado, basándose en los resultados obtenidos y en los métodos de abordaje aplicados. Además, se incluyen recomendaciones para futuros trabajos que puedan ampliar y profundizar en esta área de investigación, complementando así los logros alcanzados y contribuyendo al avance continuo del conocimiento en este campo.

5.1 Conclusiones

- La metodología diseñada para la caracterización del riel de tren permite la identificación de las variaciones en el comportamiento frecuencial, ya sea en respuesta al cambio en la configuración de las distancias entre fijaciones o a modificaciones en las condiciones estructurales mediante la introducción de defectos. Este proceso de validación se ejecutó de manera integral, abordando los tres métodos planteados: teórico, numérico y experimental. La concordancia entre estos métodos refleja que la generación de defectos o variaciones estructurales en el riel, así como el incremento en las distancias en la configuración del riel, provocan cambios en sus valores y patrones frecuenciales, con una tendencia a valores menores y a concentraciones diferenciales de energía. Esta tendencia se evidenció tanto en la comparación de los valores frecuenciales mediante FRF y FFT como en los escalogramas a través de la transformada continua de Wavelet.
- Mediante el método Z, se ha logrado implementar un proceso de clasificación binaria para evaluar la condición estructural del riel, determinando si se sitúa dentro

de los límites de los parámetros base iniciales o no. Este enfoque permite la caracterización global del riel según su estado, clasificándolo como sano si cumple con los parámetros predefinidos, y detectando la presencia de defectos o variaciones estructurales indebidas en caso contrario. Este método se aplica de manera análoga para la determinación de las distancias entre fijaciones base, posibilitando determinar si la configuración se encuentra dentro del rango frecuencial establecido o si presenta alguna alteración.

- Se logró identificar la tendencia del comportamiento frecuencial del riel al variar el punto de impacto, manteniendo constante el punto de captación de la respuesta en la ubicación con el mayor desplazamiento estructural. En este experimento, se observa cómo, a lo largo de la estructura, los valores frecuenciales y sus amplitudes pueden experimentar variaciones. Al comparar rieles en diferentes condiciones con el riel en su estado óptimo, se evidencia un cambio en la distribución frecuencial, lo que posibilita la visualización de alteraciones significativas en la identificación de patrones y, por ende, una caracterización diferente a su estado ideal. Estos cambios son perceptibles tanto para el ojo humano como para las redes profundas de aprendizaje, contribuyendo de manera significativa a la caracterización efectiva del riel de tren.
- Mediante la aplicación del método de clasificación estructural basado en redes neuronales profundas, se logró una determinación altamente precisa del estado del riel y las variaciones en el ensamblaje estructural. Este logro se evidenció tanto en la alimentación de las redes por medio de la transformación de la señal temporal como con el resultado de la FRF (Función de Respuesta en Frecuencia), representado visualmente en escalogramas. Los patrones visuales generados por cada transformación de la señal ofrecieron representaciones únicas que capturaron de manera efectiva las características distintivas de cada comportamiento dinámico estructural. Este fenómeno se reflejó en los notables valores de las métricas asociadas, destacando la eficiencia y precisión del modelo en la clasificación. La clave para el éxito de este proceso radica en la implementación del aprendizaje de transferencia. Al enfrentarnos a un conjunto de datos relativamente reducido, el

aprovechamiento de conocimientos previamente adquiridos por las redes neuronales en tareas relacionadas facilita notablemente su entrenamiento y mejora el rendimiento general en la caracterización de los datos. Este enfoque estratégico, respaldado por la experiencia acumulada en procesos de aprendizaje previos de las redes utilizadas, ha demostrado ser fundamental para alcanzar valores sobresalientes en el rendimiento de la clasificación.

5.2 Recomendaciones

- Continuar el proceso de investigación para la caracterización del riel, aprovechando la experimentación realizada en esta tesis. Identificar parámetros adicionales, aparte de los puntos y la fuerza de impacto, que puedan influir en los resultados del ensayo de martillo, permitiendo una identificación más precisa de cualquier estructura.
- Complementar y mejorar el dispositivo de impacto para lograr una ubicación más precisa y un mayor control en la fuerza de excitación de la estructura. Diseñar diversas puntas para abarcar un rango más amplio de frecuencias, adaptándose al elemento bajo análisis. Realizar experimentaciones con golpes tanto secos como secuenciales, sincronizando la frecuencia de impacto con la vibración de la estructura.
- Aplicar las metodologías presentadas en campo y comparar los resultados. Dado que el ensamblaje en campo tiende a ser más rígido debido a la presencia de balasto y la continuidad de las fijaciones del riel, se llevaría a cabo una experimentación complementaria a lo realizado en laboratorio. Calcular variaciones y determinar similitudes en los resultados obtenidos.

A. Anexo: Resultados métricas redes profundas

Escalogramas variación condición – señal temporal:

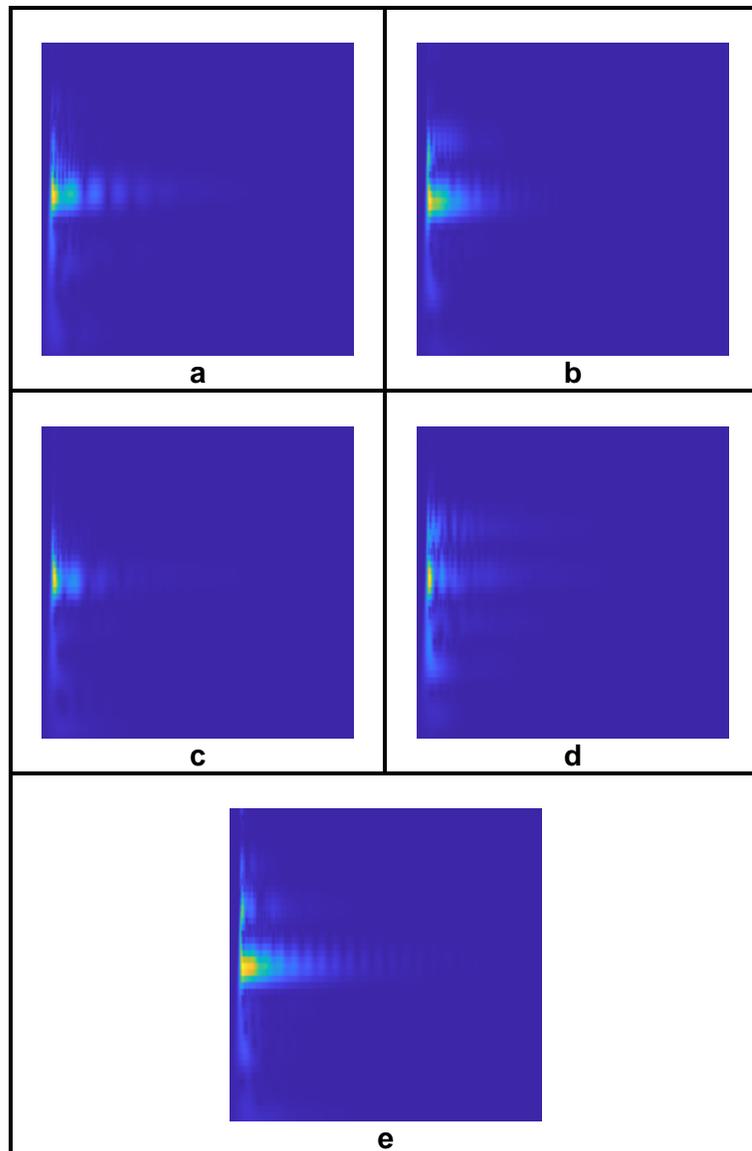


Figura A-1: Donde a) Riel sano, b) Condición 1, c) Condición 2, d) Condición 3 y e) Condición 4.

Fuente: propia

Escalogramas variación condición – FRF:

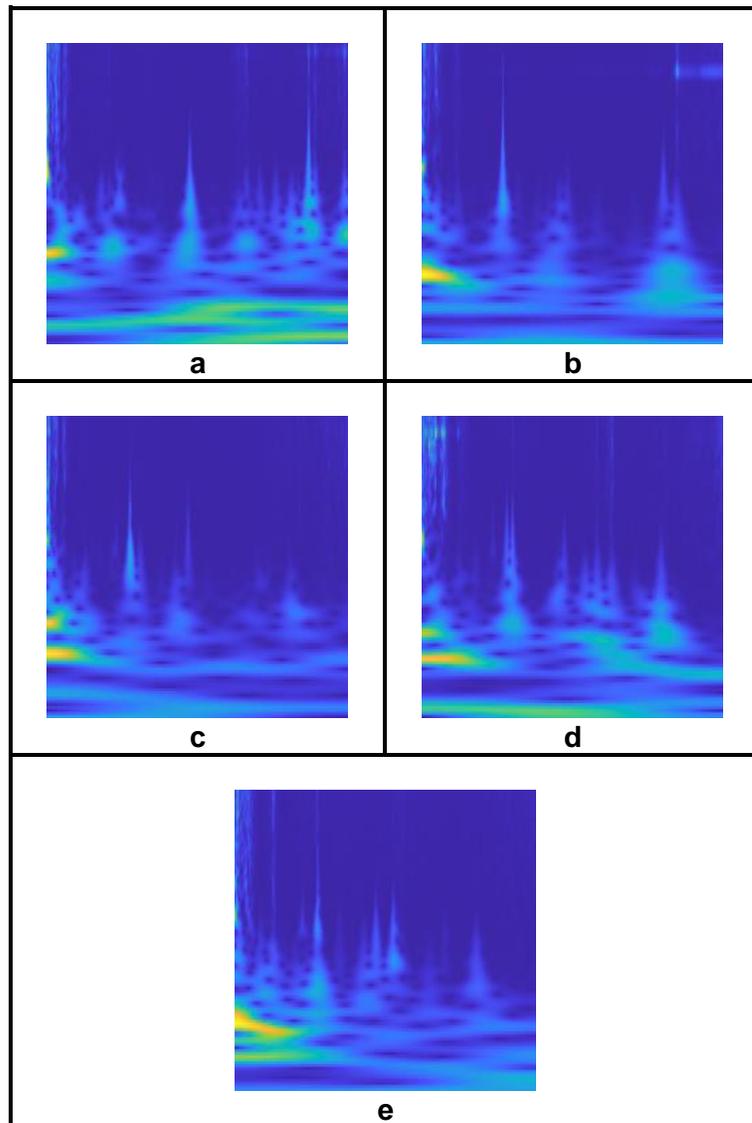


Figura A-2: Donde a) Riel sano, b) Condición 1, c) Condición 2, d) Condición 3 y e) Condición 4.

Fuente: propia

Matriz de confusión escalogramas variación distancias – señal temporal:

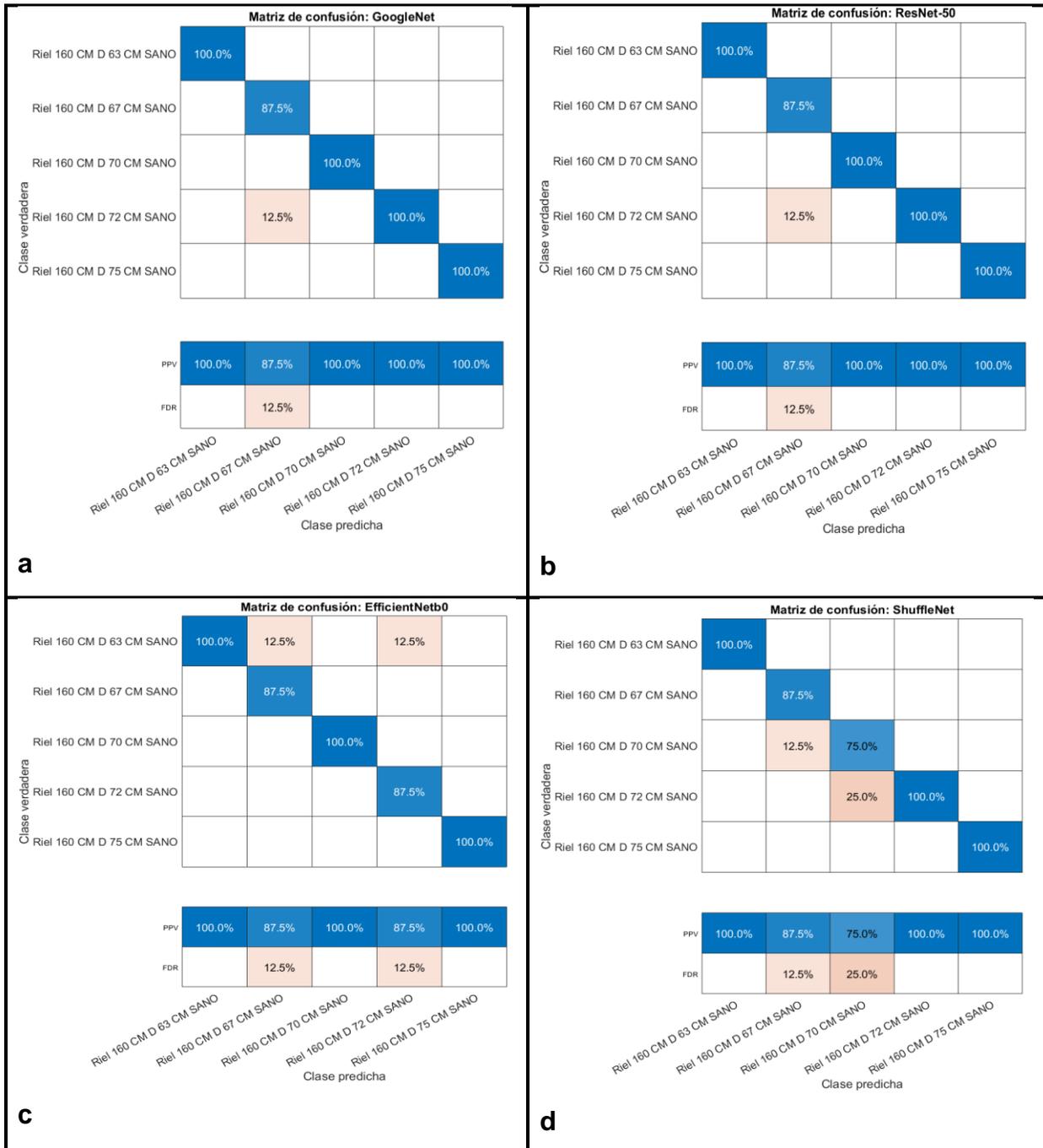


Figura A-3: Donde a) GoogleNet, b) ResNet-50, c) EfficientNetB0 y d) ShuffleNet

Fuente: propia

Curva ROC escalogramas variación distancias – señal temporal:

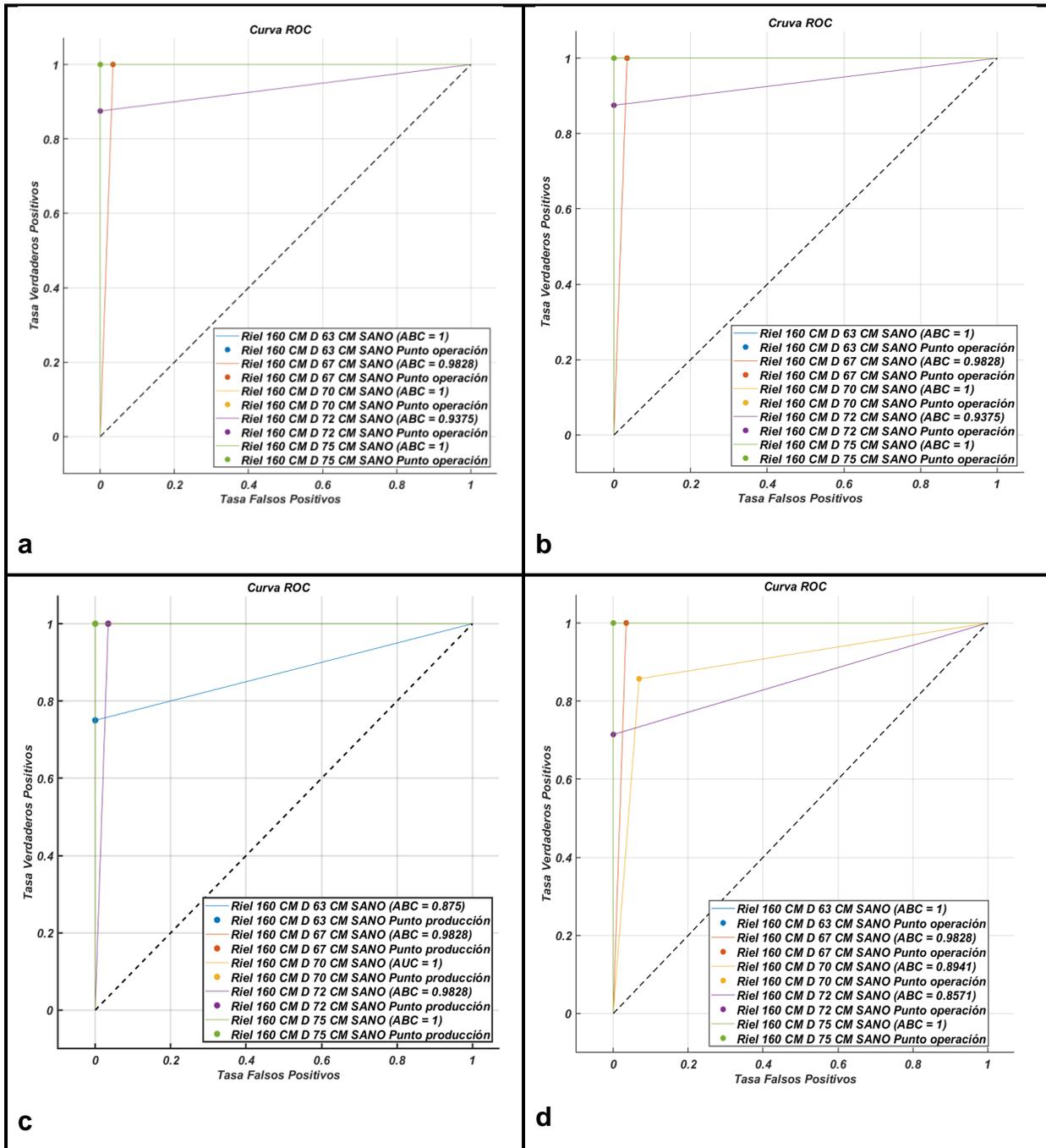


Figura A-4: Donde a) GoogleNet, b) ResNet-50, c) EfficientNetb0 y d) ShuffleNet.

Fuente: propia

Matriz de confusión escalogramas variación distancias –FRF:

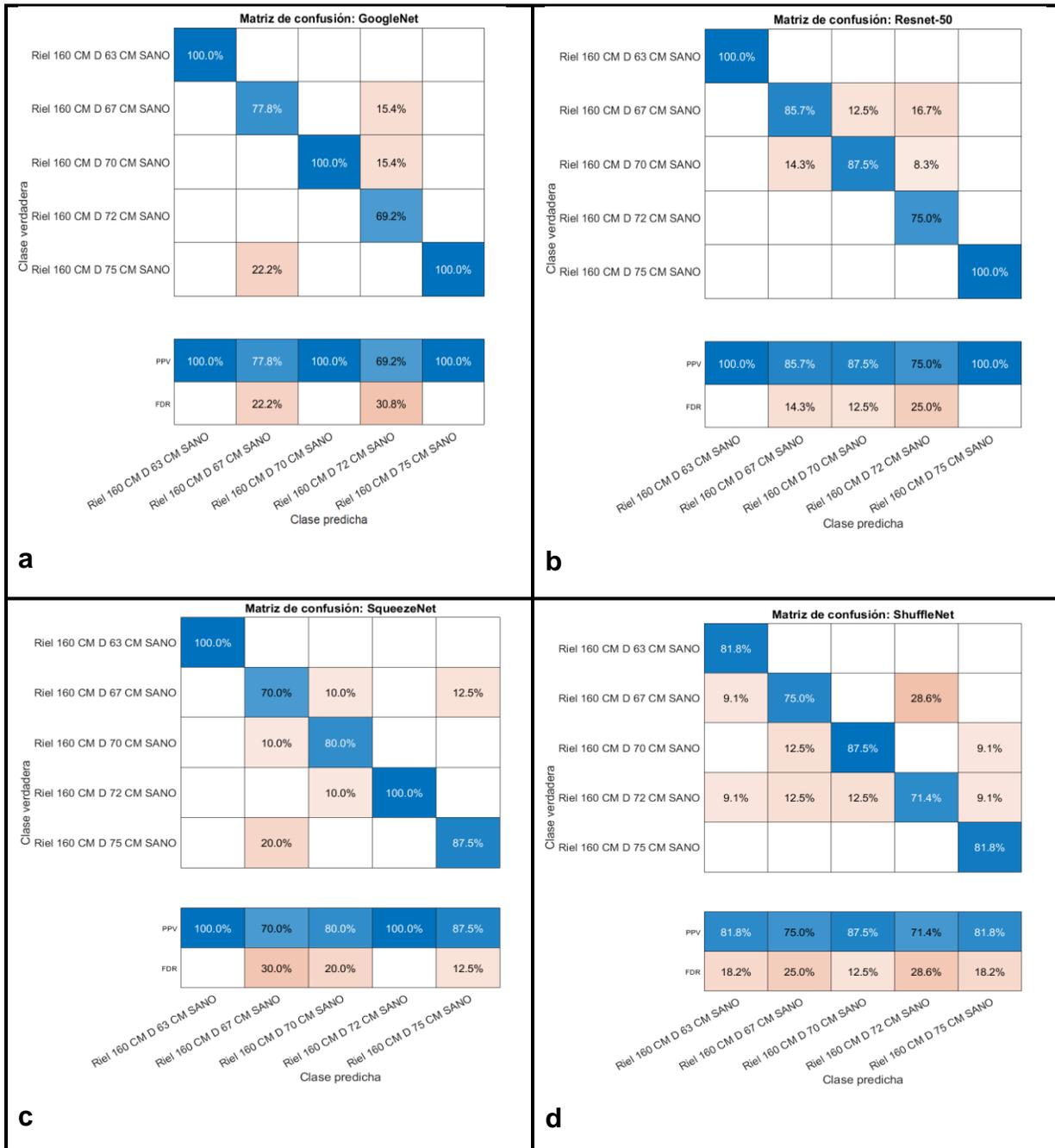


Figura A-5: Donde a) GoogleNet, b) ResNet-50, c) SqueezeNet y d) ShuffleNet.

Fuente: propia

Curva ROC escalogramas variación distancias –FRF:

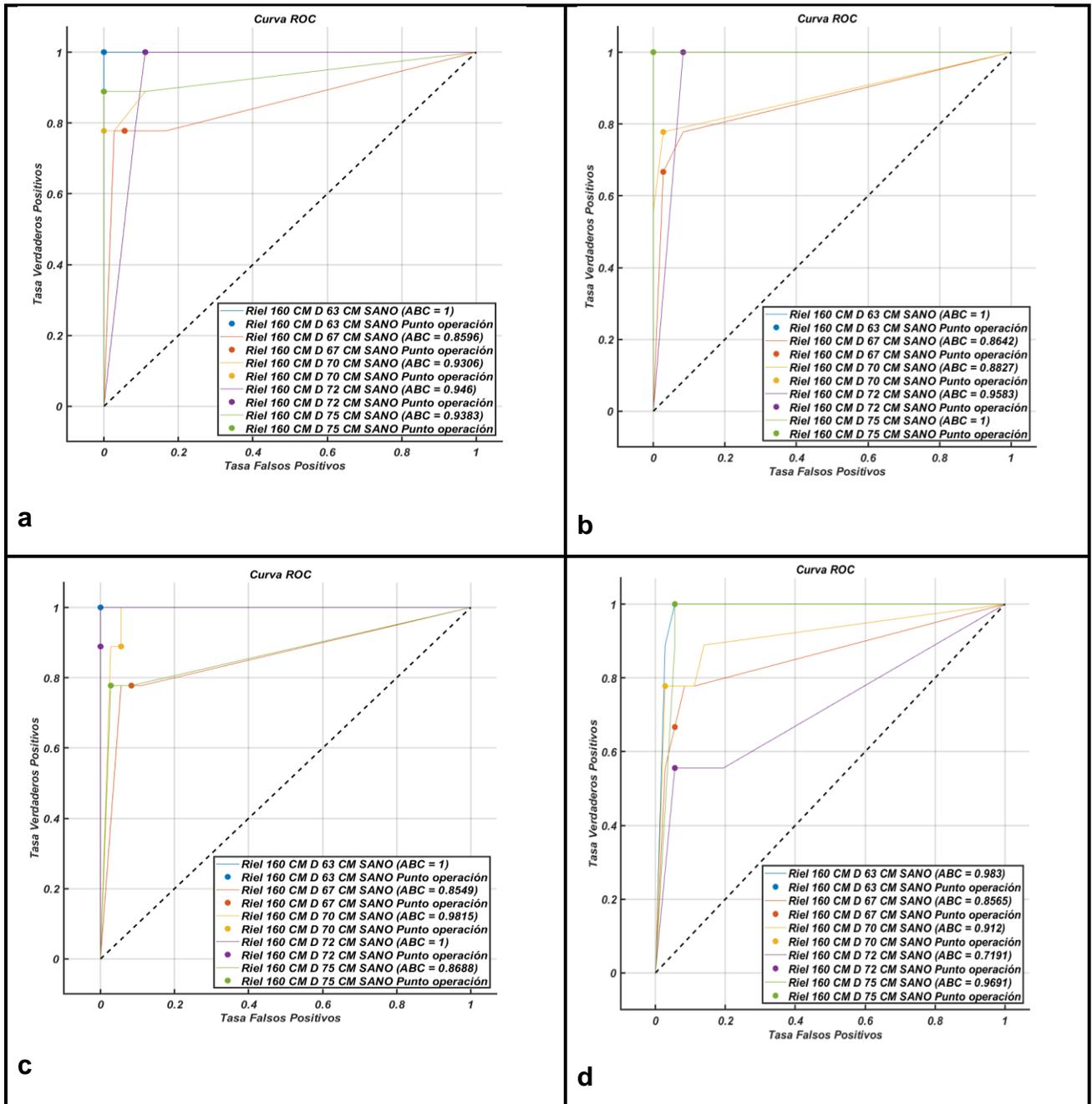


Figura A-6: Donde a) GoogleNet, b) ResNet-50, c) SqueezeNet y d) ShuffleNet.

Fuente: propia

Matriz de confusión escalogramas variación condición – señal temporal:

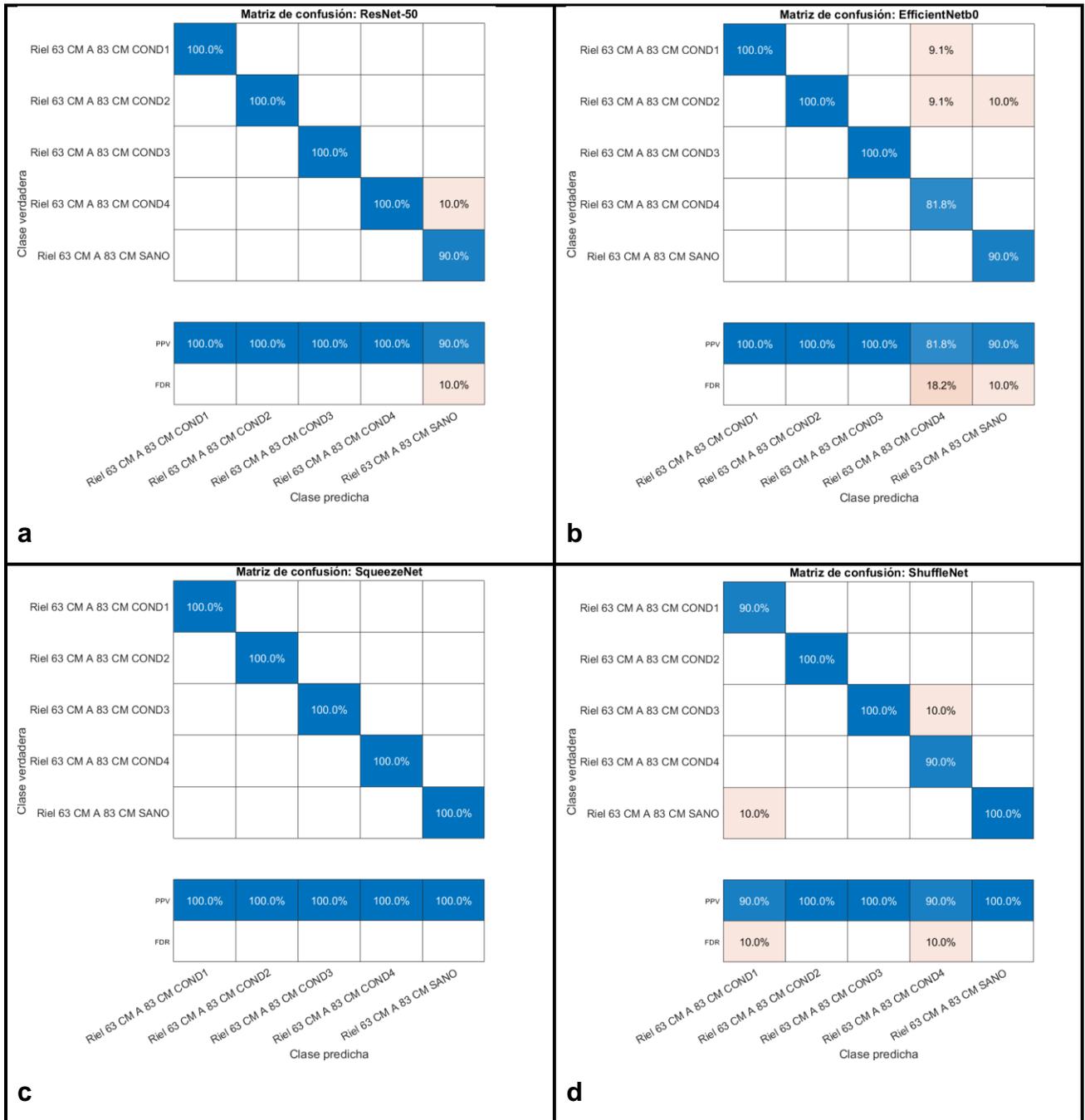


Figura A-7: Donde a) ResNet-50, b) EfficientNetb0, c) SqueezeNet y d) ShuffleNet.

Fuente: propia

Curva ROC escalogramas variación condición – señal temporal:

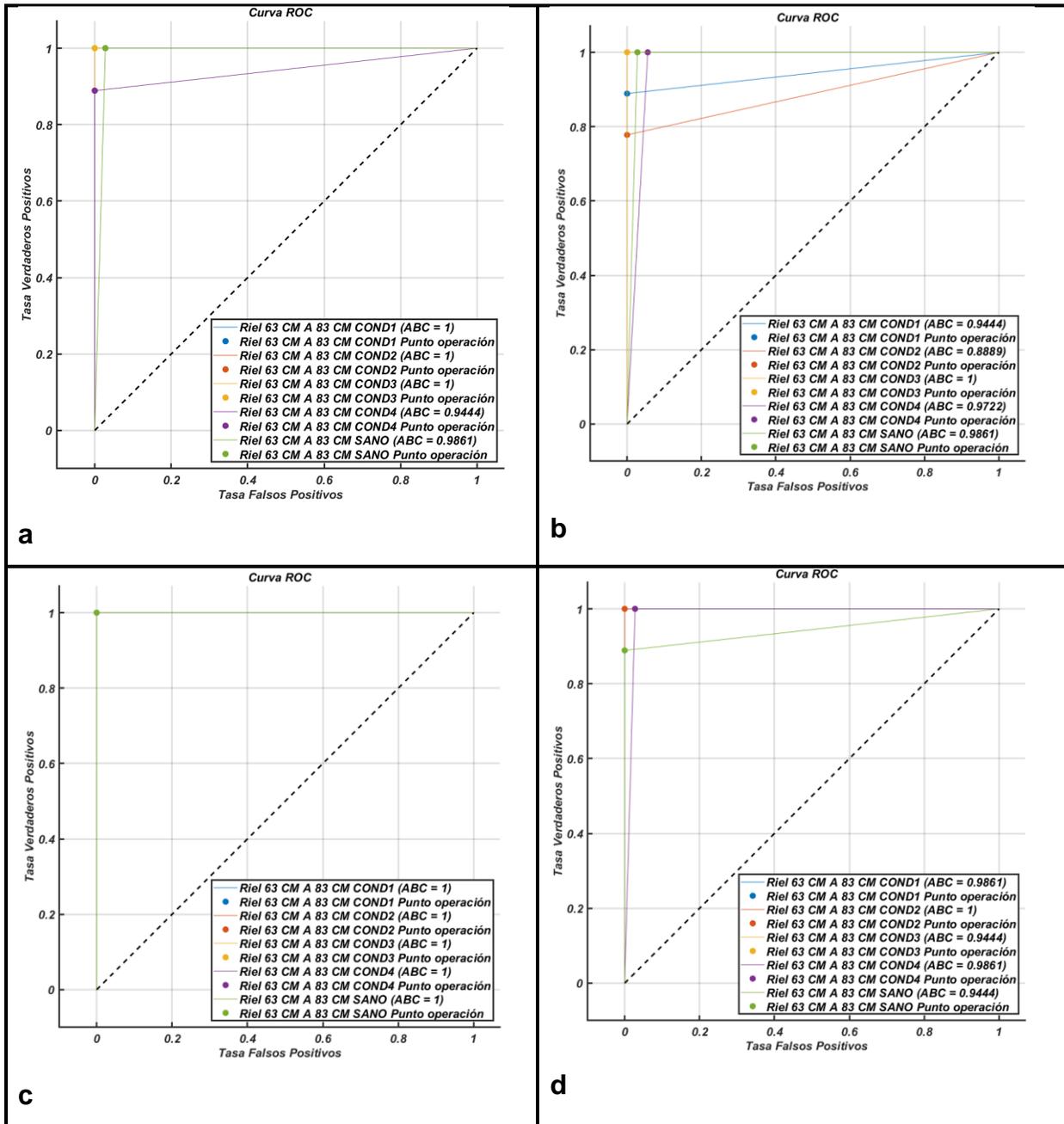


Figura A-8: Donde a) ResNet-50, b) EfficientNetb0, c) SqueezeNet y d) ShuffleNet.

Fuente: propia

Matriz de confusión escalogramas variación condiciones – FRF:

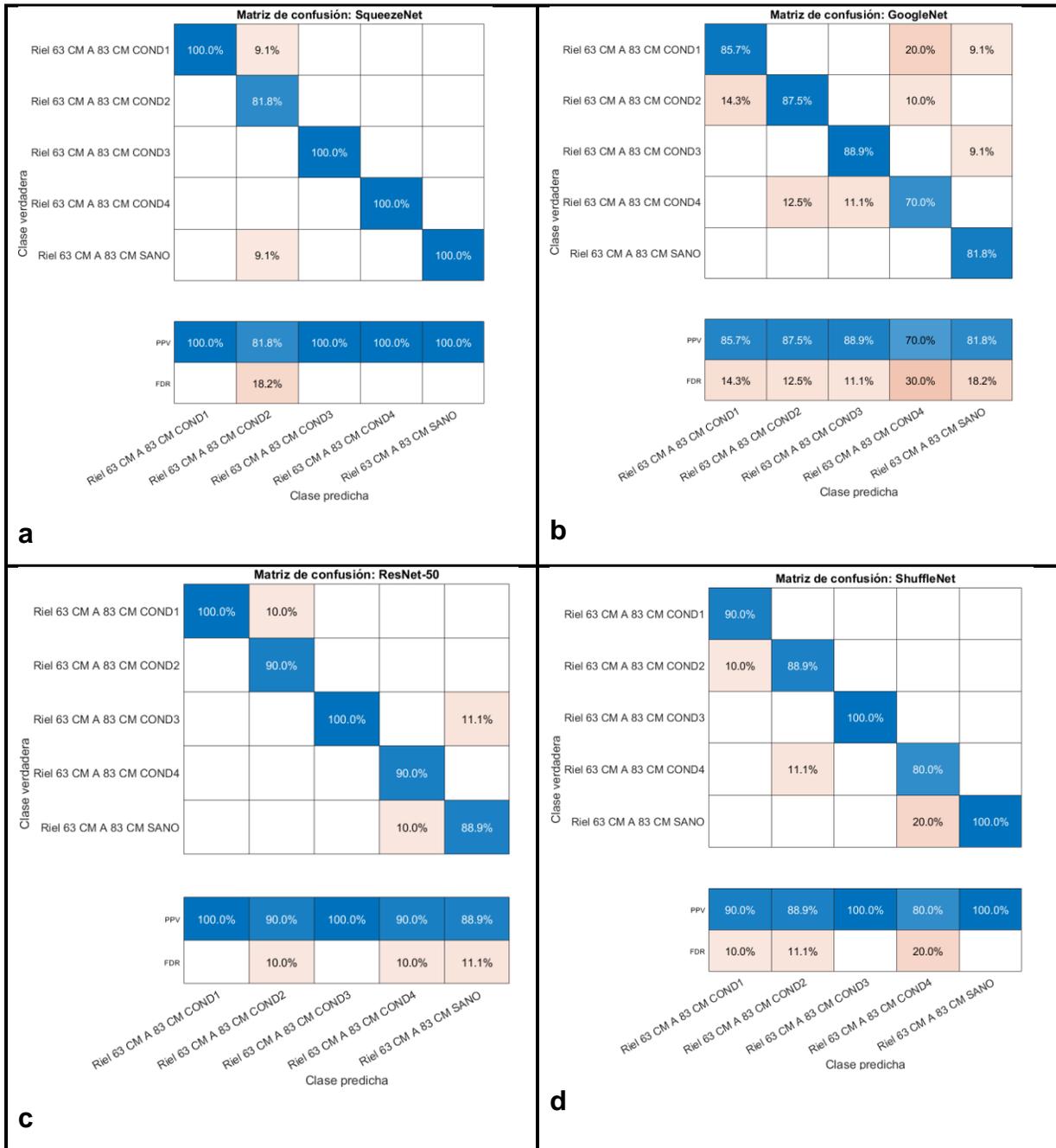


Figura A-9: Donde a) SqueezeNet, b) GoogleNet, c) ResNet-50 y d) ShuffleNet.

Fuente: propia

Curva ROC escalogramas variación condiciones – FRF:

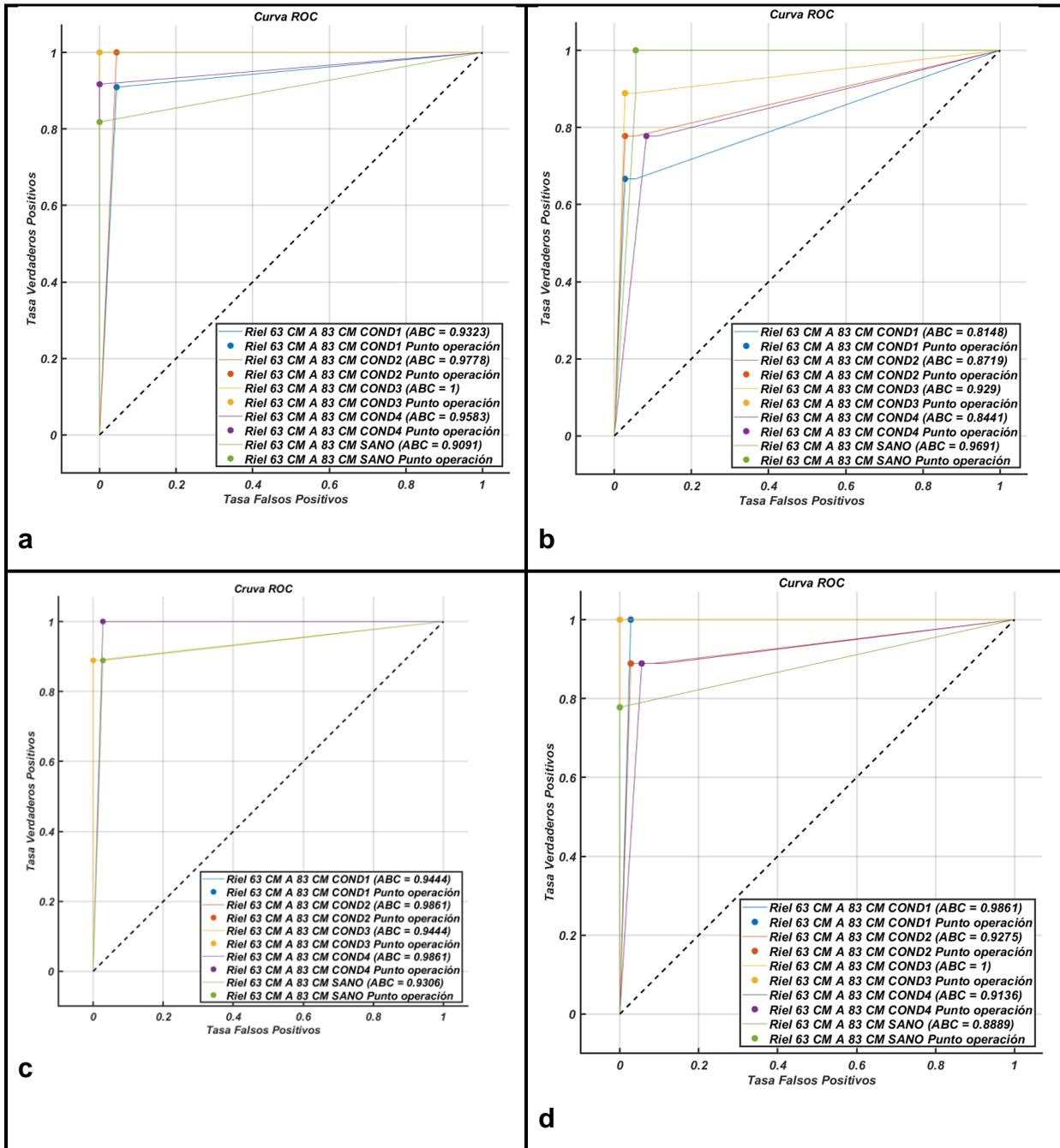


Figura A-10: Donde a) SqueezeNet, b) GoogleNet, c) ResNet-50 y d) ShuffleNet

Fuente: propia

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Oregui, Z. Li , R. Dollevoet. Identification of characteristic frequencies of damaged railway tracks using field hammer test measurements. Delft, Netherlands. (2014).
- [2] G. Idárraga, J. Sánchez, J. Santa, A. Toro. Identificación de mecanismos de desgaste en rieles de vía comercial del metro de Medellín. Medellín. (2014).
- [3] Stuart L Grassie. Studs and squats: The evolving story. Cambridge, United Kingdom. (2016).
- [4] M. Oregui, M. Molodova, A. Nuñez, R. Dollevoet, Z. Li. Experimental investigation into the condition of Insulated rail joints by impact excitation. Delft, Netherlands. (2015).
- [5] Luis A. Bedian. Determinación experimental de los parámetros modales (frecuencias naturales) de una viga en condición empotrada – libre. Veracruz, México. (2010).
- [6] A.P De Man. Dynatrack: A survey of dynamic railway track properties and their quality. Delft, Netherlands. (2002).
- [7] Byoung-Gyu Song, Namcheol Kang. Application of deep neural networks for the parameter identifications of lumped and distributed parameter models under severe noises and various initial values. Daegu, Republic of Korea. (2023).
- [8] Eun-Taik Lee, Yu-Sik Hong and Hee-Chang Eun. Prediction of the physical properties of a structural member by the impact hammer test. Seoul, Korea. (2022).
- [9] Guillermo Montiel-Varela, Alan Domínguez-Vazquez, Ezequiel Gallardo-Hernández, Luigi Bregant and Rafael García-Illescas. Experimental and numerical study for detection of rail defect. Ciudad de México, México. (2017).
- [10] Hongyu Tao and Pan Zhang. Characterization and mitigation of wheel-rail impact at a singular rail defect. Delft, Netherlands. (2022).

- [11] Osama Brinji, W. Kong, G. Tew. Investigating the dynamic response of the ballast. Melbourne, Australia. (2016).
- [12] Anil Kumar, Yuqing Zhou, C.P. Gandhi, Rajesh Kumar, Jiawei Xiang. Bearing defect size assessment using wavelet transform based Deep Convolutional Neural Network (DCNN). Alexandria, Egypt. (2020).
- [13] Yongzhi Qu, Gregory W. Vogl, Zechao Wang. A deep neural network model for learning runtime frequency response function using sensor measurements. Minnesota, USA. (2020).
- [14] Athanasios Synodinos. Identification of railway track components and defects by analysis of wheel-rail interaction noise. Southampton, UK. (2016).
- [15] A. Paral, D. Singha Roy, A. Samanta. A deep learning-based approach for condition assessment of semi-rigid joint of steel frame. Durgapur, India. (2020).
- [16] J. Sresakoolchai, S. Kaewunruen. Detection and severity evaluation of combined rail defects using deep learning. Birmingham, United Kingdom. (2021).
- [17] R. Janeluiktis. Continuous wavelet transform-based method for the enhancing estimation of wind turbine blade natural frequencies and damping for machine learning porpoises. Denmark. (2020).
- [18] X. Du, X. Jin, G. Zhao, Z. Wen, W. Li. Rail corrugation of high-speed railway induced by rail grinding. China. (2021).
- [19] A. Presas, D. Valentin, E. Egusquiza, C. Valero, M. Egusquiza, M. Bossio. Accurate determination of the frequency response function of submerged and confined structures by using PZT-patches. Barcelona. (2017).
- [20] S. Rani. An experimental investigation of cantilever beam using impulse modal analysis technique. India. (2018).

- [21] M. Loidolt, S. Marsching. Evaluating short-wave effects in railway track using the rail surface signal. Graz, Austria. (2022).
- [22] W. Jeong, D. Jeong. Acoustic roughness measurement of railhead surface using an optimal sensor batch algorithm. Daejeon, South Korea. (2020).
- [23] Z. Yuan, S. Zhu, C. Chang, X. Yuan, Q. Zhang. An unsupervised method based on convolutional variational auto-encoder and anomaly detection algorithms for light rail squat localization. Chengdu, China. (2021).
- [24] M. Shadab, M. Ibrahim, I. Sarwar, H. Siddiqui, F. Rustam, E. Lee, I. Ashraf. Railway track inspection using deep learning based on audio to spectrogram conversion: an on-the-fly approach. Gyeongsan, South Korea. (2022).
- [25] Y. Wang, P. Wang, Q. Wang, Z. Chen, Q. He. Using vehicle interior noise classification for monitoring urban rail transit infrastructure. Buffalo, USA. (2020).
- [26] Integrated maintenance planning approach to optimize budget allocation for subway operating systems. Giza, Egypt. (2022).
- [27] A.P De Man. Pin-pin resonance as a reference in determining ballasted railway track vibration behavior. Delft, Netherlands. (2000).
- [28] R. Lewis, P. Christoforou, W.J. Wang, A. Beagles, M. Burstow, S.R. Lewis. Investigation of the influence of rail hardness on the wear of rail and wheel materials under dry conditions (ICRI wear mapping project). Sheffield, United Kingdom. (2019).
- [29] E. Tutumluer, T.D. Stark, D. Mishra. Investigation and mitigation of differential movement at railway transitions for us high speed passenger rail and joint passenger/freight corridors. Pennsylvania, USA. (2012).
- [30] Z. Li, A. Nuñez, M. Molodova, R. Dollevoet. Improvements in axle box acceleration measurements for the detection of light squats in railway infrastructure. Delft, Netherlands. (2015).

[31] Zhiling Guo, Qi Chen ^{1,2}, Guangming Wu , Yongwei Xu, Ryosuke Shibasaki and Xiaowei Shao. Village building identification based on ensemble convolutional neural networks. Wuhan, China. (2017).