

**ESTUDIO DE LA SEÑAL ACÚSTICA EN FUNCIÓN DE LA VIDA DE LA  
HERRAMIENTA EN UN PROCESO DE TALADRADO**

**NICOLÁS OREJARENA OSORIO  
NÉSTOR NORBEY PEÑA GARCÍA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2014**

**ESTUDIO DE LA SEÑAL ACÚSTICA EN FUNCIÓN DE LA VIDA DE LA  
HERRAMIENTA EN UN PROCESO DE TALADRADO**

**NICOLÁS OREJARENA OSORIO  
NÉSTOR NORBEY PEÑA GARCÍA**

**Trabajo de grado para optar al título de  
INGENIERO MECÁNICO**

**Director  
JORGE ENRIQUE MENESES FLÓREZ  
M.Sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2014**

## DEDICATORIA

*A mi madre, María Margarita Osorio  
A mi padre, Alfredo Orejarena Sarmiento  
Por el apoyo incondicional a lo largo de todo mi proceso de formación.  
Sus enseñanzas y consejos fueron decisivos para estar aquí.*

*A mi hermana, Silvia Juliana Orejarena Serrano  
Por ser mi mayor ejemplo.*

*A mi mascota, Shester  
Por su energía y fiel compañía.*

*A Pamra,  
Por permitirme desarrollar habilidades, ayudar a muchas personas y mejorar como ser humano.*

*A la vida,  
Por permitirme estar aquí y tener salud.*

*A todas las personas que conocí en esta etapa de mi vida llamada UFS.*

*Nicolás Orejarena Osorio.*

## **DEDICATORIA**

*A mi padre Néstor Peña Mateus, mi madre Leonor García Ruiz y mis hermanos Jessica y Edwin por su amor y apoyo incondicional en la consecución de mis metas.*

*A mis amigos y compañeros por su ánimo, apoyo y alegría; y a todos aquellos que lean esto.*

*Néstor Norbey Peña García*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al profesor Jorge Enrique Meneses Flórez por su orientación en este proyecto, por su confianza, consejos, recomendaciones para nuestra formación personal y profesional y por creer siempre en nosotros y en nuestro trabajo.

A los ingenieros Franklin Sepúlveda y Cesar Duarte, por su colaboración, ayuda y consejos en este proceso de culminación del presente proyecto.

A Carlos Felipe Orduz Suárez y Julián Quijano por su colaboración.

A todos aquellos que nos colaboraron y brindaron la oportunidad de formarnos como profesionales y como personas en esta institución.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	21
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	24
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	24
1.2 JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA	26
1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	28
1.3.1 Objetivo general	28
1.3.2 Objetivos específicos	28
1.4 ESTADO DEL ARTE	29
2. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO DE LAS SEÑALES ACÚSTICAS EN FUNCIÓN DE LA VIDA DE LA HERRAMIENTA EN UN PROCESO DE TALADRADO.	31
2.1 DISEÑO DEL ENSAYO.	31
2.1.1 Herramienta de corte.	32
2.1.2 Pieza de trabajo.	33
2.1.3 Parámetros de corte.	34
2.1.4 Máquina herramienta.	34
2.1.5 Sujeción de la pieza de trabajo.	35
2.1.6 Distribución y secuencia de taladrado.	35
2.2 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	36
2.2.1 Sensor	37
2.2.2 Hardware de adquisición	37
2.2.3 Sistema de conexiones	38
2.2.4 Software de adquisición	38
2.3 PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES	39
2.3.1 Software de procesamiento.	40
2.3.2. Adecuación de las señales.	40
2.4 ANÁLISIS Y RESULTADOS	40

2.4.1 Dominio tiempo	41
2.4.1.1 Valor eficaz	41
2.4.1.2 Amplitud, Rango y conteo de picos	43
2.4.1.2 Asimetría y curtosis	43
2.4.2 Dominio frecuencia	43
2.4.3 Wavelet	45
3. DISEÑO DEL ENSAYO	47
3.1 HERRAMIENTA DE CORTE	48
3.1.1 Geometría de las brocas	48
3.2 PIEZA DE TRABAJO	49
3.3 PARÁMETROS DE CORTE	50
3.4 MÁQUINA HERRAMIENTA	54
3.5 SUJECIÓN DE LA PIEZA DE TRABAJO	55
3.6 DISTRIBUCIÓN Y SECUENCIA DE TALADRADO.	56
3.6.1 Secuencia mixta	56
3.6.2 Secuencia lineal	58
3.6.3 Secuencia espiral.	58
4. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	59
4.1 SENSOR	59
4.1.1 Ensayo de los micrófonos	62
4.1.2 Ubicación del micrófono	66
4.2 HARDWARE DE ADQUISICIÓN	66
4.3 SISTEMA DE CONEXIONES.	68
4.3.1 Cable coaxial.	68
4.4 SOFTWARE DE ADQUISICIÓN	69
5. ENSAYOS REALIZADOS	72
5.1 ENSAYOS HASTA EL ESTADO DE FALLA	72
5.2 ENSAYOS ADICIONALES	72
6. PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES	74

6.1 SOFTWARE DE PROCESAMIENTO	74
6.2 ADECUACIÓN DE LAS SEÑALES.	75
6.2.1 Conversión de datos	75
6.2.2 Eliminación del offset	75
6.2.3 Selección del intervalo de interés	77
7. ANÁLISIS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO	79
7.1 ANÁLISIS DEL VALOR EFICAZ (RMS)	79
7.1.1 Brocas de 8mm	81
7.1.1.1 Brocas B01 y B02	81
7.1.1.2 Brocas B81 y B82	82
7.1.2 Brocas de 6 mm	83
7.1.2.1 Brocas B61 y B62	83
7.1.2.2 Broca B63	84
7.1.3 Relación Señal/Ruido	85
7.1.4 Relación de potencia Taladrado/Maquina	86
7.1.5 Análisis del valor eficaz en función de la profundidad taladrada	86
7.2 ANÁLISIS DE LA AMPLITUD	89
7.3 ANÁLISIS DEL RANGO	90
7.4 CONTEO DE PICOS	91
7.5 ANÁLISIS DE ASIMETRÍA	91
7.6 ANÁLISIS DE LA CURTOSIS	94
7.7 ANÁLISIS DE LA AUTOCORRELACIÓN	95
7.8 ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN	96
7.9 CONCLUSIONES E HIPÓTESIS GENERALES	97
8. ANÁLISIS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA	100
8.1 ANÁLISIS ESPECTRAL	100
8.1.1 Comportamiento General	100
8.1.1.1 Comportamiento General Broca B01 y B61	100
8.1.1.2 Comportamiento General Broca B81 y B63	102
8.1.2 Comportamiento Promedio	103
8.1.2.1 Brocas de 8 mm	105

8.1.2.2 Brocas de 6 mm	108
8.1.2.3 Maquina en Funcionamiento	110
8.2 ESPECTROGRAMA	111
8.2.1 Broca B01	111
8.2.2 Agujeros finales de las brocas B02, B61 y B62	114
8.2.3 Detección de anomalías ajenas al desgaste	116
8.3 CONCLUSIONES E HIPÓTESIS GENERALES	117
9. ANÁLISIS MEDIANTE EL USO DE LA TRANSFORMADA DE WAVELET	118
9.1 INFLUENCIA DE LA WAVELET MADRE	118
9.2 COMPORTAMIENTO DEL VALOR EFICAZ DE LOS COEFICIENTES RESULTANTES DE WAVELET.	121
9.2.1 Broca B01	121
9.2.2 Broca B02	122
9.2.3 Broca B82	123
9.2.4 Broca B61	123
9.2.5 Broca B62	123
9.2.6 Broca B63	124
9.3 CONCLUSIONES E HIPÓTESIS GENERALES	125
10. CONCLUSIONES	127
RECOMENDACIONES	130
BIBLIOGRAFÍA	132
ANEXOS	135

## LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Hipótesis.....	27
Figura 2. Estructura del estudio.....	31
Figura 3. Broca DORMER.....	33
Figura 4. Pieza de trabajo.....	33
Figura 5. Centro de mecanizado Leadwell V-20.....	34
Figura 6. Sujeción por bridas.....	35
Figura 7. Secuencia de taladrado.....	36
Figura 8. Micrófono.....	37
Figura 9. Módulo NI 9234.....	38
Figura 10. Procesamiento de las señales.....	39
Figura 11. Valor eficaz en función de la vida de la herramienta.....	42
Figura 12. Valor eficaz en función de la profundidad taladrada.....	42
Figura 13. Curtosis en función del numero de agujeros.....	43
Figura 14. Espectros a lo largo de la vida de la broca B02.....	44
Figura 15. Espectrograma del agujero B02117.....	45
Figura 16. Coeficientes Wavelet de la broca B62.....	46
Figura 17. Geometría del material a taladrar.....	50
Figura 18. Selección del material.....	51
Figura 19. Opciones de maquinado.....	52
Figura 20. Parámetros de corte broca 8mm.....	53
Figura 21. Parámetros de corte broca 6mm.....	53
Figura 22. Centro de mecanizado Leadwell V-20.....	54
Figura 23. Sujeción por bridas.....	55
Figura 24. Sujeción de la pieza de trabajo.....	56
Figura 25. Secuencia de taladrado mixta.....	57
Figura 26. Secuencia lineal.....	58
Figura 27. Secuencia en espiral.....	58
Figura 28. Señal de referencia.....	63
Figura 29. Montaje realizado para la selección del micrófono.....	64
Figura 30. Espectro del micrófono 1 a 15 centímetros de la fuente.....	64
Figura 31. Espectro del micrófono 2 a 15 centímetros de la fuente.....	65
Figura 32. Micrófono.....	65
Figura 33. Montaje Final.....	66
Figura 34. Módulo NI cDAQ 917-4.....	67
Figura 35. Módulo NI 9234.....	67
Figura 36. Cable coaxial (RG6 90%).....	68
Figura 37. Conexiones.....	69
Figura 38. Programa para guardar Señales Acústicas.....	70
Figura 39. Procesamiento de las señales.....	74

Figura 40. Eliminación del offset .....	76
Figura 41. Detección del comienzo del taladrado .....	77
Figura 42. Valor eficaz en función de la vida de la herramienta. ....	80
Figura 43. Valor eficaz en la zona 1. Brocas B01 y B02. ....	81
Figura 44. Valor eficaz en función del número de agujeros. Brocas B81 y B82 ....	82
Figura 45. Valor eficaz en la zona 1. Brocas B61 y B62. ....	83
Figura 46. Valor eficaz en función del número de agujeros. Broca B63 .....	84
Figura 47. Valor eficaz en función de la vida y la profundidad taladrada de la broca B01. ....	87
Figura 48. Valor eficaz en función de vida y profundidad de la broca B01. ....	88
Figura 49. Valor eficaz en función de la vida y la profundidad taladrada de la broca B61. ....	88
Figura 50. Amplitud en función de la vida de la herramienta. ....	89
Figura 51. Rango en función de la vida de la herramienta.....	90
Figura 52. Cantidad de picos en función de la vida de la herramienta.....	91
Figura 53. Asimetría en función de la cantidad de agujeros .....	92
Figura 54. Agujero B61305 .....	93
Figura 55. Detalle del agujero B61305.....	93
Figura 56. Curtosis en función de la vida de las brocas.....	95
Figura 57. Auto correlación en función de la vida de las brocas. ....	96
Figura 58. Correlación en función de la vida de las brocas. ....	97
Figura 59. Espectro en función de la vida de la broca B01 .....	101
Figura 60. Espectro en función de la vida de la broca B61 .....	101
Figura 61. Espectro en función de la vida de la broca B81.....	102
Figura 62. Espectro en función de la vida de la broca B63.....	103
Figura 63. Espectro Promedio brocas B01, B81 y B61 .....	105
Figura 64. Espectro Promedio brocas B01, B02 y Maquina en funcionamiento ..	106
Figura 65. Espectro Promedio brocas B01, B02 y Maquina en funcionamiento ..	107
Figura 66. Espectro Promedio brocas B61, B62 y Maquina en funcionamiento ..	108
Figura 67. Espectro Promedio broca B63 .....	109
Figura 68. Espectro Promedio de la Maquina en funcionamiento.....	110
Figura 69. Espectrograma del agujero B01060 .....	111
Figura 70. Espectrograma del agujero B01061 .....	112
Figura 71. Espectrograma del agujero B01062 .....	112
Figura 72. Espectrograma del agujero B01063 .....	113
Figura 73. Espectrograma del agujero B01064 .....	113
Figura 74. Espectrograma del agujero B01074 .....	114
Figura 75. Espectrograma del agujero B02117 .....	115
Figura 76. Espectrograma del agujero B61572 .....	115
Figura 77. Espectrograma del agujero B62592 .....	116
Figura 78. Espectrograma del agujero B61305.....	116
Figura 79. Descomposición Wavelet multinivel.....	119
Figura 80. Energía del coeficiente de aproximación .....	119
Figura 81. Energía de los coeficientes usando la wavelet db4 .....	120
Figura 82. Influencia de las wavelets madre. ....	120

Figura 83. Coeficientes de wavelet en función de la vida de la broca B01. ....	121
Figura 84. Coeficientes de wavelet en función de la vida de la broca B02. ....	122
Figura 85. Coeficientes de wavelet en función de la vida de la broca B02. ....	122
Figura 86. Coeficientes de wavelet en función de la vida de la broca B61. ....	123
Figura 87. Coeficientes de wavelet en función de la vida de la broca B62. ....	124
Figura 88. Coeficientes de wavelet en función de la vida de la broca B63. ....	125

## LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Parámetros del diseño. ....	28
Tabla 2. Parámetros de corte.....	34
Tabla 3. Nomenclatura.....	39
Tabla 4. Ensayos realizados.....	41
Tabla 5. Geometría de las brocas.....	49
Tabla 6. Propiedades del acero SAE 4140.....	50
Tabla 7. Parámetros de corte y datos de operación.....	54
Tabla 8. Características técnicas Leadwell V-20.....	55
Tabla 9. Características micrófono 1.....	60
Tabla 10. Características micrófono 2.....	61
Tabla 11. Tipos de conexión.....	69
Tabla 12. Nomenclatura.....	70
Tabla 13. Componentes del programa de adquisición.....	71
Tabla 14. Información de los ensayos.....	72
Tabla 15. Variación del refrigerante.....	73
Tabla 16. Comportamiento de los ensayos adicionales.....	73
Tabla 17. Voltaje eficaz de los canales del modulo.....	76
Tabla 18. Definición de las zonas de interés.....	80
Tabla 19. Relación Señal/Ruido.....	85
Tabla 20. Relación de potencia Taladrado/Maquina.....	86
Tabla 21. Zonas de Interés.....	104

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. COSTOS PROYECTO DE GRADO.....	136
ANEXO B. MARCO TEÓRICO .....	137
ANEXO C. CÓDIGOS DE PROGRAMACIÓN .....	152

## RESUMEN

**TÍTULO:** ESTUDIO DE LA SEÑAL ACÚSTICA EN FUNCIÓN DE LA VIDA DE LA HERRAMIENTA EN UN PROCESO DE TALADRADO\*

**AUTORES:** NICOLÁS OREJARENA OSORIO  
NÉSTOR NORBEY PEÑA GARCÍA\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Taladrado, broca, señal acústica, vida de la herramienta, RMS, Espectrograma, Wavelet.

### DESCRIPCIÓN:

El objetivo de este proyecto se basó en el estudio de las señales acústicas propias de los procesos de taladrado y para ello, se extrajeron las principales características de aquellas señales, las cuales, tienen el potencial de ser usadas en la alimentación de sistemas de control que apoyados en algoritmos de decisión, lograrán realizar diagnósticos finales sobre el estado de la herramienta.

El desarrollo de esta investigación inició con el diseño de un ensayo que garantizara la calidad de las señales capturadas y con aquel fin, se realizaron cuatro (4) ensayos llevando la herramienta de corte (broca) a presentar la falla y tres (3) ensayos adicionales, con el propósito de explorar la incidencia del sensor (micrófono) y el refrigerante en el comportamiento de la señal acústica.

Posteriormente, se diseñó un sistema de adquisición de señales acústicas, el cual estaba compuesto, principalmente, de un sensor que se encargó de capturar la señal, para enseguida adecuarla y almacenarla en el equipo de cómputo a través de módulos especializados de la compañía *National Instruments*.

Luego se procesaron y analizaron aquellas señales a través de numerosas técnicas, tanto en el dominio del tiempo y de frecuencia como en el dominio tiempo-frecuencia por medio de la transformada Wavelet y cuyos resultados finalmente, permitieron plantear diversas hipótesis y extraer características e información valiosa que en definitiva, condujo a proponer posibles técnicas de monitoreo.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: M.Sc. Jorge Enrique Meneses Flórez.

## SUMMARY

**TITLE:** STUDY OF SOUND SIGNAL BASED ON THE LIFE OF THE TOOL IN A PROCESS OF DRILLING \*

**AUTHORS:** NICOLÁS OREJARENA OSORIO  
NÉSTOR NORBEY PEÑA GARCÍA \*\*

**KEY WORDS:** Drilling, drill bit, acoustic signal, life of the tool, RMS, spectrogram, Wavelet.

### DESCRIPTION:

The objective of this project was based on the study of acoustic signals of processes of drilling and for this, we extracted the main characteristics of those signals, which have the potential to be used in the power of control systems that supported on decision algorithms, will achieve final diagnosis on the condition of the tool.

This research started with the design of a trial that guarantees the quality of the captured signals and to that end, four (4) tests taking cutting tool (bit) to failure and three (3) additional trials, with the purpose of exploring the incidence of the sensor (microphone) and coolant on the behavior of the acoustic signal that is performed. Subsequently, we designed a system of acoustic signal acquisition, which was composed mainly of a sensor that was commissioned to capture the signal, to immediately adapt it and store it in the computer equipment via specialized modules of the National Instruments Company.

Then they were processed and analyzed those signals through numerous techniques, both in the domain of time and frequency by means of the Wavelet time-frequency domain and whose results ultimately allowed propose various hypotheses and extract features and valuable information that led to suggest possible techniques of monitoring.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: M.Sc. Jorge Enrique Meneses Flórez.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha aumentado la importancia de la automatización de los procesos industriales, en especial en los procesos de mecanizado, conllevando al aumento de la productividad y la mejora en la calidad de los productos. A pesar de la gran versatilidad y precisión en la elaboración de los mismos el desgaste en la herramienta de corte aun juega un papel importante.

De las diversas técnicas para el monitoreo del estado de las herramientas de corte, se encuentran una serie de limitantes al momento de su aplicación, conllevando al desarrollo de toda una interesante línea de investigación cuyos estudios continúan en la actualidad. En consecuencia, una de las técnicas empíricas, ampliamente usada, está basada en la experimentada capacidad auditiva de los operarios de máquinas-herramientas y en vista de ello, lo anterior conllevó al desarrollo de esta investigación, en la que se propuso una alternativa de monitoreo, basada en el amplio estudio y análisis de señales acústicas propias de los procesos de taladrado y de esta manera, se obtuvo un compendio de información beneficiosa y útil.

No obstante, esta investigación tiene el potencial de ser fácilmente aplicada, ya que propone soluciones económicas y prácticas que no interfieren con los procesos de maquinado y que además, requieren de una mínima cantidad de elementos adicionales debido a que se pueden implementar por medio del mismo equipo de cómputo encargado del correcto funcionamiento de los centros de mecanizado.

Por otra parte, las técnicas de monitoreo que puedan llegar a surgir de esta investigación así como de trabajos posteriores, traerán múltiples beneficios, en especial para aquellas empresas con altos volúmenes de producción, permitiendo

un manejo eficiente de los recursos disponibles y en consecuencia, ahorro de tiempo y dinero.

Es de subrayar que en esta investigación, se enlazan y profundizan conocimientos propios de otras áreas como el tratamiento de señales e instrumentación, aplicaciones que se han venido acrecentando en los últimos años a lo largo de diversas disciplinas como la ingeniería mecánica, sobre todo en países en desarrollo como Brasil.

El desarrollo de esta investigación se inició con el diseño detallado de un ensayo que garantizara la calidad de las señales capturadas, para el cual se consideraron varios aspectos como la confiabilidad tanto de la máquina como de los materiales y herramientas a usar, lo cual se recopiló en el capítulo 3.

En el capítulo 4, se detalló la implementación de un sofisticado pero práctico sistema de adquisición de datos, el cual estaba compuesto principalmente de un sensor que captura la señal, para enseguida adecuarla y almacenarla en el equipo de cómputo, a través de módulos especializados de la compañía National Instrumens.

Los comportamientos de las brocas usadas y sus características de operación, se presentan en el capítulo 5. Más tarde en el capítulo 6, se presentan los programas diseñados bajo el entorno de programación MATLAB, con el propósito de adecuar y extraer aquellas zonas de interés de las señales.

Los capítulos 7, 8 y 9 reúnen los análisis de aquellas señales, a través de numerosas técnicas, algunas comúnmente aplicadas como la transformada de Fourier y otras un tanto más complejas como la transformada Wavelet, que permitieron plantear diversas hipótesis y extraer características e información valiosa.

En base a los análisis realizados se plantearon diversas hipótesis y se extrajeron características e información valiosa que en definitiva, condujo a proponer posibles técnicas de monitoreo y de esta manera, se establecieron importantes precedentes en el monitoreo a través del sonido en el capítulo 10.

# 1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria manufacturera tiene como base o nivel más bajo dentro de su estructura a los procesos de maquinado, los cuales en los últimos años han presentado tendencia a la automatización con la creación de las maquinas de control numérico computarizado CNC. Éstas últimas han brindado una gran versatilidad y precisión en la elaboración de piezas, pero en sus procesos, el desgaste de la herramienta de corte aún juega un papel importante ya que afecta considerablemente la calidad de las piezas de trabajo, tal como se aprecia en el estudio realizado por M.A.Mannan et. al. (2008)<sup>1</sup>, lo cual conduce a involucrar procesos adicionales que finalmente aumentan los costos de producción.

Para asegurar calidad en la pieza final, se requiere garantizar que el desgaste de la herramienta de corte se encuentre dentro del rango deseado, de tal modo que al sobrepasarlo, la herramienta sea sustituida inmediatamente por una nueva. Pero a pesar del desarrollo tecnológico actual, el sector manufacturero aún utiliza métodos empíricos en la evaluación de la vida útil de la herramienta, tales como el número de horas de maquinado. En esta técnica, al cumplirse el número de horas, se procede a remover la herramienta sin importar el estado en que se encuentra la misma, lo cual es útil solo en casos donde la herramienta opere en materiales homogéneos, bajo los mismos parámetros y condiciones de corte a lo largo de su vida útil.

---

<sup>1</sup> MANNAN, M.A.; KASSIM, Ashraf; and JING, Ma. Application of image and sound analysis techniques to monitor the condition of cutting tools. [online]. Disponible en internet: <http://www.sciencedirect.com/>. 18 de Mayo, 2000.

Otra estrategia que se investigó es la presentada por S.Rajesh y K.Marimuthu<sup>2</sup> en la cual se apreció una relación entre la corriente consumida por el husillo y el desgaste de la herramienta de corte, asociados mediante la fricción y la fuerza de trabajo. Sin embargo, estas señales presentaron fluctuaciones debido a que son mediciones indirectas del proceso.

Por otra parte se conoce otra estrategia comúnmente usada por los operarios de estos equipos, la cual se basa en el uso de su experimentada facultad auditiva para percibir cambios en los sonidos generados durante el proceso y así, permitirles estimar la capacidad de corte de la herramienta.

La anterior estrategia condujo a plantear la posibilidad de automatizarla, en donde, por medio del uso de sensores se captó la señal acústica para su posterior tratamiento y análisis.

En consecuencia, se requirió el planteamiento de un procedimiento experimental que proporcionó la información necesaria para averiguar acerca de la posible existencia de una relación entre la señal acústica y el grado de desgaste de la herramienta.

---

<sup>2</sup> RAJESH, S. *et al.* Online Drill Wear Monitoring System through Cutting Current Signals by using Virtual Instrumentation. Disponible en internet: <http://www.sciencedirect.com/>.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

Es evidente que las empresas más competitivas a nivel mundial son aquellas que poseen alto contenido técnico y tecnológico, ya que esto es indispensable para el mejoramiento de los procesos. Al lograr que la industria manufacturera y la academia se enfoquen en la automatización se permitirá la reducción de los tiempos de producción y el mejoramiento de la calidad de los productos, para así, obtener un bien o servicio con valor agregado y finalmente, crecer y expandirse a otros mercados.

Actualmente la industria manufacturera no cuenta con sistemas adecuados de monitoreo del estado de la herramienta de corte que complementen las labores de automatización, ya que aunque existen diversas técnicas para monitorear el estado de la herramienta, de manera directa o indirecta, están en continua investigación y aun presentan inconvenientes como sus elevados costos o la dificultad practica de ser empleados en entornos industriales.

Es importante desarrollar un sistema practico para el monitoreo del estado de la herramienta para promover la automatización en el proceso de corte de metal y así aumentar la productividad, ya que se necesita desarrollar estrategias que eviten que las maquinas herramientas continúen trabajando de manera automática después de que la herramienta ha fallado o para evitar que la herramienta sea cambiada antes de ser alcanzado el máximo de su vida útil. Es por ello, que este proyecto de grado buscó investigar la posible relación existente entre la vida de la herramienta y la señal acústica generada por está durante el proceso de maquinado, lo cual permitió conocer si el sonido era una variable adecuada para realizar el monitoreo del estado de la herramienta. (Ver figura 1)

Figura 1. Hipótesis.



El desarrollo de este proyecto de grado constituyó un aporte importante al mejoramiento de la adquisición, compilación y análisis de señales propias de los procesos de mecanizado, lo cual permitió extraer sus principales características, las cuales podrían ser usadas en la alimentación de sistemas de control, que apoyados en algoritmos de decisión logren realizar diagnósticos finales sobre el estado de la herramienta.

## 1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

### 1.3.1 Objetivo general

Fortalecer el propósito misional de la Universidad Industrial de Santander, con la generación y adecuación de conocimientos para las necesidades de las diversas ramas de la industria, en especial la manufactura, mediante el estudio del sonido en un proceso de taladrado para determinar su posible relación con la vida de la herramienta lo cual podría contribuir a nuevas estrategias para el monitoreo del estado de la misma.

### 1.3.2 Objetivos específicos

1. Diseñar y realizar un ensayo para determinar si existe alguna relación entre la señal acústica y la vida de la broca con los siguientes parámetros:

Tabla 1. Parámetros del diseño.

Herramienta de corte	Parámetros Taladrado	Material de trabajo
<b>Broca helicoidal</b>	Velocidad de rotación: 1061 y	Acero AISI-SAE
<b>DORMER</b>	796rpm	4140
<b>Diámetros: 6 y 8mm</b>	Velocidad de corte: 20m/min	
<b>HSS templado al vapor</b>	Avance: 0,109 y 0,138mm/rev Corte con refrigerante	

2. Analizar el comportamiento de la señal adquirida en el **dominio del TIEMPO** mediante el procesamiento en MATLAB, teniendo en cuenta las siguientes características:
  - Valor eficaz (RMS) de la señal de cada agujero y variación con la profundidad taladrada.
  - Amplitud.

- Rango.
- Asimetría.
- Curtosis.
- Autocorrelación.
- Correlación.
- Conteo de picos.

3. Analizar el comportamiento de la señal adquirida en el **dominio de la FRECUENCIA** mediante el uso de la transformada rápida de Fourier (FFT) para generar el espectro de potencia y el espectrograma.
4. Analizar el comportamiento de la señal adquirida mediante el uso de la **transformada de WAVELET** discreta a través de MATLAB.

#### 1.4 ESTADO DEL ARTE

En la literatura se encontraron interesantes investigaciones acerca de la caracterización de los procesos de corte y las herramientas usadas, por medio de la medición de algunos parámetros como el torque de la máquina y la emisión acústica. Es de aclarar que la emisión acústica es un fenómeno físico donde una onda es producida por el proceso de maquinado y se transmite por medio del material de trabajo.

De esta manera, Patra<sup>3</sup> usó el análisis de wavelet para caracterizar el proceso de taladrado por medio de la descomposición de las señales de emisión acústica en sus coeficientes y posteriormente, entrenó una red neuronal con aquellos de mayor energía. Además, con éste análisis, se establecieron cinco secciones en la

---

<sup>3</sup> PATRA, Karali. Acoustic emission based tool condition monitoring system in drilling. [online]. Disponible en internet: <http://www.sciencedirect.com/>. 6 de Julio, 2011.

perforación de cada agujero, como se presenta en el trabajo de Quadro<sup>4</sup>, se aplicaron análisis estadísticos y se dividieron las señales en segmentos conllevando a plantear diversas hipótesis<sup>5</sup>.

Por otra parte, Mannan<sup>6</sup> caracterizó el proceso de torneado por medio del análisis de la superficie mecanizada a través de técnicas de imágenes y con el análisis de wavelet, se descompuso el sonido propio del proceso y concluyó que algunos coeficientes se relacionan con el desgaste.

Finalmente, Boutros<sup>7</sup> [5] por medio del estudio del sonido en el proceso de fresado, determinó zonas espectrales de interés y así, estableció patrones de comportamiento para conformar una base de datos que posteriormente, alimentarían un modelo de detección como lo es Markov.

Después de todo, la información consultada constituyó un aporte importante para conocer diferentes métodos de análisis de señales caracterizadas por su alto contenido aleatorio como posibles aplicaciones que puedan llegar a surgir.

---

<sup>4</sup> QUADRO, Alexandre L. y BRANCO, J.R.T. Analysis of the acoustic emission during test. [online]. Disponible en internet: <http://www.sciencedirect.com/>. 1997.

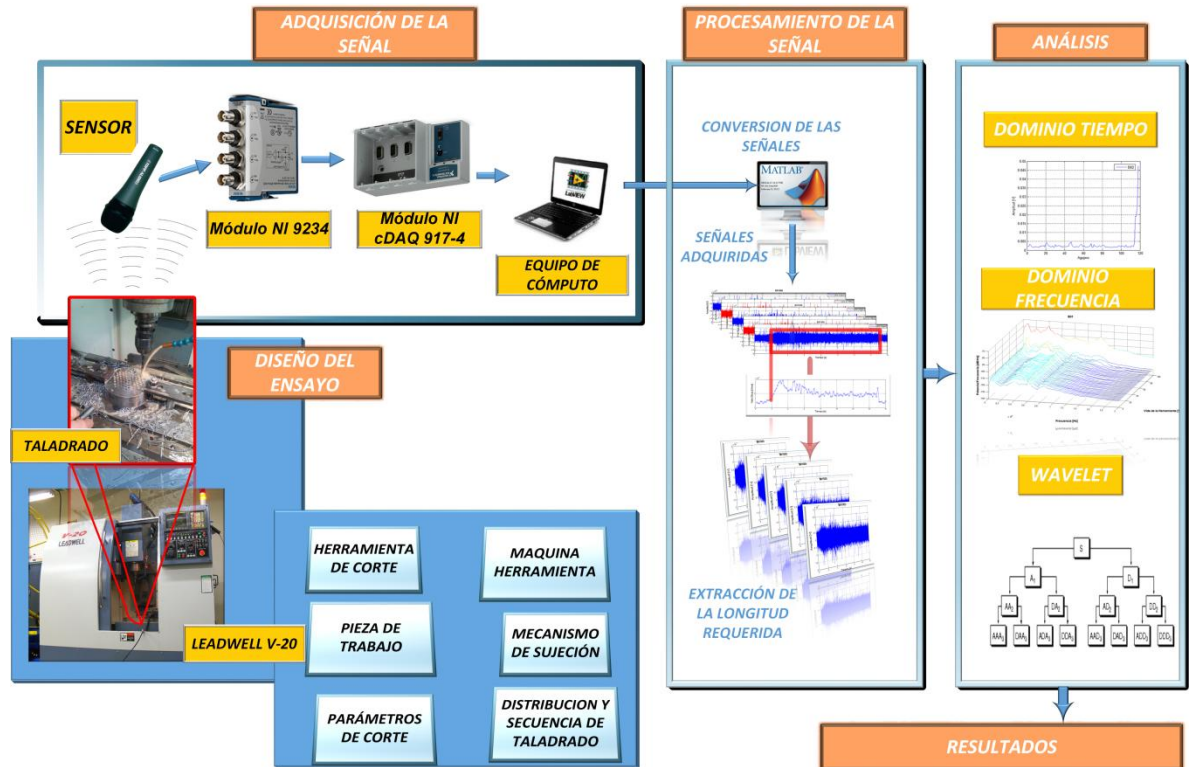
<sup>5</sup> HEINEMANN, Robert y HINDUJA, Sri. A new strategy for tool condition monitorin of small diameter twist drills in deep-hole drilling. [online]. Disponible en internet: <http://www.sciencedirect.com/>. 22 de Septiembre, 2011.

<sup>6</sup> MANNAN, M.A.; KASSIM, Ashraf; and JING, Ma. Application of image and sound analysis techniques to monitor the condition of cutting tolos. [online]. Disponible en internet: <http://www.sciencedirect.com/>. 18 de Mayo, 2000.

<sup>7</sup> BOUTROS, Tony y LIANG, Ming. Detection and diagnosis of bearing and cutting tool faults using hidden Markov models. [online]. Disponible en internet: <http://www.sciencedirect.com/>. 2 de Febrero, 2011.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO DE LAS SEÑALES ACÚSTICAS EN FUNCIÓN DE LA VIDA DE LA HERRAMIENTA EN UN PROCESO DE TALADRADO.

Figura 2. Estructura del estudio.



En la figura anterior se da a conocer la estructura general que conformó lo desarrollado en este proyecto investigación y ahora, se esbozará brevemente cada una de sus etapas dando una sencilla descripción tanto de los equipos e implementos usados así como aquellos criterios que conllevaron a su selección.

### 2.1 DISEÑO DEL ENSAYO.

La idea básica de cada ensayo implicó inducir la falla en la herramienta de corte, perforando un número indeterminado de agujeros, considerando como criterio de

falla un aumento muy considerable en la intensidad de sonido percibida por el operario.

En este proyecto se realizaron cuatro (4) ensayos, llevando la herramienta de corte a presentar falla. Tres (3) ensayos adicionales se llevaron a cabo sin provocar la falla de la herramienta de corte, con el propósito de explorar la incidencia en el comportamiento de la señal acústica, de variables tales como el sensor (micrófono) y el refrigerante.

El desarrollo de esta investigación se inició con el diseño detallado de lo que sería un ensayo, con las siguientes premisas establecidas:

1. Facilidad para realizar el mecanizado repetitivo de agujeros.
2. Garantizar que los parámetros de corte establecidos fueran constantes y repetibles.
3. Garantizar la calidad de las señales capturadas, es decir, que las mismas no fueran afectadas por las condiciones de funcionamiento de la máquina herramienta y además, presentaran una baja influencia del ruido externo.

El diseño del ensayo implicó:

- a. Establecer la herramienta de corte
- b. Establecer el Material a utilizar
- c. Determinar los parámetros de corte
- d. Determinar la máquina herramienta a utilizar
- e. Diseñar la forma de sujeción del material
- f. Diseñar la distribución y secuencia del taladrado

### **2.1.1 Herramienta de corte.**

Se realizó una búsqueda de trabajos previos acerca del proceso de taladrado, lo cual permitió tener referentes acerca de marcas comerciales de herramientas (brocas), posibles diámetros a utilizar y estimaciones acerca de la vida útil de las

mismas. En este proyecto se emplearon siete (7) brocas marca DORMER (ver figura 3):

- ✓ 4 de 8 mm de diámetro
- ✓ 3 de 6 mm de diámetro

Figura 3. Broca DORMER.

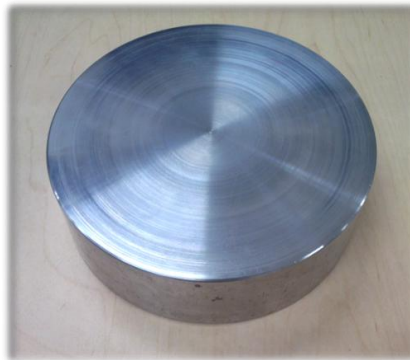


### **2.1.2 Pieza de trabajo.**

En base a la dureza, se eligió el acero SAE 4140 como material de trabajo y con ello se buscó hacer fallar la herramienta en un numero bajo de operaciones de taladrado. Un numero bajo de operaciones de taladrado implicaría tener que adquirir, manipular y procesar un menor volumen de información acústica.

En el ensayo diseñado, se estableció una profundidad de 25 mm para los agujeros a realizar. Limitados por la disponibilidad comercial, se utilizaron piezas cilíndricas de 6 pulgadas de diámetro, por 2 pulgadas de longitud (ver figura 4).

Figura 4. Pieza de trabajo.



### 2.1.3 Parámetros de corte.

Los parámetros de corte (ver tabla 2) fueron establecidos a partir de la utilización de software de los fabricantes de brocas. Para cada una de las brocas utilizadas, fueron especificados como parámetros de corte: la velocidad de rotación, la velocidad de corte y el avance.

Tabla 2. Parámetros de corte.

Diámetro de la broca	Velocidad de rotación (rpm)	Velocidad de corte [m/min]	Avance [mm/rev]
6 mm	1061	20	0,109
8 mm	796	20	0,138

### 2.1.4 Máquina herramienta.

Se utilizó el centro de mecanizado Leadwell V-20 (ver figura 5) ubicado en el laboratorio de sistemas flexibles de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, el cual permite alcanzar velocidades de 8000RPM con recorridos de 510mm y 350mm en los ejes X e Y respectivamente.

Figura 5. Centro de mecanizado Leadwell V-20.

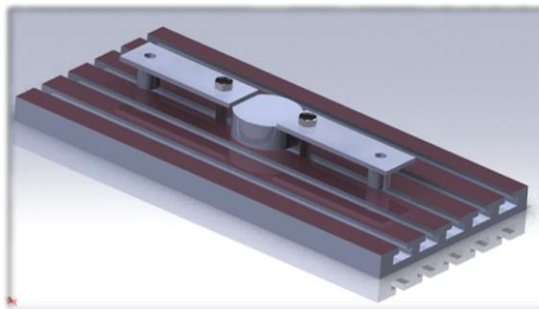


Por otra parte, su elección correspondió a que ésta se encuentra en óptimas condiciones de funcionamiento lo cual brindó garantía y repetitividad en los ensayos así como calidad en las señales capturadas.

### **2.1.5 Sujeción de la pieza de trabajo.**

Se diseñó un sistema de sujeción compuesto por dos bridas (ver figura 6), las cuales se encargaron de fijar el material, a través de sus extremos, a la mesa de la máquina y logrando con ello, reducir considerablemente la cantidad de vibraciones que podían afectar la calidad de las señales acústicas.

Figura 6. Sujeción por bridas.

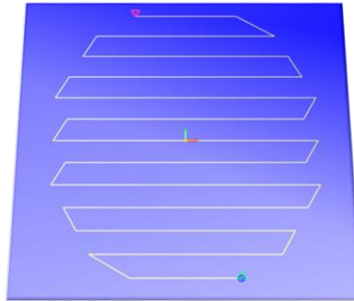


### **2.1.6 Distribución y secuencia de taladrado.**

Se establecieron tres secuencias de taladrado (ver figura 7) con el objeto de:

- ✓ Estudiar la posible influencia en las señales acústicas de algunos factores como la simetría de maquinado y la variación de dureza presente en la pieza de trabajo.
- ✓ Obtener un buen aprovechamiento del material.

Figura 7. Secuencia de taladrado.



## 2.2 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Se diseñó un sistema de adquisición de señales acústicas, el cual se encuentra conformado por algunos dispositivos especializados que fueron seleccionados considerando los siguientes aspectos:

- a) Conservar la calidad de la señal original.
- b) Facilitar la detección de errores en el funcionamiento del sensor y de su instrumentación auxiliar por medio de una visualización directa de las señales.

En base a lo anterior, el desarrollo del sistema de adquisición implicó:

- a) Seleccionar el sensor adecuado para señales acústicas el cual corresponde a un micrófono con amplia respuesta en frecuencia.
- b) Seleccionar un hardware especializado en la adquisición de señales acústicas.
- c) Desarrollar un sistema de conexión entre los diferentes dispositivos.
- d) Diseñar un programa que permita visualizar y almacenar los datos.

El sistema de adquisición de datos comprendió un componente hardware y un componente software, los cuales se describen a continuación:

### 2.2.1 Sensor

Para este ensayo el micrófono (ver figura 8) debía tener las siguientes características:

- ✓ Patrón polar que favorezca la captura de las señales acústicas en dirección al proceso de taladrado y reduzca la influencia de sonidos provenientes de otras direcciones.
- ✓ Respuesta plana en frecuencia es decir, lograr adquirir la señal sin alterarla.
- ✓ Rango de frecuencia amplio, en otras palabras, que capte frecuencias cercanas al rango audible (20Hz-20KHz).

Se adquirieron dos micrófonos a los cuales se les diseñó y realizó un ensayo con el propósito de obtener sus respectivas respuestas en frecuencia y contrastarlas con lo proporcionado por el fabricante. En vista de los resultados obtenidos, se decidió usar ambos micrófonos para observar su influencia en la adquisición de la señal.

Figura 8. Micrófono.



### 2.2.2 Hardware de adquisición

Se seleccionó un hardware de adquisición a partir de las siguientes características:

- ✓ Confiabilidad.
- ✓ Amplio rango de medición en frecuencia.
- ✓ Excelente resolución.

Se eligió el chasis NI 917-4 de la compañía National Instruments, el cual posee una resolución de 32 Bits y está diseñado con 4 ranuras para sistemas pequeños y portátiles de pruebas de medidas mixtas a través de la incorporación de módulos.

Además, se escogió el módulo NI 9234 (ver figura 9) especializado para realizar medidas de audio de alta precisión a través de micrófonos, con una máxima velocidad de muestreo de 51200Ks/s, resolución de 24Bits con filtro anti-aliasing y con un rango de entrada de +/- 5V.

Figura 9. Módulo NI 9234.



### 2.2.3 Sistema de conexiones

Se diseñó una conexión que permitiera la comunicación eficiente entre los dispositivos y con ese fin, se investigó por aquellas características que brindaran la protección a las señales contra interferencias y sobre todo, con bajas impedancias para un mayor alcance de la información.

### 2.2.4 Software de adquisición

El software se seleccionó en base a los siguientes criterios:

- ✓ Confiabilidad en el manejo de las señales acústicas.
- ✓ Visualización directa de las señales adquiridas para la detección de posibles errores durante la captación.
- ✓ Almacenamiento de la información de manera sistemática mediante la siguiente nomenclatura:

Tabla 3. Nomenclatura.

NOMBRE: BXXYYY	
XX	Broca usada
YYY	Número de agujero

Se eligió el software LabVIEW porque su lenguaje de programación gráfico de alto nivel, permitió la rápida y sencilla elaboración de un programa con una interfaz gráfica amigable, sin la necesidad de gran experiencia en su entorno.

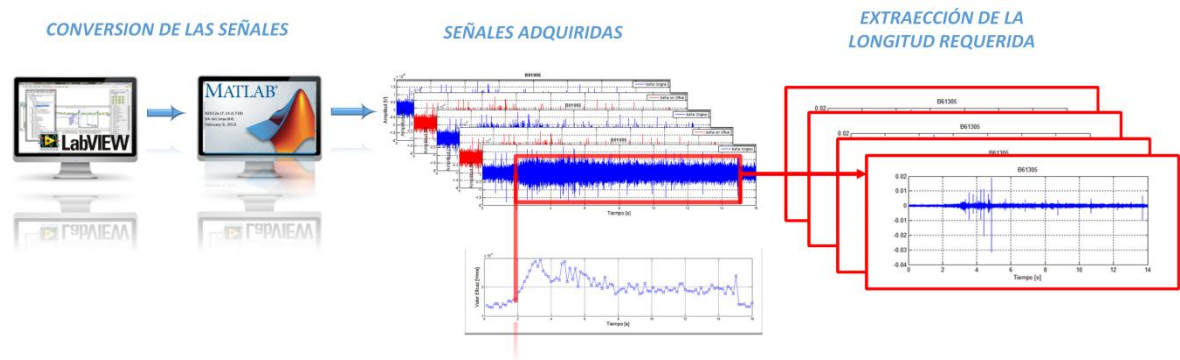
### 2.3 PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES

Una vez almacenadas las señales y con el propósito de recortar y extraer solo aquella información correspondiente al proceso de taladrado, se introdujo una etapa previa a los respectivos análisis, en la cual se efectuó una adecuación de las mismas (ver figura 10).

La etapa de procesamiento involucró:

- Seleccionar el software de procesamiento.
- Adecuar las señales.

Figura 10. Procesamiento de las señales.



### **2.3.1 Software de procesamiento.**

Se seleccionó el software MATLAB porque permitió:

- ✓ Un procesamiento sistemático y eficiente de grandes volúmenes de información.
- ✓ Uso de toolboxes especializados en procesamiento de señales y la transformada de wavelet para la ejecución de los análisis correspondientes.

### **2.3.2. Adecuación de las señales.**

Se diseñaron programas en el entorno MATLAB encargados de realizar las siguientes tareas:

- ✓ Conversión de datos debido a la incompatibilidad de formato entre el software de adquisición (LabVIEW) y el software de procesamiento (MATLAB).
- ✓ Eliminación del offset producido por defecto en los dispositivos de adquisición.
- ✓ Selección del intervalo de interés como consecuencia de la adquisición de las señales desde un momento previo al taladrado hasta su finalización, lo cual conllevó a tener señales de diferentes tamaños y con datos que no eran propios al proceso.

## **2.4 ANÁLISIS Y RESULTADOS**

En esta investigación acerca de la posible relación existente entre la vida de la herramienta y la señal acústica generada por ésta durante el proceso de maquinado, se extrajeron características importantes que permitieron conocer si el sonido es una variable adecuada para realizar el monitoreo del estado de la herramienta.

En la siguiente tabla se observa la cantidad de agujeros realizados por cada broca y su estado final:

Tabla 4. Ensayos realizados

Broca	Diámetro (mm)	Cantidad de agujeros	Estado final
<b>B01</b>	8	74	Falló
<b>B02</b>	8	118	Falló
<b>B61</b>	6	573	Falló
<b>B62</b>	6	592	Falló
<b>B81</b>	8	74	No falló
<b>B82</b>	8	118	No falló
<b>B63</b>	6	149	No falló

Se llevaron a cabo los siguientes análisis:

- ✓ En el dominio del tiempo.
- ✓ En el dominio de la frecuencia.
- ✓ Transformada de Wavelet.

#### **2.4.1 Dominio tiempo**

Se decidió analizar el comportamiento de las señales respecto al tiempo, donde se extrajeron las siguientes características:

##### **2.4.1.1 Valor eficaz**

Se calculó el valor eficaz de cada agujero conllevando a apreciar dos zonas a lo largo de la vida como se presenta a continuación:

- ✓ La primera zona corresponde aproximadamente al 95% de la vida de las herramientas y presentó una baja variación, lo cual es interesante ya que la herramienta se desgastó progresivamente.

Figura 11. Valor eficaz en función de la vida de la herramienta.

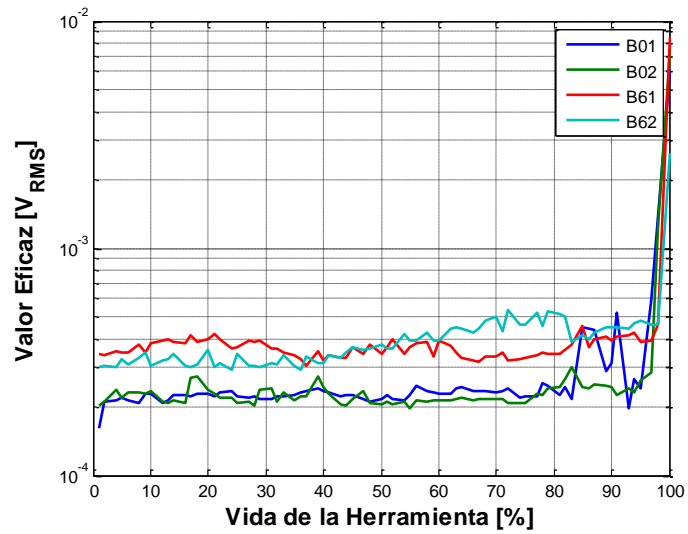
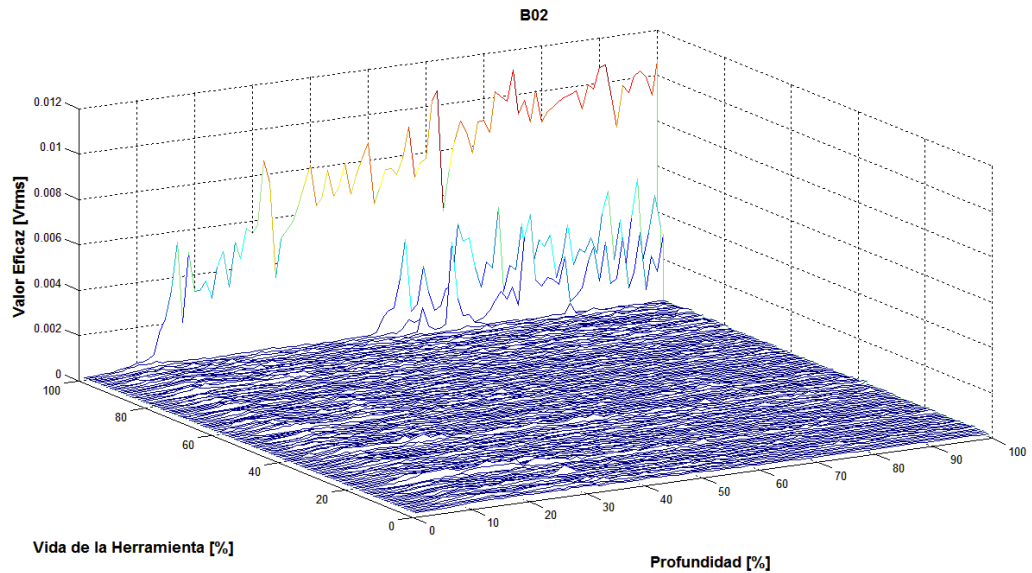


Figura 12. Valor eficaz en función de la profundidad taladrada.



- ✓ La segunda zona corresponde al final de la vida de la herramienta y presentó un abrupto incremento en la medición.

- ✓ El incremento del valor eficaz presente en la segunda zona de la vida de la herramienta, se concentró en su mayoría al final de cada agujero. (ver figura 12)

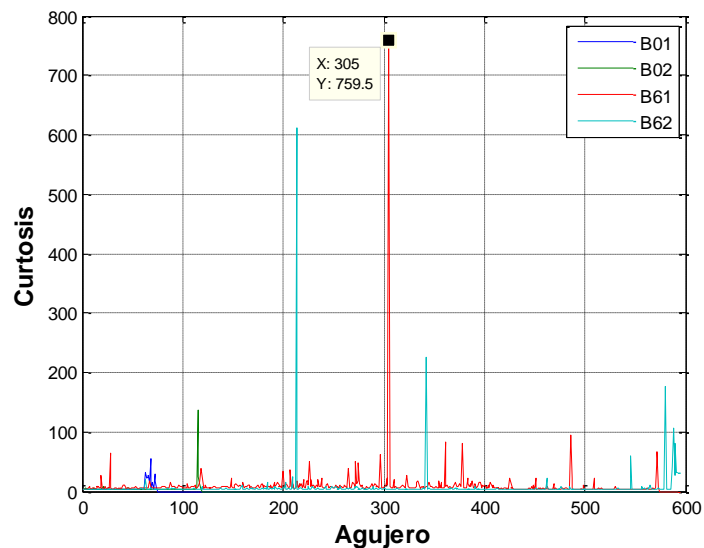
#### 2.4.1.2 Amplitud, Rango y conteo de picos

Estos análisis mostraron un comportamiento similar al valor eficaz, lo cual no es de extrañar debido a que guardan cierta relación.

#### 2.4.1.2 Asimetría y curtosis

Estos análisis resultaron tener un comportamiento independiente del desgaste de la herramienta de corte (ver figura 13), sin embargo presentan un alto valor para aquellas anomalías de corta duración.

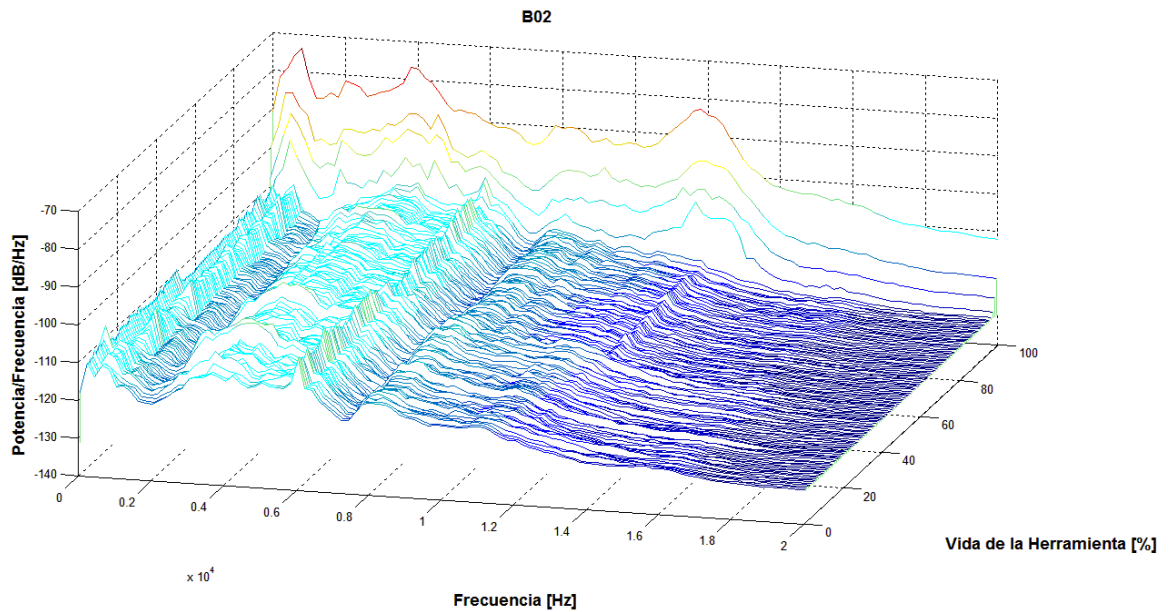
Figura 13. Curtosis en función del número de agujeros..



#### 2.4.2 Dominio frecuencia

Se calcularon los espectros de todas las señales para conocer sus principales componentes en frecuencia y detectar cambios continuos en las mismas.

Figura 14. Espectros a lo largo de la vida de la broca B02.

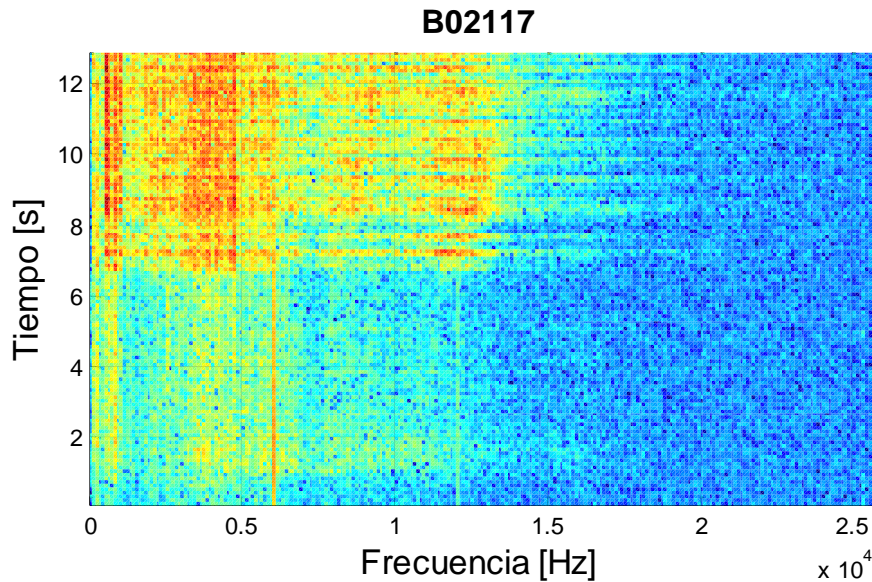


En la figura anterior se observa:

- ✓ De manera similar al análisis en el dominio del tiempo, se observó que durante la mayor parte de la vida de la herramienta, no existió un cambio significativo.
- ✓ La potencia se concentró en diferentes bandas del espectro.
- ✓ Al final de la vida de la herramienta se aprecia que la potencia aumentó en todo el rango de frecuencia.

Se realizaron espectrogramas con el propósito de analizar las anomalías transitorias previamente observadas a través del análisis de valor eficaz, las cuales se presentaron al final de los agujeros como se aprecia enseguida:

Figura 15. Espectrograma del agujero B02117.



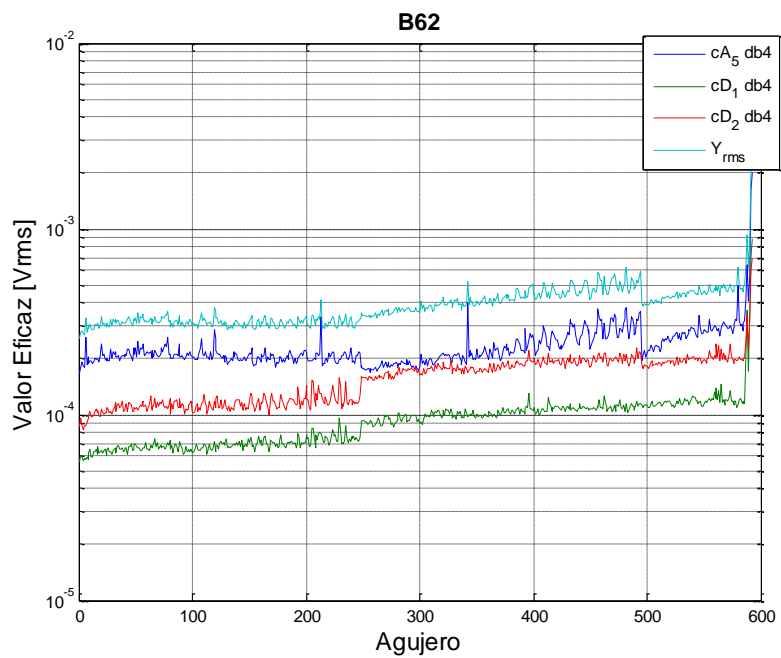
Se observó que las anomalías (ver figura 15), que anteceden la falla, presentan un aumento de potencia en la banda del espectro comprendida entre 0 y 13KHz.

### 2.4.3 Wavelet

Se propuso la Transformada Wavelet (TW) como una nueva técnica de procesamiento dado que ofreció la posibilidad de realizar un análisis multiresolución tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia. En consecuencia, se descompuso las señales acústicas en 5 niveles, conllevando a extraer sus coeficientes (ver figura 16) y a partir de los cuales se observó que algunos de ellos:

- ✓ Representaron el comportamiento general del valor eficaz.
- ✓ Detectaron variaciones correspondientes a cambios de pieza de trabajo.
- ✓ Ciertos coeficientes disminuyeron las anomalías, mientras que en otros las resaltaron.

Figura 16. Coeficientes Wavelet de la broca B62.



### 3. DISEÑO DEL ENSAYO

La idea básica de cada ensayo implicó inducir la falla en la herramienta de corte, perforando un número indeterminado de agujeros, usando como criterio de falla un aumento muy considerable en la intensidad del sonido percibido por el operario.

En este proyecto se realizaron cuatro (4) ensayos, llevando la herramienta de corte a presentar falla. Tres (3) ensayos adicionales se llevaron a cabo sin provocar la falla de la herramienta de corte, con el propósito de explorar la incidencia en el comportamiento de la señal acústica, de variables tales como el sensor (micrófono) y el refrigerante.

El desarrollo de esta investigación se inició con el diseño detallado de lo que sería un ensayo, con las siguientes premisas establecidas:

1. Facilidad para realizar el mecanizado repetitivo de agujeros.
2. Garantizar que los parámetros de corte establecidos fueran constantes y repetibles.
3. Garantizar la calidad de las señales capturadas, es decir, que las mismas no fueran afectadas por las condiciones de funcionamiento de la máquina herramienta y además, presentaran una baja influencia del ruido externo.

El diseño del ensayo implicó:

- a. Establecer la herramienta de corte.
- b. Establecer el Material a utilizar.
- c. Determinar los parámetros de corte.
- d. Determinar la máquina herramienta a utilizar.
- e. Diseñar la forma de sujeción del material.
- f. Diseñar la distribución y secuencia del taladrado.

### **3.1 HERRAMIENTA DE CORTE**

En el proyecto de grado EVALUACIÓN DEL DESGASTE DE UNA BROCA DE ACERO RAPIDO (HSS) MODIFICADA SUPERFICIALMENTE CON IONES DE NITROGENO Y TITANIO USANDO LA METODOLOGÍA DE ANOVA, en el cual se midió la vida de brocas con y sin recubrimiento empleando la potencia de la máquina como criterio de falla, se usaron dos tipos de brocas (KONDOR y DORMER) y dos tipos de material (acero A36 y API SPECT 5CT P110).

Las brocas sin tratamiento manifestaron un comportamiento confiable, alcanzando un promedio de 70 agujeros de 25mm de profundidad en el material API SPECT 5CT P110.

En base al proyecto anteriormente citado se logró obtener referentes acerca de marcas comerciales de herramientas (brocas), posibles diámetros a utilizar y estimaciones acerca de la vida útil de las mismas, por lo tanto se decidió emplear siete brocas marca DORMER:

- ✓ 4 de 8 mm de diámetro
- ✓ 3 de 6 mm de diámetro

#### **3.1.1 Geometría de las brocas**

Se usaron brocas DORMER de acero rápido (HSS) con un tratamiento superficial de temple al vapor, las cuales son de uso común en la industria ya que pueden emplearse en una gran variedad de materiales de trabajo. Sus principales características geométricas se exponen en la tabla 5.

Tabla 5. Geometría de las brocas.

Geometría de las brocas		
		
<b>Característica</b>	Diámetro= 8 [mm]	Diámetro= 6 [mm]
<b>Ángulo de filo <math>\alpha</math></b>	118°	118°
<b>Longitud de hélice Lh[mm]</b>	75	57
<b>Longitud total LT[mm]</b>	117	93
<b>*Profundidad máxima recomendada del taladrado: cuatro veces el diámetro</b>		

Fuente: Catálogo DORMER.

### 3.2 PIEZA DE TRABAJO

Uno de los factores que influye considerablemente en la vida de la broca es la dureza de la pieza de trabajo ya que es la principal propiedad relacionada con la resistencia al corte y en base a esto, se eligió el acero SAE 4140 (ver tabla 6) como material de trabajo y con ello se buscó hacer fallar la herramienta en un número bajo de operaciones de taladrado, lo cual implicaría tener que adquirir, manipular y procesar un menor volumen de información acústica.

En base a las recomendaciones del fabricante de las brocas se eligió una profundidad a taladrar de 25 mm. Limitados por la disponibilidad comercial del material, se utilizaron piezas cilíndricas (ver figura 17) de 152.4 mm de diámetro (6 in), por 50 mm de longitud, con el objetivo de realizar agujeros ciegos por ambas

caras. Es de subrayar que el material de trabajo posee una dureza de aproximadamente 230 HB en el centro y 270 HB en el borde.

Tabla 6. Propiedades del acero SAE 4140.

Composición Química	C %	Mn %	P max. %	S max. %	Si %	Cr %	Mo %
<b>Análisis típico en %</b>	0.38	0.75	0.0035	0.04	0.2	0.80	0.15
	0.43	1.0			0.35	1.10	0.25

Figura 17. Geometría del material a taladrar.



### 3.3 PARÁMETROS DE CORTE

Los parámetros de corte juegan un papel fundamental en relación a la vida de la herramienta, sin embargo, nuestro interés reside en representar el proceso bajo condiciones normales o comunes de operación y con este fin, se decidió usar los parámetros recomendados por el fabricante.

Desde esta perspectiva, se usó el selector de herramientas online de DORMER (<http://selector.dormertools.com/web/xla/es-es/mm>) ya que además de

proporcionarnos los parámetros de corte, proporciona un estimado de la vida de la herramienta. Enseguida, se presentan los pasos para la determinación de los mismos:

- a) En la figura 18 se muestra la interfaz con el usuario en el cual se selecciona el material a taladrar. Se presenta la opción de seleccionar por grupo de materiales o por material específico. Para nuestro caso el grupo de material corresponde al grupo 1.4 acero aleado (<850N/mm<sup>2</sup>) o específicamente el acero SAE 4140.

Figura 18. Selección del material.

The screenshot displays a software interface for material selection, divided into three main sections:

- Selección del grupo de materiales:** A list of material groups. Group 1.4, "acero aleado (< 850 N/mm<sup>2</sup>)", is highlighted in red. Other groups include "Acero", "Acero inoxidable", "Hierro Fundido", and "Titanio".
- Search for Material:** A search area with a dropdown menu set to "estandar" and "Todas las normas". A list of materials is shown, with "4140" highlighted in red. A filter box contains the text "Buscar el material".
- Machine Settings:** A panel with various settings:
  - Valor de mecanizado: 100 USD/hora
  - Revoluciones máximas: 50.000 1/min.
  - Coolant Available:  Emulsión,  Lubricación mínima,  seco / aire comprimido,  aceite
  - Internal Coolant Supply:  Si

Navigation buttons "Regrese" and "Continuar" are located at the bottom of the interface.

Fuente: Selector virtual DORMER

- b) Al continuar y seleccionar taladrado general, se puede visualizar la figura 19 en la cual se presentan diferentes opciones, las cuales son más específicas en cuanto a la labor de maquinado. Algunas opciones son el diámetro de la

broca, profundidad del agujero, con o sin refrigerante, agujero ciego o pasante, etc. Pero en nuestro caso se tiene:

- Diámetro de broca: 8 mm y 6 mm
- Profundidad de taladrado: 25mm
- Refrigeración: externa.
- Agujero: ciego

Figura 19. Opciones de maquinado.

▼ Machining Task

**Dimensiones**

Diámetro de la broca d: 8 mm

Tolerancia H12

Profundidad de taladro T: 25,00 mm

**Opcional**

Longitud adicional L: 0,00 mm

Tolerancia de afilado: 0,00 mm

**suministro refrigeración**

externa

interno

**tipo de mecanizado**

Emulsión

Lubricación mínima

seco / aire comprimido

aceite

**tipo de agujero**

agujero pasante

agujero ciego

**dirección de corte**

a derecha

a izquierda

← Regrese

Continuar →


Fuente: Selector virtual DORMER.

- c) Una vez seleccionada la broca a usar, se obtienen los parámetros recomendados por el fabricante DORMER, tales como velocidad de corte, velocidad del husillo, avance, velocidad de avance, número de agujeros, etc. (Ver Figura 20 y Figura 21).


Figura 20. Parámetros de corte broca 8mm.

Tool Header Informations

## A100



Broca , serie corta



Brillante, abajo de 1,0 mm, 3/64".N60


HSS DIN 338 4XD 118° ST N

	PSF	e-Code	d <sub>s</sub>	Vc m/min	RPM 1/min.	avance mm/R	Vf mm/min	m Nm	P kW	n° de agujeros	tiempo / agujero s	costo / agujero USD	USD
	A100	A1008.0	8.00	20.0	796	0,138	110	3,32	0,318	132	13,7	0,456	10,10

Fuente: Selector virtual DORMER.

Figura 21. Parámetros de corte broca 6mm.

## A100



Broca , serie corta



Brillante, abajo de 1,0 mm, 3/64".N60

HSS DIN 338 4XD 118° ST N

	PSF	e-Code	d <sub>s</sub>	Vc m/min	RPM 1/min.	avance mm/R	Vf mm/min	m Nm	P kW	n° de agujeros	tiempo / agujero s	costo / agujero USD	USD
	A100	A1006.0	6.00	20.0	1061	0,109	116	1,56	0,199	139	13,0	0,402	5,78

Fuente: Selector virtual DORMER.

Los parámetros de corte y datos de operación obtenidos se resumen en la tabla 7.

Tabla 7. Parámetros de corte y datos de operación.

	Diámetro de la broca [mm]	
	6	8
Velocidad de rotación [rpm]	1061	796
Velocidad de corte [m/min]	20	20
Avance [mm/rev]	0,109	0,138
Velocidad de avance [mm/min]	116	110
Torque [Nm]	1,56	3,32
Potencia [kW]	0,199	0,318
Número de agujeros	139	132
Tiempo/agujero [s]	13.0	13,7

### 3.4 MÁQUINA HERRAMIENTA

Se utilizó el centro de mecanizado Leadwell V-20 (ver Figura 22) ubicado en el laboratorio de sistemas flexibles de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander. Por otra parte, su elección correspondió a que ésta se encuentra en óptimas condiciones de funcionamiento lo cual brindó garantía y repetitividad en los ensayos así como calidad en las señales capturadas.

Figura 22. Centro de mecanizado Leadwell V-20.



Esta máquina operada mediante comandos programados permitió realizar de manera eficiente todos los ensayos y posee algunas características que se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 8. Características técnicas Leadwell V-20

CARACTERÍSTICA	MEDIDA	UNIDAD
Recorrido eje X	510	Milímetros
Recorrido eje Y	350	Milímetros
Recorrido eje Z	400	Milímetros
<b>MESA</b>		
Medida	600*350	Milímetros
Máximo peso de carga	200	Kilos

### 3.5 SUJECIÓN DE LA PIEZA DE TRABAJO

Se diseñó un sistema de sujeción compuesto por dos bridas (ver figura 23 y 24), las cuales se encargaron de fijar el material, a través de sus extremos, a la mesa de la máquina y logrando con ello, reducir considerablemente la cantidad de vibraciones que podían afectar la calidad de las señales acústicas.

Figura 23. Sujeción por bridas.

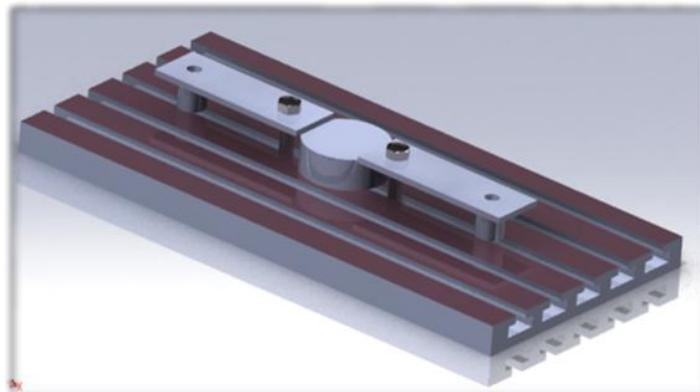


Figura 24. Sujeción de la pieza de trabajo.



### **3.6 DISTRIBUCIÓN Y SECUENCIA DE TALADRADO.**

Se establecieron tres secuencias de taladrado con el objeto de:

- ✓ Estudiar la posible influencia en las señales acústicas de algunos factores como la simetría de maquinado y la variación de dureza presente en la pieza de trabajo.
- ✓ Obtener un buen aprovechamiento del material.

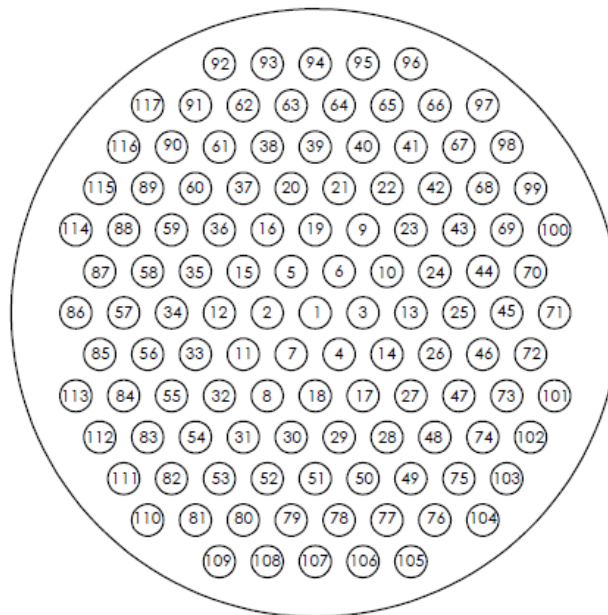
Las secuencias de taladrado se idearon en una distribución triangular con una distancia entre centros de tres radios, conllevando a aprovechar el material adecuadamente y además tan pronto se maquinó una de las caras de la pieza de trabajo, ésta se volteó para continuar con la otra cara.

#### **3.6.1 Secuencia mixta**

En la secuencia mixta se comienza taladrando en el centro de la pieza y después, se realizan perforaciones teniendo en cuenta un patrón simétrico durante los primeros agujeros, cuyo fin es estudiar y determinar la posible influencia del

sonido con la simetría de la pieza de trabajo, ya que, en caso de encontrar relación alguna, será un factor importante a tener en cuenta en otros ensayos. Finalmente, se continúa con patrón espiral hasta su culminación. En la figura 25 se resume la secuencia anterior, la cual se usó en los ensayos iniciales.

Figura 25. Secuencia de taladrado mixta.



Entrando en detalle, esta secuencia consta de tres fases:

- Agujeros 1 a 19: se realizan con cierta simetría.
- Agujeros 20 a 61: sigue un patrón en espiral que conlleva a una programación sencilla y reduce el tiempo de maquinado.
- Agujeros 62 al 117: se cambia la herramienta de trabajo por una nueva debido a que se quiere comparar los sonidos generados por brocas nuevas o afiladas pero taladrando a distancias radiales diferentes.

### 3.6.2 Secuencia lineal

La secuencia lineal (Ver figura 26) comienza taladrando en uno de los agujeros más lejanos al centro de la pieza de trabajo y como su nombre lo indica, continúa perforando a lo largo de cada fila sin realizar cambio de herramienta.

Figura 26. Secuencia lineal.

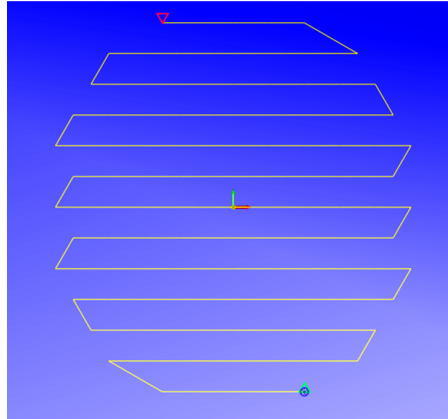
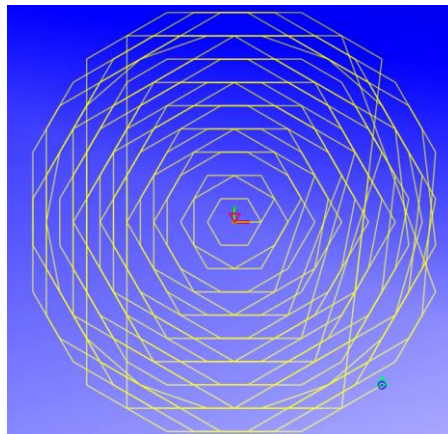


Figura 27. Secuencia en espiral.



### 3.6.3 Secuencia espiral.

La secuencia en espiral (ver Figura 27) comienza maquinando en el centro de la pieza de trabajo, para continuar realizando agujeros siguiendo el orden de menor a mayor distancia radial con una única broca, con lo cual la dureza de la pieza de trabajo aumenta de manera progresiva.

## 4. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Previamente al procesamiento de la información se encuentra la etapa de adquisición de datos, en la cual se mide el fenómeno físico para obtener valores numéricos digitales que pueden ser manipulados por un ordenador. De tal forma, se diseñó un sistema de adquisición de señales acústicas, el cual se encuentra conformado por algunos dispositivos especializados que fueron seleccionados considerando los siguientes aspectos:

- a) Conservar la calidad de la señal original.
- b) Facilitar la detección de errores en el funcionamiento del sensor y de su instrumentación auxiliar por medio de una visualización directa de las señales.

En base a lo anterior, el desarrollo del sistema de adquisición implicó:

- a) Seleccionar el sensor adecuado para señales acústicas el cual corresponde a un micrófono con amplia respuesta en frecuencia.
- b) Seleccionar un hardware especializado en la adquisición de señales acústicas.
- c) Desarrollar un sistema de conexión entre los diferentes dispositivos.
- d) Diseñar un programa que permita visualizar y almacenar los datos.

El sistema de adquisición de datos comprendió un componente hardware y un componente software, los cuales se describen a continuación:

### 4.1 SENSOR


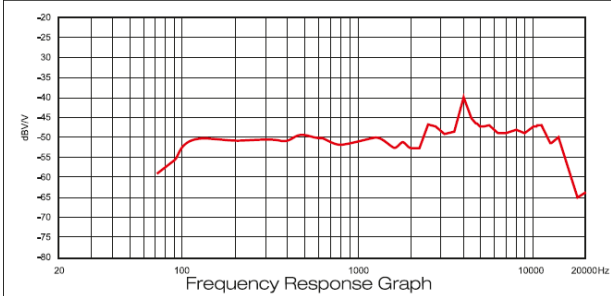
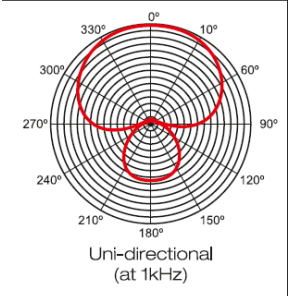
Es el micrófono responsable de medir el fenómeno físico y para ello, se encarga de transformar las vibraciones, por el efecto de la presión acústica ejercida por las ondas sonoras sobre su cápsula, en señales de voltaje. Por esa razón, es el dispositivo de mayor importancia en el sistema de adquisición.

Para este ensayo el micrófono debía tener las siguientes características:

- ✓ Patrón polar que favorezca la captura de las señales acústicas en dirección al proceso de taladrado y reduzca la influencia de sonidos provenientes de otras direcciones es decir, patrón polar cardioide o supercardioide.
- ✓ Respuesta plana en frecuencia es decir, lograr adquirir la señal sin alterarla.
- ✓ Rango de frecuencia amplio, en otras palabras, que capte frecuencias cercanas al rango audible (20Hz-20KHz).


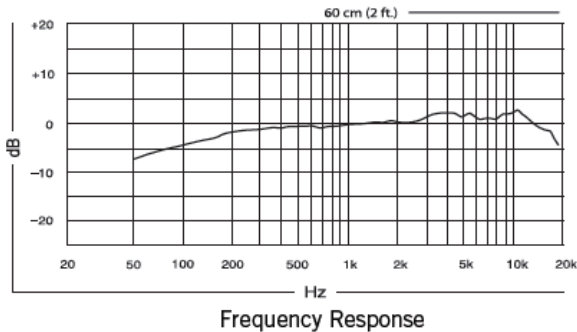
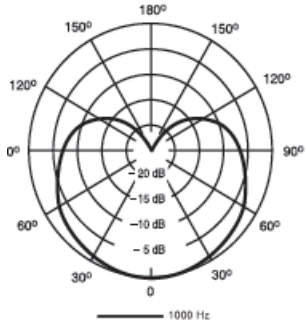
Considerando las características precedentes, se resolvió con la consecución de dos micrófonos, cuyas principales especificaciones se presentan a continuación:

Tabla 9. Características micrófono 1.

<b>Micrófono 1</b>	<b>TXL 235 TOPP AUDIO</b>		
			Tipo de transductor Dinámico
<b>Respuesta en frecuencia</b>	40Hz-16KHz	<b>Direccionalidad</b>	Supercardioide
			

Fuente: Catalogo del fabricante.

Tabla 10. Características micrófono 2.

<b>Micrófono 2</b>	<b>PG81 SHURE</b>		
		Tipo de transductor	
		Condensador	
<b>Respuesta en frecuencia</b>	40Hz-18KHz	<b>Direccionalidad</b>	Cardioide (unidireccional).
 <p>Frequency Response</p>		 <p>Polar Pattern Measured at 1000 Hz</p>	

Fuente: Catálogo del fabricante.

Las especificaciones de los fabricantes permitieron observar:

- Ambos micrófonos presentan un patrón polar adecuado para capturar el sonido proveniente del proceso de taladrado debido a sus características de rechazo al sonido externo o ambiente y contar con resistencia a problemas de retroalimentación. Sin embargo, el micrófono 2 tiene la particularidad de recoger un poco de sonido procedente directamente detrás de sí mismo.
- El micrófono 1 posee transductor de tipo dinámico lo cual lo hace resistente a cambios extremos de temperatura y humedad debido a su construcción relativamente sencilla. Por otra parte, el micrófono 2 de tipo condensador, requiere de una alimentación adicional, ya sea por medio a pilas o a través de una mesa de mezclas con una conexión de tipo fantasma o phantom.
- El micrófono 2 es más sensible y ofrece un sonido más suave y natural.

De las curvas de respuesta en frecuencia se aprecia:

- El micrófono 1 presenta picos o sobresaltos en las frecuencias 2500Hz y 4000Hz los cuales son posiblemente usados para aumentar la inteligibilidad de las voces en vivo.
- El micrófono 2 presenta leves variaciones lo cual indica que las salidas de señales de voltaje poseen el mismo nivel de energía en un amplio rango del espectro, lo cual es usado en aplicaciones donde se requiere reproducir la fuente de sonido sin alterarla como en el caso de los estudios de grabación.
- Es de resaltar que el micrófono 2 tiene una respuesta en frecuencia más amplia, lo cual es importante porque se desconoce el rango de frecuencias correspondiente al proceso de taladrado.

#### **4.1.1 Ensayo de los micrófonos**

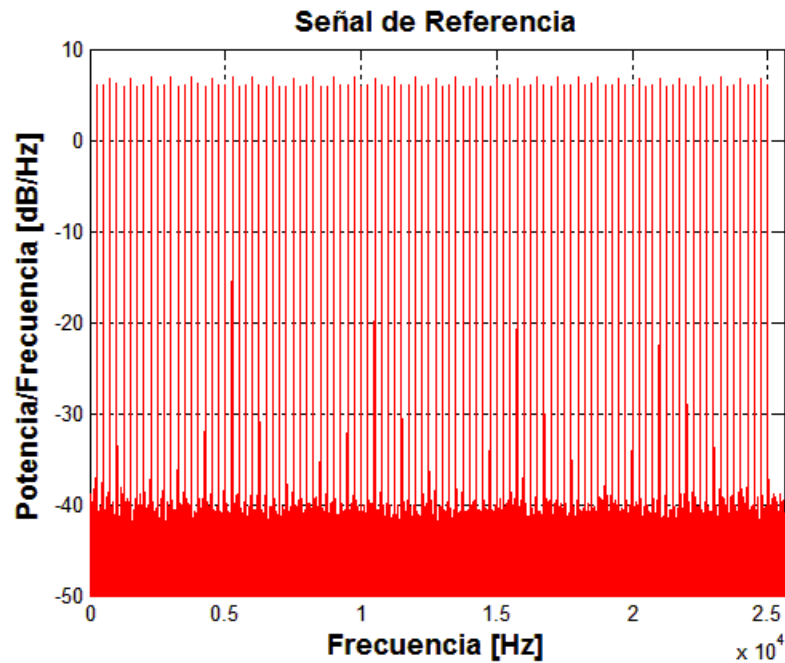
Las curvas de respuesta en frecuencia de los micrófonos adquiridos no son del todo confiables debido a fallas durante la manufacturación o posibles golpes recibidos en usos previos.

En consecuencia, se decidió realizar un ensayo con el propósito de obtener sus respectivas curvas de respuesta en frecuencia y contrastarlas con lo proporcionado por el fabricante.

El ensayo para cada micrófono se describe a continuación:

- ✓ Se realizó un programa en MATLAB, con el propósito de reproducir un sonido compuesto de múltiples frecuencias de igual nivel de intensidad dentro del rango de 0 a 20KHz. (ver figura 28).

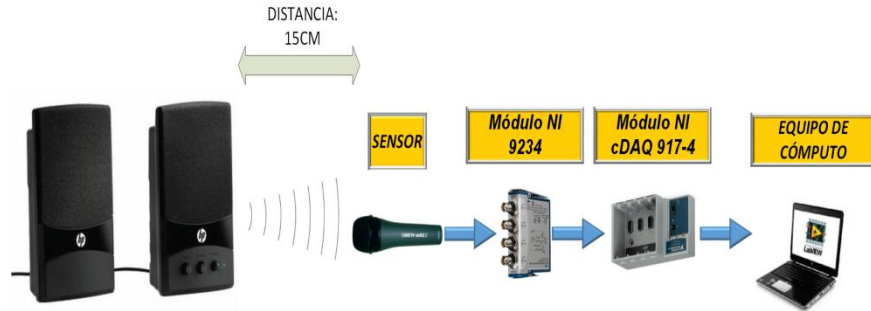
Figura 28. Señal de referencia.



Es de aclarar que el sonido de referencia fue reproducido por medio del uso de parlantes de marca hewlett packard (HP), el cual posee su propia curva de respuesta en frecuencia, pero aquello no afectó los resultados del ensayo porque el interés del mismo se concentró en comparar los micrófonos.

- ✓ Se diseñó un montaje conformado por un parlante y un micrófono, los cuales se ubicaron sobre una mesa y se mantuvo una distancia de 15cm entre ellos. (ver figura 29).

Figura 29. Montaje realizado para la selección del micrófono.



- ✓ Se usaron los módulos especializados de la compañía National Instruments como hardware de adquisición de las señales capturadas por cada micrófono y simultáneamente, se procesaron para obtener sus espectros en tiempo real a través del entorno de programación LabVIEW.

Las curvas de respuesta en frecuencia obtenidas se presentan enseguida:

Figura 30. Espectro del micrófono 1 a 15 centímetros de la fuente.

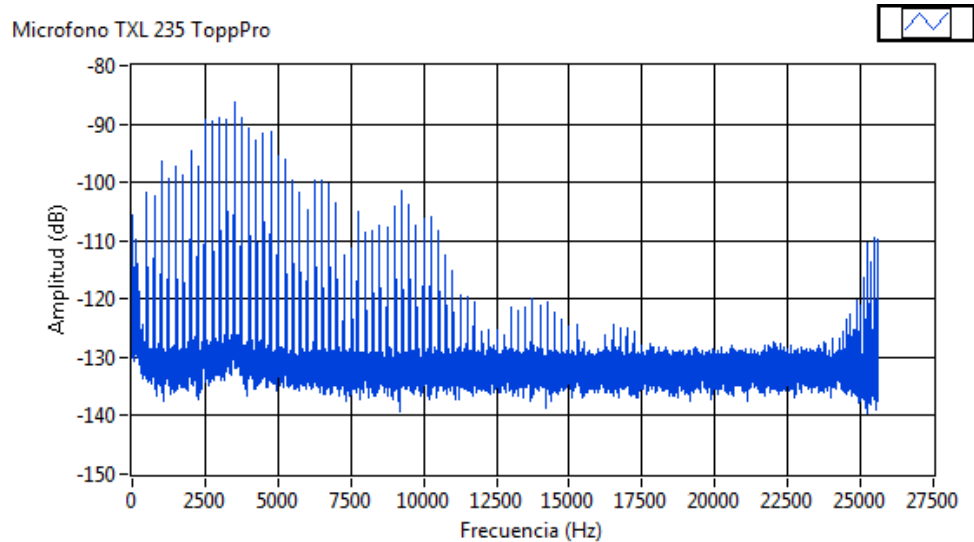
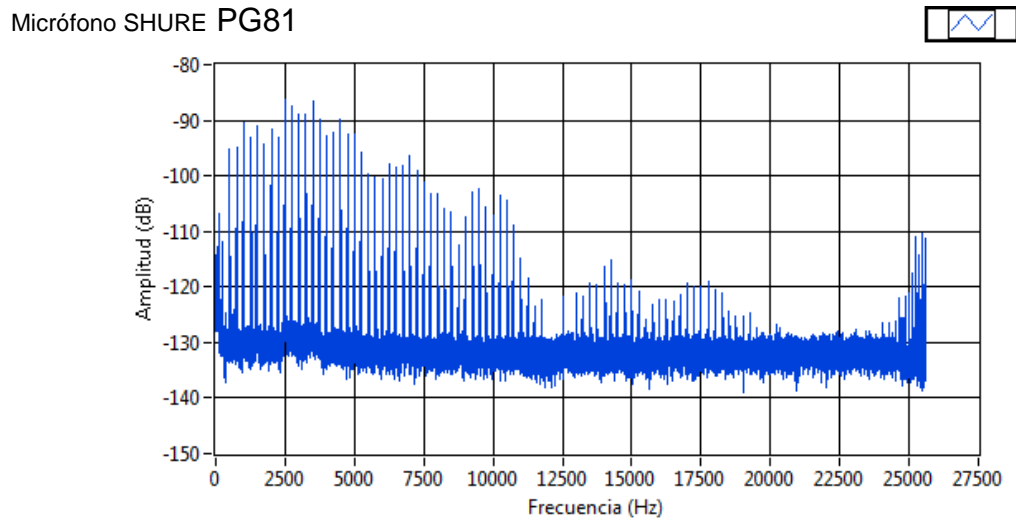


Figura 31. Espectro del micrófono 2 a 15 centímetros de la fuente.



Los anteriores espectros permitieron concluir:

- Con el micrófono 2, la señal capturada presentó un espectro de mayor nivel de intensidad en un amplio rango de frecuencia.
- El rango de frecuencia del micrófono 2 fue más amplio, logrando capturar 20KHz, mientras que el micrófono 1 obtuvo su límite en 17.5KHz.
- A frecuencias bajas (0 a 5KHz), el micrófono 2 presentó un comportamiento plano, respecto a las distorsiones del micrófono 1.
- La forma general de los espectros fue similar para ambos micrófonos.

En vista de los resultados obtenidos, se decidió usar ambos micrófonos para observar su influencia en la adquisición de la señal.

**Figura 32. Micrófono.**



#### 4.1.2 Ubicación del micrófono

La posición del micrófono se estableció acorde a los siguientes aspectos:

- ✓ Estar fuera del alcance de golpes de viruta y salpicaduras de líquido refrigerante.
- ✓ Interferir lo menos posible en el proceso de taladrado y aquellas labores de montaje, limpieza y sujeción del material de trabajo, las cuales se realizan a través de la puerta principal del centro de mecanizado.

En base a lo anterior, se decidió ubicar el micrófono al interior del centro de mecanizado (ver figura 33) a través de su ventana lateral derecha y a un costado superior de la pieza de trabajo con las siguientes distancias:

- ✓ Distancia horizontal: 83cm
- ✓ Distancia vertical: 65cm

Figura 33. Montaje Final.



#### 4.2 HARDWARE DE ADQUISICIÓN

Se seleccionó un hardware de adquisición a partir de las siguientes características:

- ✓ Confiabilidad.
- ✓ Amplio rango de medición en frecuencia.
- ✓ Excelente resolución.

Se eligió el chasis NI 917-4 de la compañía National Instruments, el cual posee una resolución de 32 Bits y está diseñado con 4 ranuras para sistemas pequeños y portátiles de pruebas de medidas mixtas a través de la incorporación de módulos. Además permite crear sistemas personalizados de señal mixta con un solo cable USB al sistema de cómputo. (Ver figura 34)

Figura 34. Módulo NI cDAQ 917-4.



Adicionalmente, se escogió el módulo NI 9234 especializado para realizar medidas de audio de alta precisión a través de micrófonos, con una máxima velocidad de muestreo de 51200Ks/s por canal, resolución de 24Bits con filtro anti-aliasing y con un rango de entrada de +/- 5V. (Ver figura 35)

Figura 35. Módulo NI 9234.



### 4.3 SISTEMA DE CONEXIONES.

Se diseñó una conexión que permitiera la comunicación eficiente entre los dispositivos y con ese fin, se investigó por aquellas características que brindarían:

- ✓ Protección a las señales contra interferencias.
- ✓ Bajas impedancias para un mayor alcance de la información.

#### 4.3.1 Cable coaxial.

Se decidió utilizar cable coaxial por su utilidad en comunicaciones para varios tipos de señales como datos y voz debido a su resistencia a las interferencias y su ancho espesor, el cual permite disminuir pérdidas a grandes distancias. (Ver figura 36)

**Figura 36. Cable coaxial (RG6 90%)**




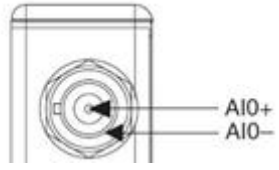
Fuente: Sitio Web ([orbita.digital.com](http://orbita.digital.com)).

El cable coaxial se compone:

- ✓ Hilo conductor de cobre.
- ✓ Malla trenzada plana.
- ✓ Capa gruesa de material aislante.
- ✓ Cobertura externa.

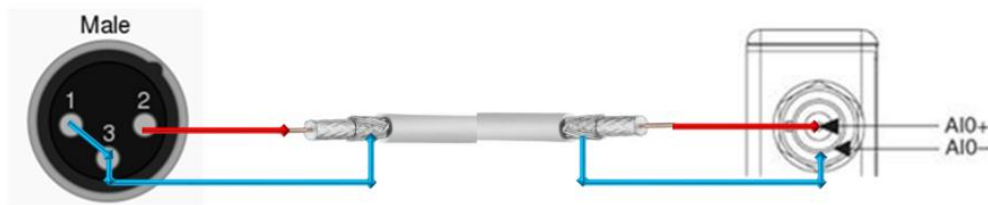
Se tuvo en cuenta que tanto los micrófonos como los módulos poseen diferentes tipos de conexión como se aprecia en la siguiente tabla:

Tabla 11. Tipos de conexión.

Dispositivo	Tipo de conexión	Figura	
<b>Micrófono</b>	XLR		1 GND
			2 +
			3 -
<b>Módulo NI 9234</b>	BNC		

En consecuencia se conectó la tierra con el negativo para el correcto funcionamiento de la pantalla del cable coaxial y por lo tanto, brindar la protección contra interferencias (ver figura 37).

Figura 37. Conexiones.



#### 4.4 SOFTWARE DE ADQUISICIÓN

El software se seleccionó en base a los siguientes criterios:

- ✓ Confiabilidad en el manejo de las señales acústicas.
- ✓ Visualización directa de las señales adquiridas para la detección de posibles errores durante la captación.
- ✓ Almacenamiento de la información de manera sistemática mediante la siguiente nomenclatura:

Tabla 12. Nomenclatura.

<b>NOMBRE: BXXYYY</b>		<b>MW</b>	
<b>XX</b>	Broca usada	M	Máquina
<b>YYY</b>	Número de agujero	W	Diámetro

Se eligió el software LabVIEW porque su lenguaje de programación gráfico de alto nivel, permitió la rápida y sencilla elaboración de un programa con una interfaz gráfica amigable, sin la necesidad de gran experiencia en su entorno. El programa elaborado se describe enseguida:

Figura 38. Programa para guardar Señales Acústicas.

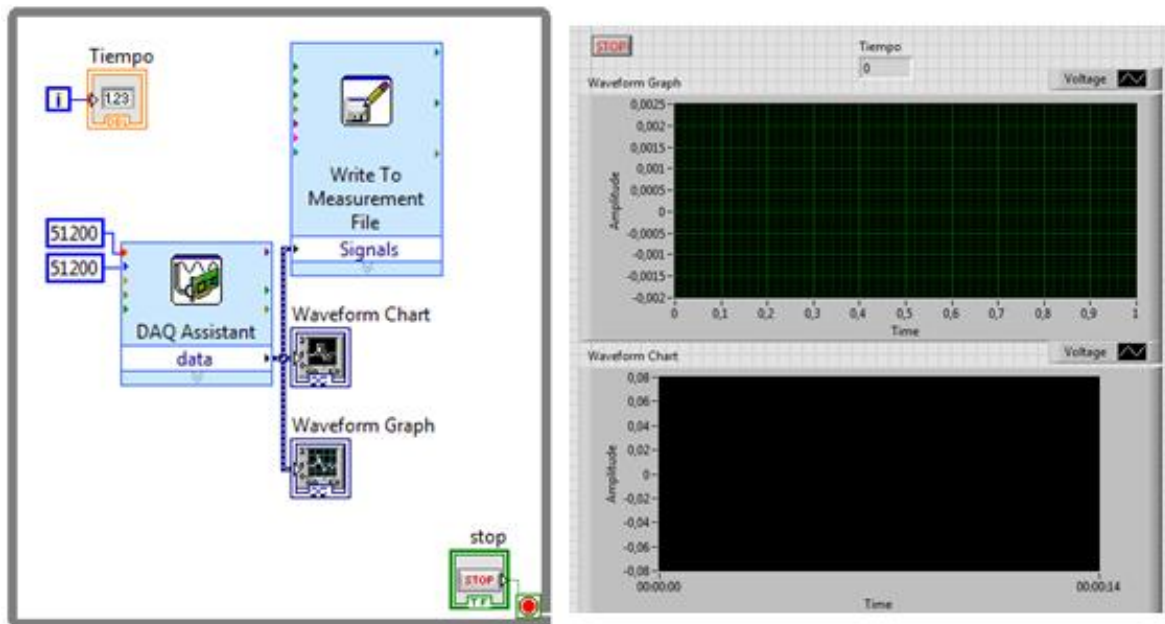
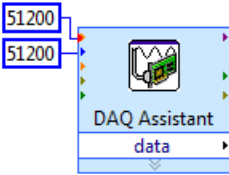
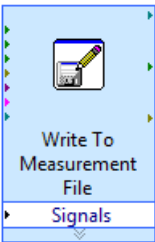



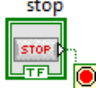


Tabla 13. Componentes del programa de adquisición.

Componente	Representación	Descripción
DAQ Assistant		Asistente encargado de medir la señal de entrada proveniente de los módulos a una velocidad de muestreo de 51200 muestras/segundo.
Write to Measurement		Guardó los datos previamente medidos en un formato texto (.LVM) sin encabezados ni la columna de tiempo en una ubicación definida por el usuario. Es de subrayar que a través de este componente se tuvo en cuenta la nomenclatura de los archivos.
Waveform Chart		Representó los datos en tiempo real manteniendo un historial de los mismos.
Waveform Graph		Graficó los datos en tiempo real.
Tiempo		Indicador que muestra el tiempo transcurrido desde el inicio de la adquisición de datos.
Stop		Detiene la adquisición de datos.

## 5. ENSAYOS REALIZADOS

### 5.1 ENSAYOS HASTA EL ESTADO DE FALLA

Se realizaron (4) cuatro ensayos en los cuales se indujo la falla de la broca. La información de cada ensayo se presenta en la tabla 14.

Tabla 14. Información de los ensayos.

<i>Ensayo</i>	<i>Broca</i>	<i>Cantidad de agujeros</i>	<i>Secuencia</i>	<i>Estado final</i>	<i>Micrófono (sensor).</i>
1	B01 (d=8mm)	74	Mixta	Falló	1
2	B02 (d=8mm)	118	Espiral	Falló	1
3	B61 (d=6mm)	573	Lineal	Falló	2
4	B62 (d=6mm)	592	Espiral	Falló	2

Es de aclarar que los ensayos B61 y B62, correspondientes a un menor diámetro de broca, presentaron mayor velocidad de rotación (RPM) y por tanto, mayor sonido proveniente del centro de mecanizado. En consecuencia, con el propósito de aumentar el nivel de intensidad del sonido propio del taladrado, se decidió acercar el micrófono para éstos ensayos.

### 5.2 ENSAYOS ADICIONALES

Se realizaron tres (3) ensayos adicionales con la intención de:

- ✓ Comparar la influencia entre los micrófonos sobre la señal acústica.

- ✓ Observar el efecto del caudal de refrigerante.

Se realizaron dos ensayos (B81 y B82) para comparar la influencia del micrófono en las señales acústicas y en el cual, se decidió acercar el micrófono 2 a la fuente para disminuir el efecto del sonido lateral como consecuencia de su polaridad cardiode.

Finalmente, se realizó el ensayo B63 para observar la influencia por parte del caudal de refrigerante, el cual se varió:

Tabla 15. Variación del refrigerante.

Intervalo de agujeros	Cantidad de refrigerante.
0-5	En seco
6-52	Caudal alto: $6,66 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ (3,996 L/min)
53-149	Caudal normal: $3,57 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ (2,142 L/min)

A continuación se presenta el comportamiento de los ensayos adicionales:

Tabla 16. Comportamiento de los ensayos adicionales.

<i>Broca</i>	<i>Cantidad de agujeros</i>	<i>Secuencia</i>	<i>Estado final</i>	<i>Micrófono (sensor)</i>
<b>B81</b> (d=8mm)	234	Lineal	No falló	2
<b>B82</b> (d=8mm)	234	Lineal	No falló	2
<b>B63</b> (d=6mm)	149	Espiral	No falló	2

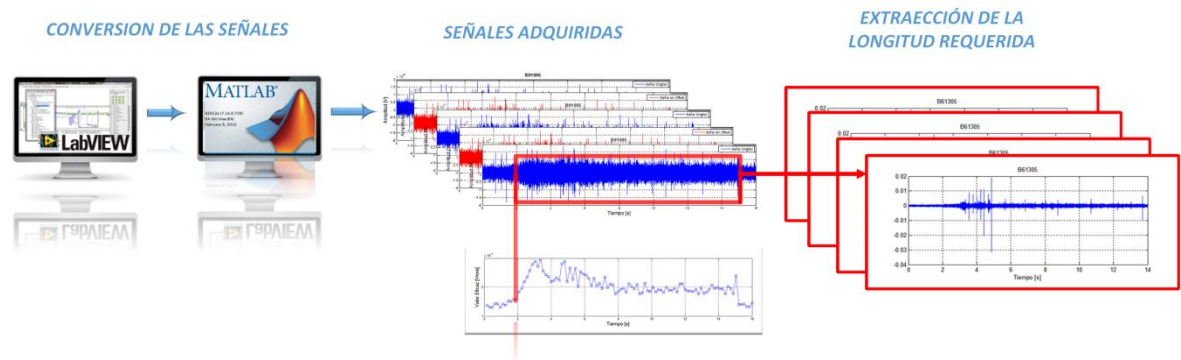
## 6. PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES

Una vez almacenadas las señales y con el propósito de recortar y extraer solo aquella información correspondiente al proceso de taladrado, se introdujo una etapa previa a los respectivos análisis, en la cual se efectuó una adecuación de las mismas (ver figura 39).

La etapa de procesamiento involucró:

- c) Seleccionar el software de procesamiento.
- d) Adecuar las señales.

Figura 39. Procesamiento de las señales.



### 6.1 SOFTWARE DE PROCESAMIENTO

Se seleccionó el software MATLAB porque permitió:

- ✓ Un procesamiento sistemático y eficiente de grandes volúmenes de información.
- ✓ Uso de toolboxes especializados en procesamiento de señales y la transformada de wavelet para la ejecución de los análisis correspondientes.

## **6.2 ADECUACIÓN DE LAS SEÑALES.**

Se diseñaron programas en el entorno MATLAB encargados de realizar las siguientes tareas:

- ✓ Conversión de datos debido a la incompatibilidad de formato entre el software de adquisición (LabVIEW) y el software de procesamiento (MATLAB).
- ✓ Eliminación del offset producido por defecto en los dispositivos de adquisición.
- ✓ Selección del intervalo de interés como consecuencia de la adquisición de las señales desde un momento previo al taladrado hasta su finalización, lo cual conllevó a tener señales de diferentes tamaños y con datos que no eran propios al proceso.

### **6.2.1 Conversión de datos**

Los datos se almacenaron mediante un programa realizado en el software LabVIEW, estos datos tienen un formato “.lvm” el cual es un documento de texto en código ASCII donde la coma es empleada como separador decimal, por tal razón no es compatible con MATLAB, porque el punto es usado como separador decimal, así que se hace necesario la creación de un programa en MATLAB (ver Anexos) para realizar la conversión y creación de vectores para su almacenamiento en el formato de MATLAB manteniendo el mismo nombre de los archivos.

### **6.2.2 Eliminación del offset**

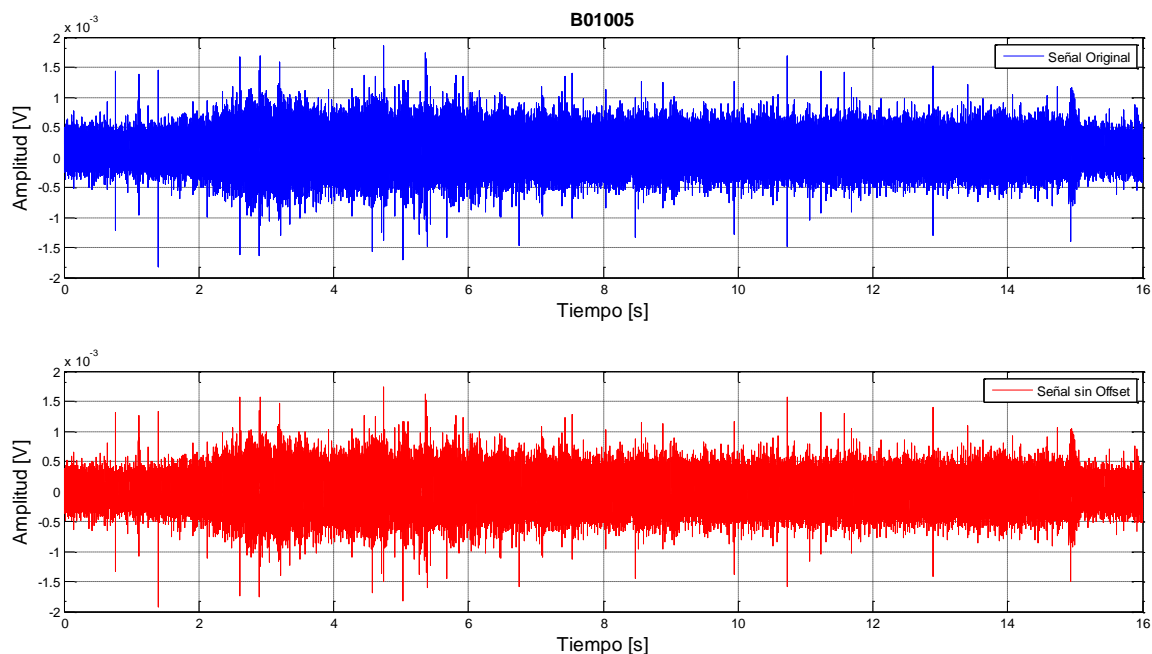
La existencia de un offset fue determinada mediante la medición del voltaje eficaz de los diferentes canales del modulo sin ninguna conexión, los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 17. Voltaje eficaz de los canales del modulo

Canal	Voltaje Eficaz [ $V_{RMS}$ ]
a0	5,546e-05
a1	5,328e-05
a2	5,551e-05
a3	5,566e-05
<b>Voltaje Promedio</b>	<b>5,501e-05</b>

Se realizo la conexión del micrófono y se calculo nuevamente el valor eficaz del ruido y se obtuvo un valor de 4,511e-05 [ $V_{RMS}$ ] el cual es ligeramente menor al valor previo. Este offset se puede eliminar fácilmente mediante la resta del valor promedio de cada medición como se observa en la siguiente figura

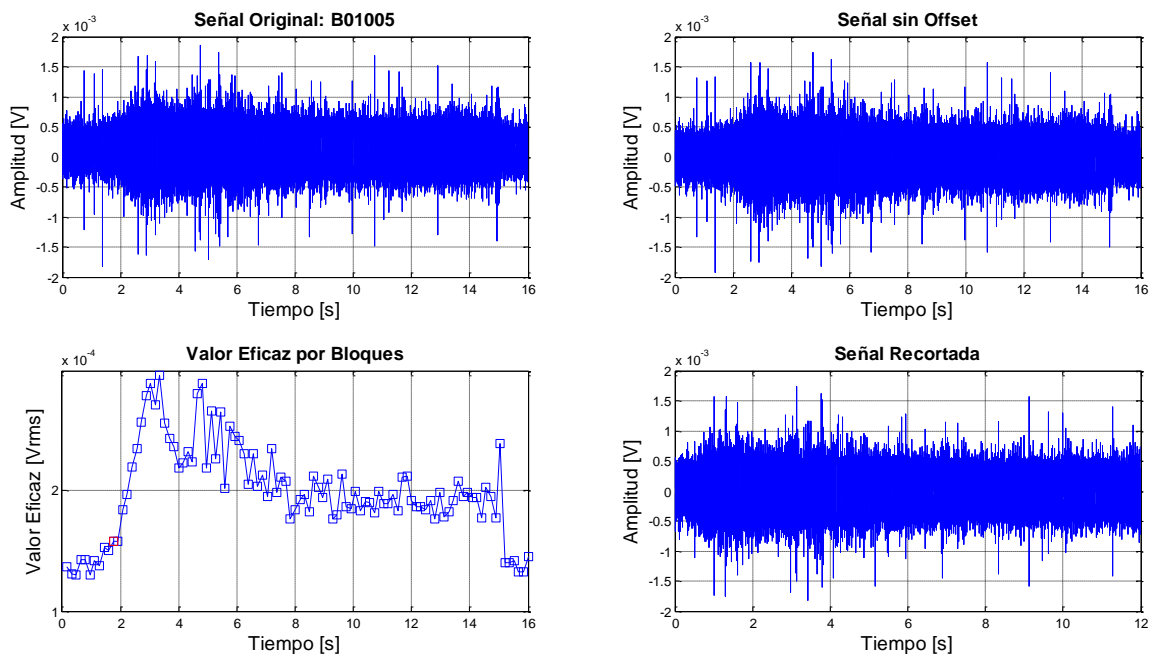
Figura 40. Eliminación del offset



### 6.2.3 Selección del intervalo de interés

La señal se adquirió desde un momento previo al taladrado hasta su finalización, conllevando a tener señales de diferentes tamaños y con datos que no son de interés.

Figura 41. Detección del comienzo del taladrado



Se determino el comienzo de la señal tomando como criterio el aumento del valor eficaz el cual corresponde al inicio del taladrado. La estrategia usada fue la siguiente:

- Se dividió la señal en 100 bloques y a cada uno de estos, se le calculó su respectivo valor eficaz.
- Se calculó el valor promedio de los primeros  $j$  bloques y cuando el valor del bloque  $j+5$  sobrepase en un 30% el valor previamente calculado, se detecto el comienzo del taladrado.

- Se tomo como inicio el tiempo correspondiente al bloque  $j+3$ , y la duración de la señal fue tomada en base a la duración del taladrado de cada agujero.
- Se calculó el tiempo inicial de todos los agujeros y se almacenó en una matriz para su posterior uso.

El resultado del método anteriormente descrito se puede observar en la figura 41 donde el punto rojo representa la detección del comienzo del taladrado.

## **7. ANÁLISIS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO**

Con el objetivo de conocer el comportamiento característico de la señal acústica en el proceso de taladrado en función de la vida de la herramienta de corte se realizó un análisis en el dominio temporal en el cual se extrajeron diversas características, con el objetivo de determinar su potencial como criterio para monitorear el estado de la herramienta o para determinar el momento de la falla, los análisis realizados se citan a continuación:

- Valor Eficaz (RMS)
- Variación del Valor Eficaz (RMS) con la profundidad
- Amplitud
- Rango
- Conteo de Picos
- Asimetría
- Curtosis
- Autocorrelación
- Correlación

### **7.1 ANÁLISIS DEL VALOR EFICAZ (RMS)**

Se calculó el valor eficaz de todos los agujeros y los resultados obtenidos para las brocas que presentaron la falla se muestran en la figura 42, debido a que la vida de las brocas fue diferente se realiza una grafica con el porcentaje de vida.

Se observa la existencia de dos zonas de interés, la primera zona corresponde a la mayor parte de la vida de la herramienta donde la variación del valor eficaz es relativamente baja, y la segunda zona corresponde al final de la misma, en la cual se presenta un abrupto incremento en la medición. En la tabla 18 se definen las zonas de interés para cada uno de los ensayos.

Figura 42. Valor eficaz en función de la vida de la herramienta.

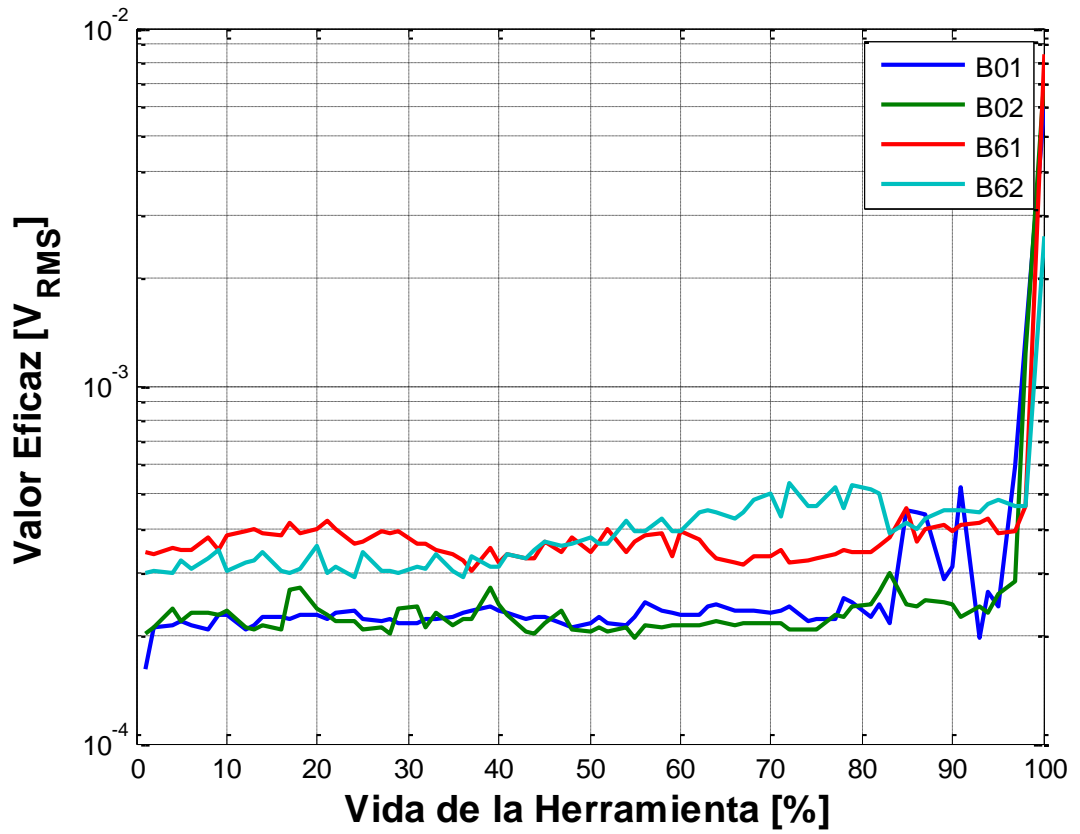


Tabla 18. Definición de las zonas de interés

BROCA	Diámetro [mm]	Zona 1			Zona 2	
		Agujero Inicial	Agujero Final	Porcentaje de vida [%]	Agujero Inicial	Agujero Final
<b>B01</b>	8	1	71	96	63	74
<b>B02</b>	8	1	114	97	115	118
<b>B81</b>	8	1	234	100	-	-
<b>B82</b>	8	1	234	100	-	-
<b>B61</b>	6	1	570	99	571	573
<b>B62</b>	6	1	586	99	587	592
<b>B63</b>	6	1	149	100	-	-

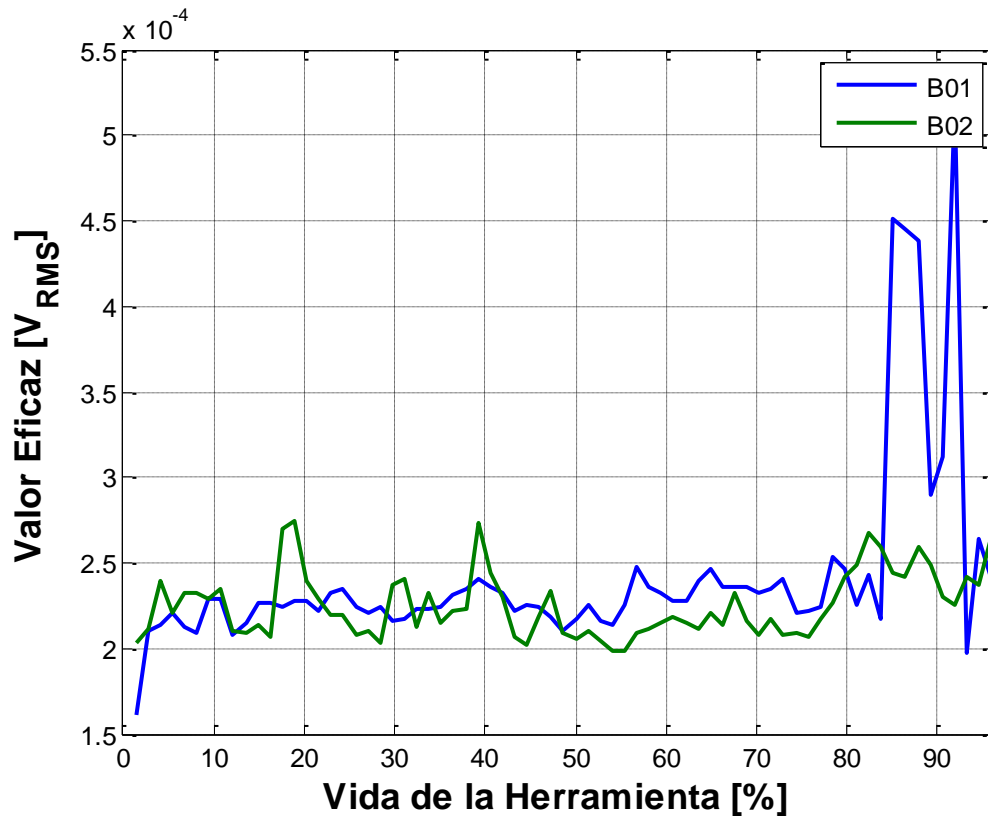
A continuación se procede a analizar en detalle la primera zona de interés definida en la tabla anterior para los diferentes ensayos.

### 7.1.1 Brocas de 8mm

#### 7.1.1.1 Brocas B01 y B02

En la figura 43 se muestra la primera zona comprendida entre el 0-96% de la vida de las brocas B01 y B02, de la cual se plantearon varias hipótesis para explicar el comportamiento observado:

Figura 43. Valor eficaz en la zona 1. Brocas B01 y B02.



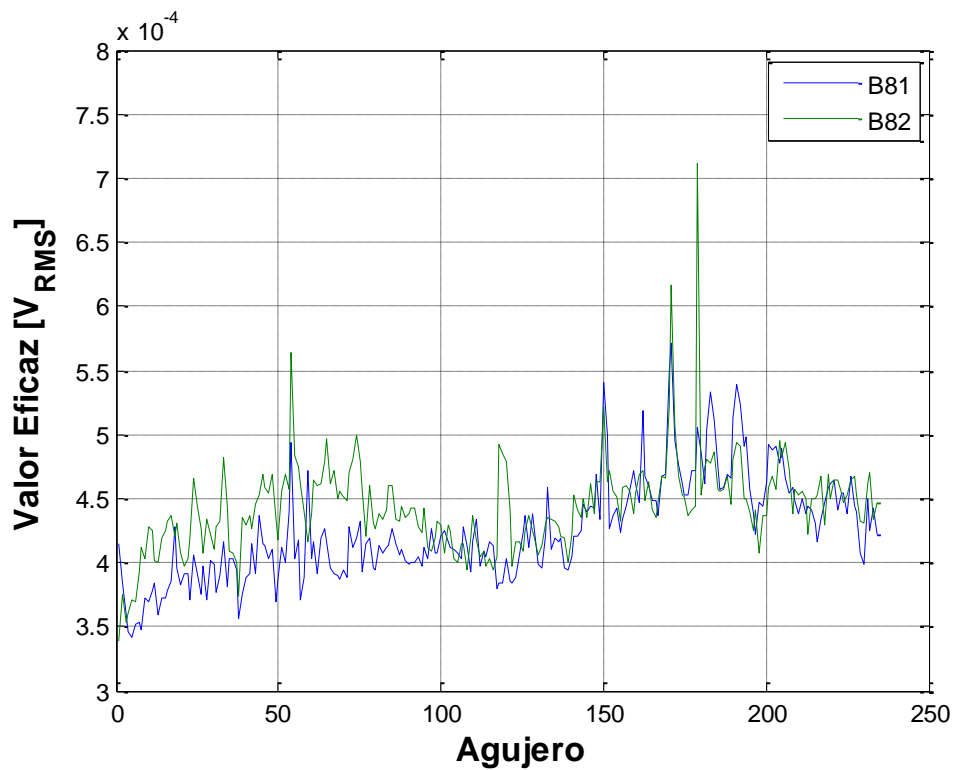
- Las brocas no presentan variaciones significativas, ni algún patrón característico en su comportamiento hasta el 80% de la vida.
- No se observó influencia de la secuencia de corte.

- La broca B01 presento un comportamiento anómalo debido a la existencia de un incremento en el valor eficaz entre el 83% y el 93% de la vida. Esto podría ser causado por la posible existencia de defectos de fábrica, ya que fue la broca de menor duración.

### 7.1.1.2 Brocas B81 y B82

En la figura 44 se muestran las brocas B81 y B82, a pesar de perforar 234 agujeros, no presentaron falla. Se plantearon varias hipótesis para explicar el comportamiento observado:

Figura 44. Valor eficaz en función del número de agujeros. Brocas B81 y B82



- Se observó la aparición de dos zonas, las cuales coinciden con la cantidad de agujeros en una cara de la pieza de trabajo, 117.

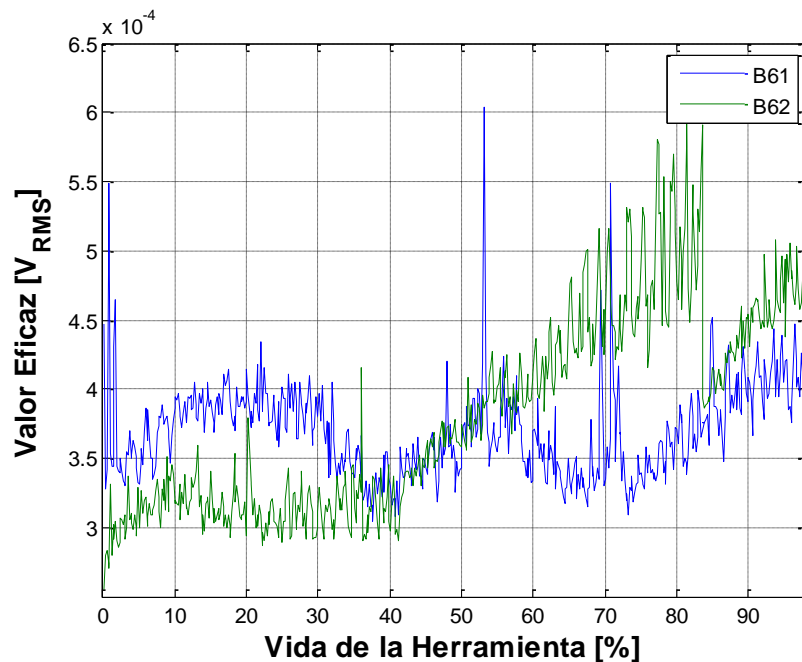
- Se apreció un comportamiento en forma de onda, posiblemente causado por la influencia de la secuencia de maquinado y/o la variación de la dureza en la pieza de trabajo.
- Se apreció un leve aumento en el valor eficaz a través del tiempo que podría tener una relación con el desgaste de la herramienta.

## 7.1.2 Brocas de 6 mm

### 7.1.2.1 Brocas B61 y B62

En la figura 45 se muestra la primera zona comprendida entre el 0-98% de la vida de las brocas B61 y B62, de la cual se plantearon varias hipótesis para explicar el comportamiento observado:

Figura 45. Valor eficaz en la zona 1. Brocas B61 y B62.



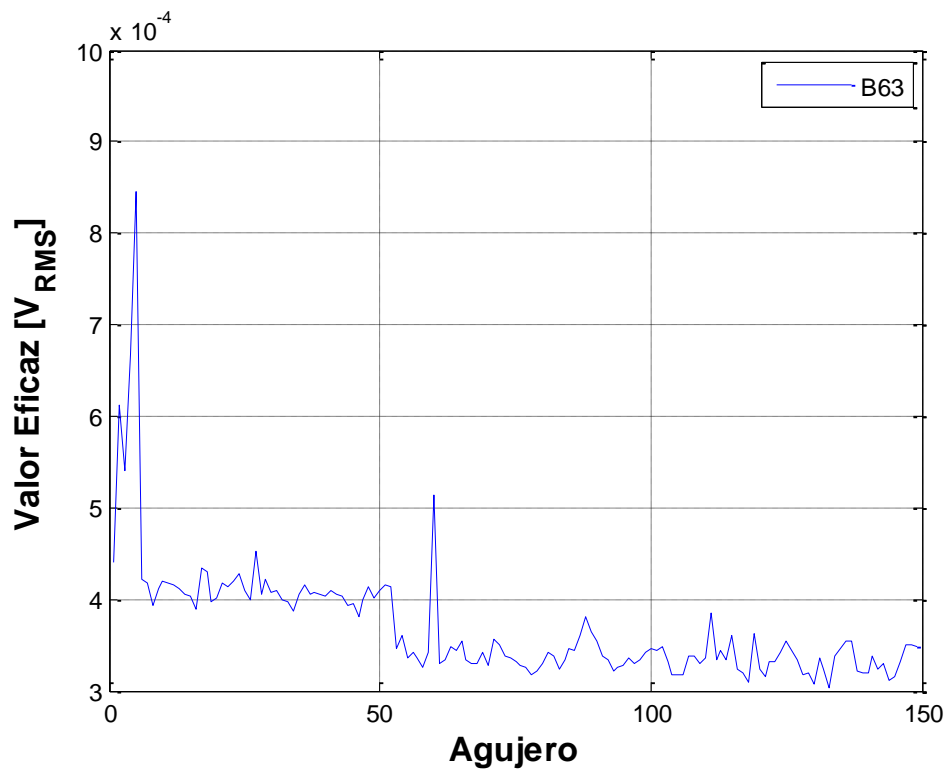
- Al igual que en las brocas B81 y B82, se observó la presencia de varias zonas que coinciden con la cantidad de agujeros realizados en cada cara de la pieza de trabajo.

- La broca B62 se realizó usando la secuencia espiral, en donde la dureza aumenta progresivamente, lo cual podría estar relacionado con el aumento progresivo observado en el valor eficaz.
- Se observó cierta tendencia al aumento del valor eficaz en el comportamiento general.

### 7.1.2.2 Broca B63

Por último se analizó el comportamiento de la broca B63 (ver figura) de la cual se plantearon las siguientes hipótesis:

Figura 46. Valor eficaz en función del número de agujeros. Broca B63



- Se apreció la presencia de picos significativos que coinciden con la operación sin refrigerante.

- Se observó una disminución del valor eficaz después del agujero 53, donde se produjo la reducción en la cantidad de refrigerante.

### 7.1.3 Relación Señal/Ruido

Es de interés conocer la relación existente entre la potencia promedio de la señal correspondiente al taladrado respecto a la potencia promedio del ruido del micrófono, sin ninguna perturbación, para esto se calculó la potencia promedio del 80% de la vida de las brocas. Los resultados obtenidos se encuentran en la siguiente tabla.

$$Relacion \frac{Señal}{Ruido} = SNR = \frac{Potencia_{señal}}{Potencia_{ruido}} = \frac{(V_{Broca_{rms}})^2}{(V_{Mic_{rms}})^2}$$

Tabla 19. Relación Señal/Ruido

	Potencia Promedio	SNR
<b>Micrófono</b>	2,035E-09	1
<b>B01</b>	5,068E-08	24,91
<b>B02</b>	4,852E-08	23,85
<b>B81</b>	1,702E-07	83,64
<b>B82</b>	1,911E-07	93,93
<b>B61</b>	1,299E-07	63,86
<b>B62</b>	1,366E-07	67,16
<b>B63</b>	1,413E-07	69,42

Se observó que la relación señal/ruido es relativamente baja en las dos primeras brocas de 8mm y que aumento al acercarse el micrófono.

#### 7.1.4 Relación de potencia Taladrado/Maquina

Se calculó la relación entre la potencia promedio del proceso de taladrado, respecto a la potencia promedio de la maquina en funcionamiento sin taladrar, para conocer de manera aproximada que porcentaje de la potencia corresponde al taladrado y a la maquina. Los resultados se muestran en la tabla 20.

Tabla 20. Relación de potencia Taladrado/Maquina

Broca	Potencia Promedio	Potencia Promedio Maquina	Componente Maquina [%]	Componente Taladrado [%]
B01	5,0679E-08	2,13E-08	42,1	57,9
B02	4,8519E-08	2,13E-08	44,0	56,0
B81	1,7018E-07	1,88E-08	11,1	88,9
B82	1,9113E-07	1,88E-08	9,8	90,2
B61	1,2994E-07	8,18E-08	63,0	37,0
B62	1,3665E-07	8,18E-08	59,9	40,1
B63	1,4126E-07	8,18E-08	57,9	42,1

- Se apreció que aumento el componente del taladrado en las brocas de 8 mm debido al acercamiento del micrófono a la fuente.
- Se presentó un valor relativamente bajo en las brocas de 6 mm como consecuencia de la operación de la maquina a una velocidad mayor de rotación.

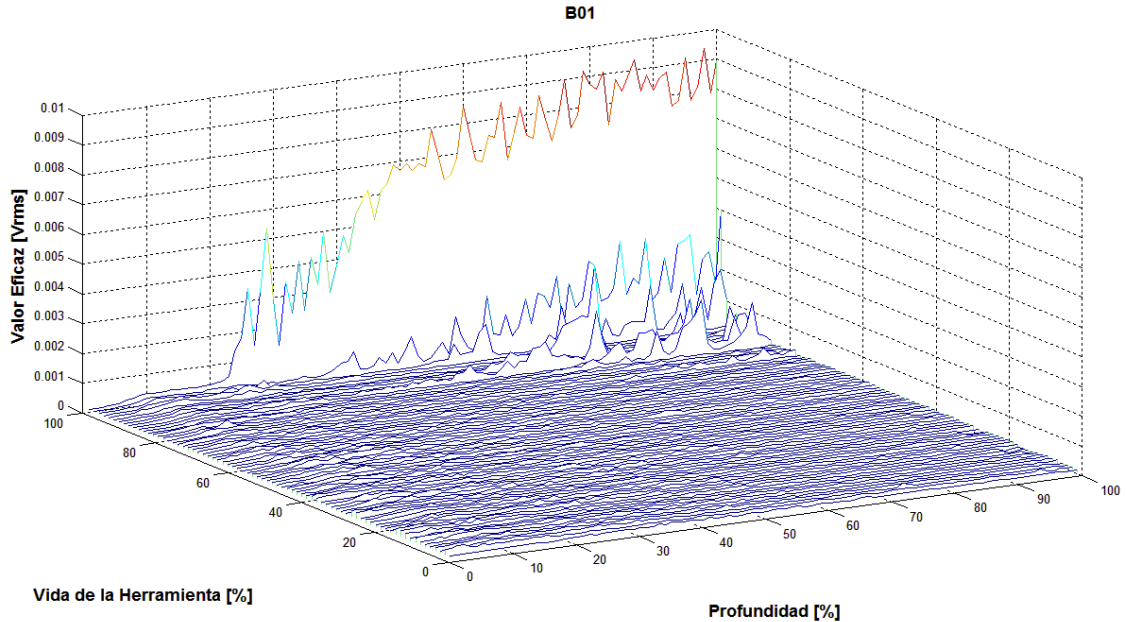
#### 7.1.5 Análisis del valor eficaz en función de la profundidad taladrada

Ya se analizó el comportamiento de la señal por agujeros, ahora resulta de interés analizarla en función de la profundidad para determinar si el incremento en la segunda zona es progresivo o se produce en un momento en específico. Para

este análisis, se dividió la señal en 100 bloques iguales y para cada uno de estos, se calculó su valor eficaz y se obtuvo:

- Para el caso de la broca B01 se apreció (ver figura 47) que aquel aumento en el valor eficaz a partir del 83% de la vida (ver figura 43), se debió a fluctuaciones (o anomalías) que se presentaron, como un comportamiento irregular, en la parte final del taladrado del agujero.

Figura 47. Valor eficaz en función de la vida y la profundidad taladrada de la broca B01.



- Se apreció que durante la primera parte de la vida de la broca B01, el valor eficaz fue aparentemente constante, pero si se analiza detenidamente por medio de otro estilo de gráfica (ver figura 48) es claro que el valor eficaz fue mayor al comienzo del taladrado de cada agujero respecto a la parte final de los mismos.

Figura 48. Valor eficaz en función de vida y profundidad de la broca B01.

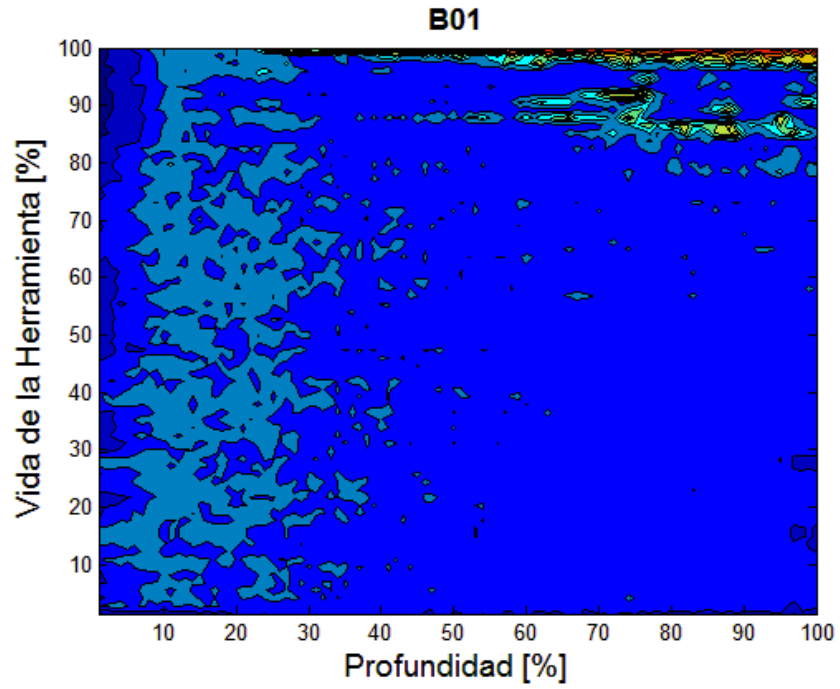
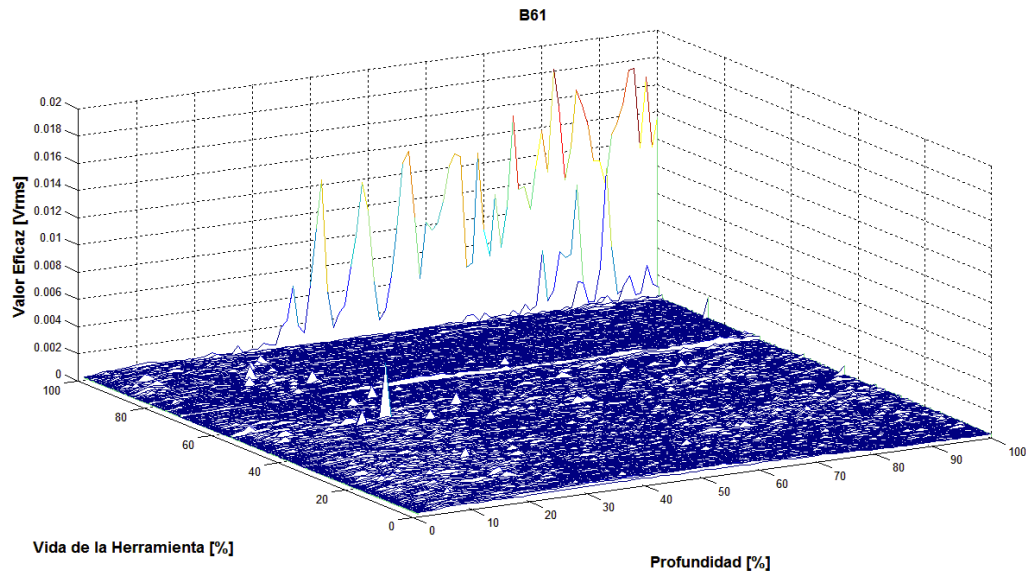


Figura 49. Valor eficaz en función de la vida y la profundidad taladrada de la broca B61.

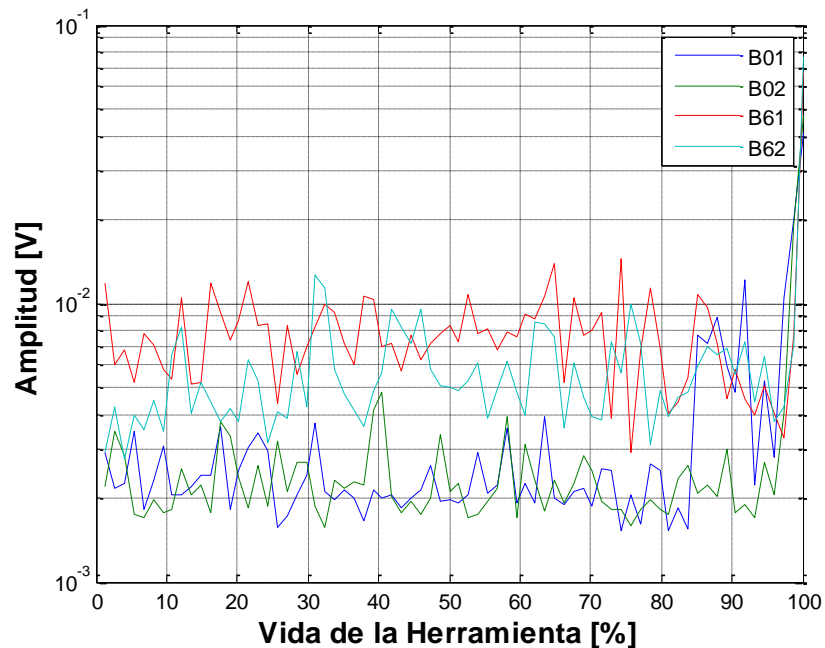


- En la figura 49 se muestra la broca B61 donde se observó el mismo comportamiento de la broca B01, el cual fue característico de todas las brocas que alcanzaron la falla, es decir, fue independiente del diámetro.

## 7.2 ANÁLISIS DE LA AMPLITUD

Para este análisis se tomo el máximo valor absoluto de cada agujero (ver figura 50), el cual presento un comportamiento similar al del valor eficaz pero más irregular y con una menor diferencia entre las dos zonas de interés nombradas anteriormente, lo cual no es de extrañar debido a la relación implícita que existe entre ambos análisis.

Figura 50. Amplitud en función de la vida de la herramienta.



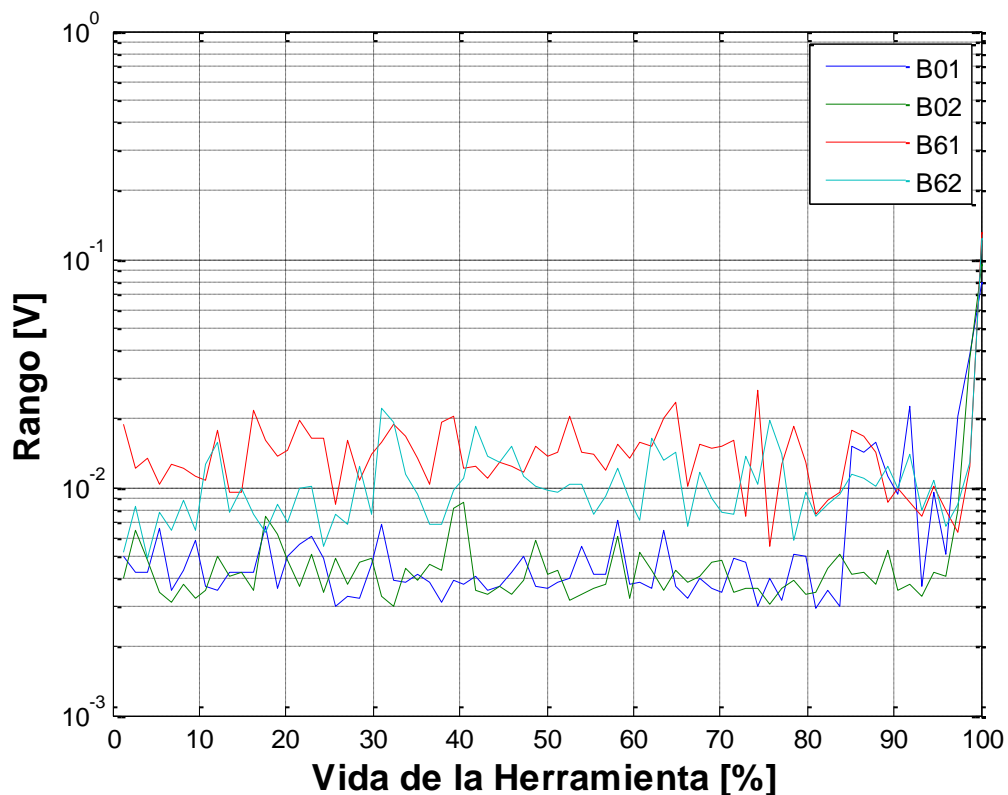
El análisis de la amplitud no mostró nada nuevo, ni resultó un criterio útil, ya que la información extraída, correspondía al valor de un único dato dentro de cada señal. Sin embargo es interesante la relación existente entre la amplitud y el valor eficaz

(Amplitud/ $V_{RMS}$ ), con un valor de 16 en promedio, el cual es un valor muy superior, tomando como referencia la misma relación para una señal sinusoidal (1.41) o un ruido blanco (4.6), lo que conlleva a concluir que la señal del proceso de taladrado posee un alto contenido de ruido.

### 7.3 ANÁLISIS DEL RANGO

Para este análisis se tomó la diferencia entre el valor máximo con el valor mínimo de cada agujero, en la figura 51 se observó un comportamiento muy similar al presentado en la amplitud. Cabe anotar que la relación promedio existente entre el rango y la amplitud (Rango/Amplitud) presentó un valor promedio de 1.85 en lugar de 2 como sería lo esperado para una señal simétrica.

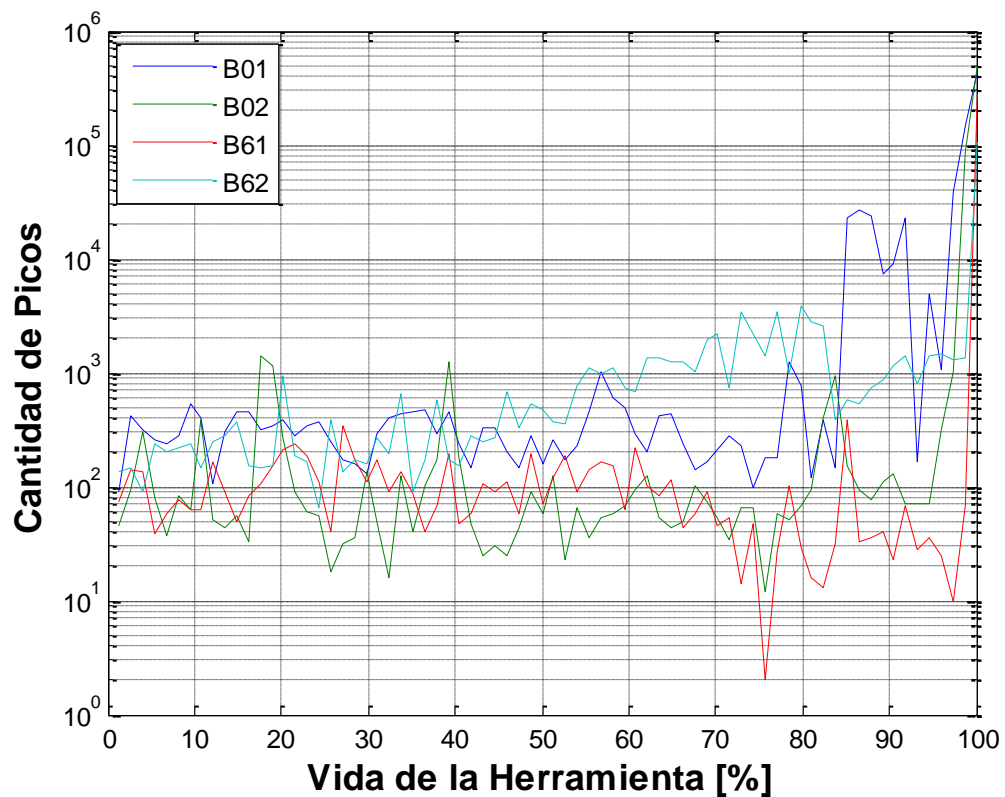
Figura 51. Rango en función de la vida de la herramienta.



## 7.4 CONTEO DE PICOS

Para este análisis, se estableció como criterio que un valor pico es aquel que sobrepasa seis o más veces el valor eficaz del primer agujero de su respectiva broca. En la figura 52 se muestra el comportamiento, el cual conservó las dos zonas de interés, pero presentó una variación muy alta en los valores obtenidos.

Figura 52. Cantidad de picos en función de la vida de la herramienta.

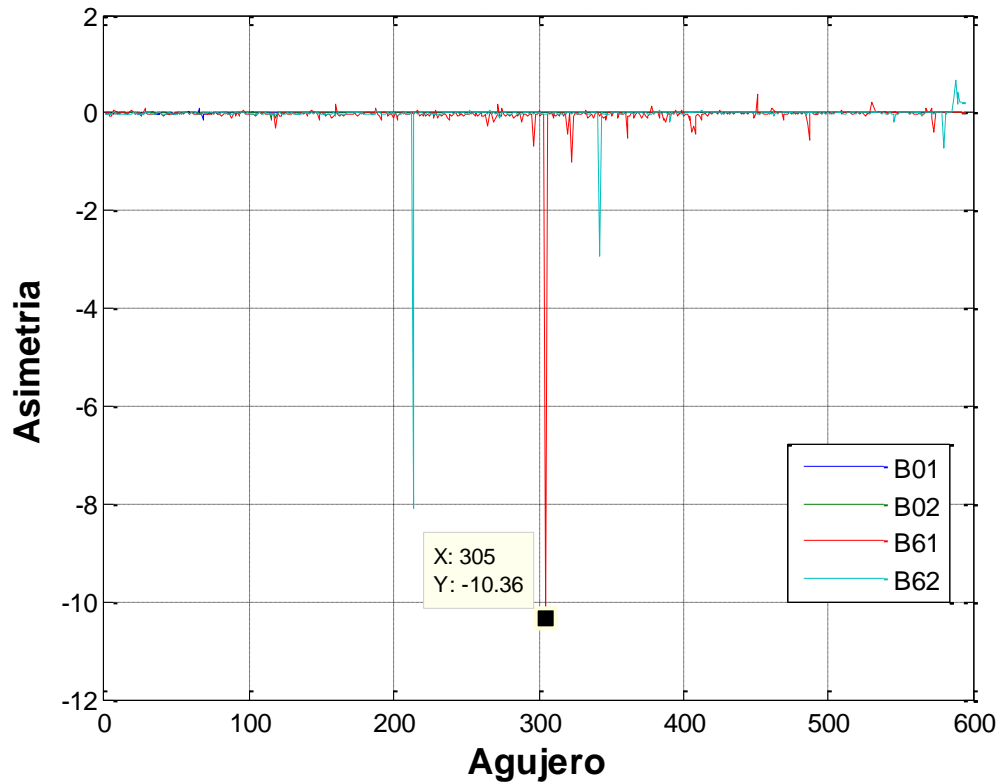


## 7.5 ANÁLISIS DE ASIMETRÍA

Por medio de este análisis se obtuvo un buen indicador para representar el grado de simetría (o asimetría) que presenta una distribución, ya que compara la cantidad de datos que hay tanto a un lado como al otro de la media de los mismos.

En la figura 53 se observó que este análisis no presentó las zonas de interés y por el contrario, fue independiente de la variación del valor eficaz de la señal.

Figura 53. Asimetría en función de la cantidad de agujeros



Varios agujeros presentaron una asimetría menor a -2, es decir, contenían datos muy alejados de la media de su distribución, lo cual indica que en éstos se presentaron alteraciones. Además, tenemos que el mayor pico se presentó en el agujero 305 correspondiente a la broca B61, en donde se observaron (ver figura 54) ligeros picos los cuales parecen estar dentro de lo normal.

Pero al momento de observar en detalle entre 3 y 3.1 segundos (Ver figura 55), se apreció claramente que la asimetría presentada anteriormente correspondió a una perturbación en la señal. Esta perturbación posiblemente fue causada por algún golpe, quizá por alguna viruta chocando con el micrófono.

Figura 54. Agujero B61305

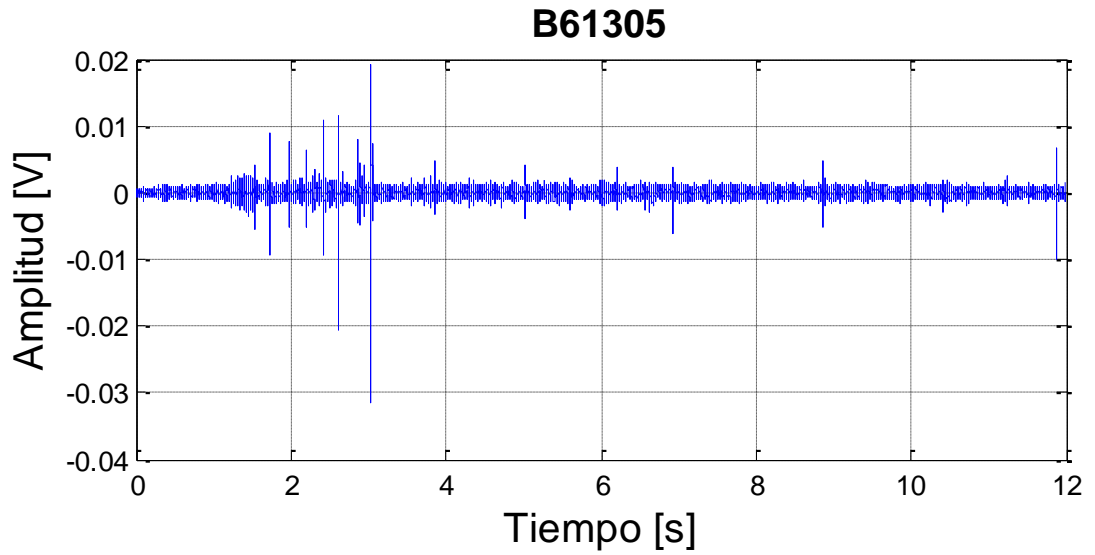
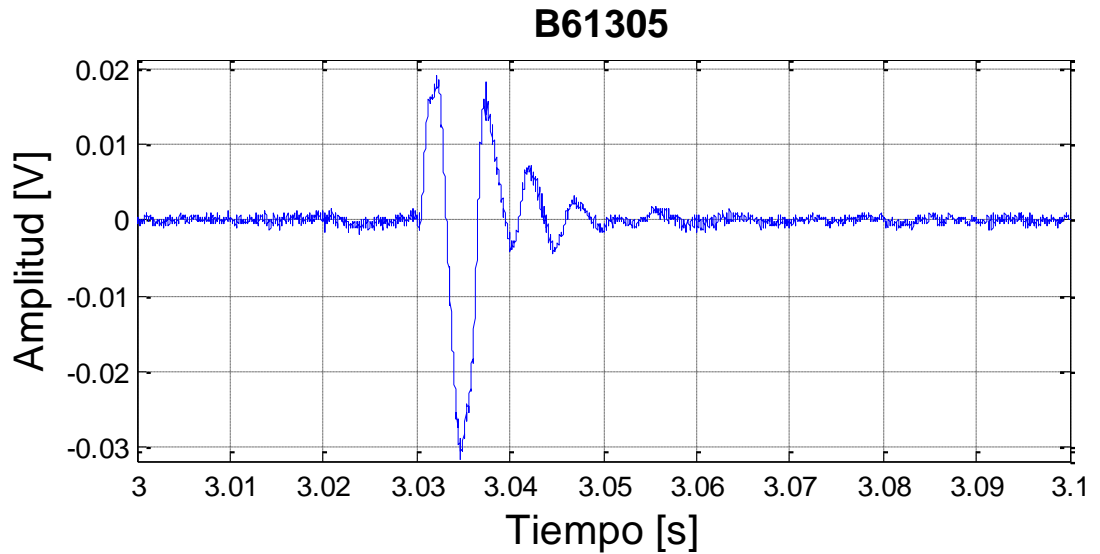


Figura 55. Detalle del agujero B61305



La anomalía presentada en la figura anterior tiene una duración de aproximadamente 0,03 segundos y debido a que la frecuencia de muestreo es de 51200 muestras/segundo, conlleva a tener 1536 datos anormales, una cantidad considerable que afectó la distribución.

En base a lo anterior se concluyo que en el análisis por asimetría, existió una relación entre un alto valor de asimetría y una anomalía de muy corta duración, aproximadamente 0,02 segundos, el cual podría ser un buen indicador para detectar este tipo de perturbaciones en la señal.

## 7.6 ANÁLISIS DE LA CURTOSIS

Es de interés comparar (ponderadamente) el número de observaciones cercanas a la media con el número de observaciones lejanas (con independencia del signo de su distancia a la media de la distribución), para ello, la curtosis es el camino a seguir. El cálculo de la curtosis está dado por la siguiente expresión:

$$k = \frac{E(x - \mu)^4}{\sigma^4}$$

Donde:

$\mu$ : es la media.

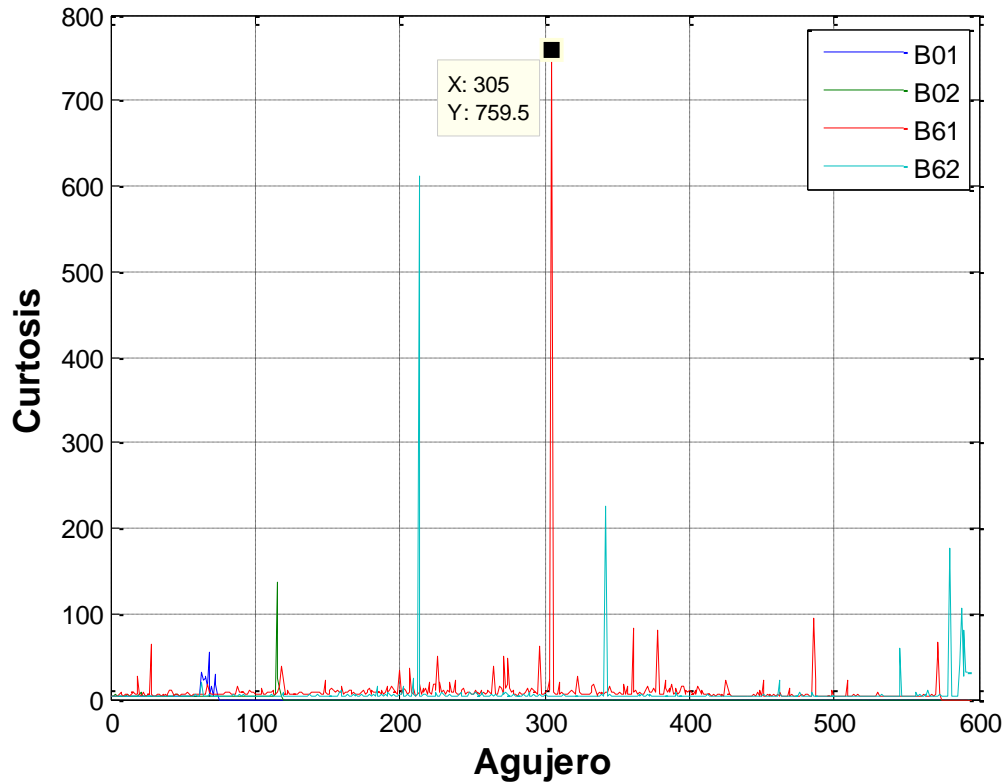
$\sigma$  : es la desviación estándar.

$E(t)$ : representa el valor esperado de la cantidad t.

En ésta, un valor de curtosis mayor a 3 significa que la distribución es más puntiaguda (respecto a la distribución normal), es decir, hay mayor concentración de datos en torno a la media, lo cual para nuestro estudio, ésta es útil para detectar anomalías, pero a diferencia de la asimetría, lo realizará con mayor precisión.

La curtosis presentó las anomalías de una forma más clara (Ver figura 56), ya que en su cálculo usa potencias mayores y pares, lo cual conlleva a tener resultados más visibles y de signo positivo.

Figura 56. Curtosis en función de la vida de las brocas.



Finalmente, el análisis de curtosis global podría ser un criterio útil para detectar aquellos agujeros en los cuales se presentaron anomalías de corta duración. Sin embargo, con el propósito de identificar el instante de tiempo en el cual se presentó la anomalía dentro de un agujero, se realizó un análisis detenido por bloques de tiempo a lo largo de cada agujero, pero debido a que la cantidad de datos disminuye, cambia la proporción de datos anormales con respecto a los totales, conllevando a disminuir considerablemente la utilidad de este análisis.

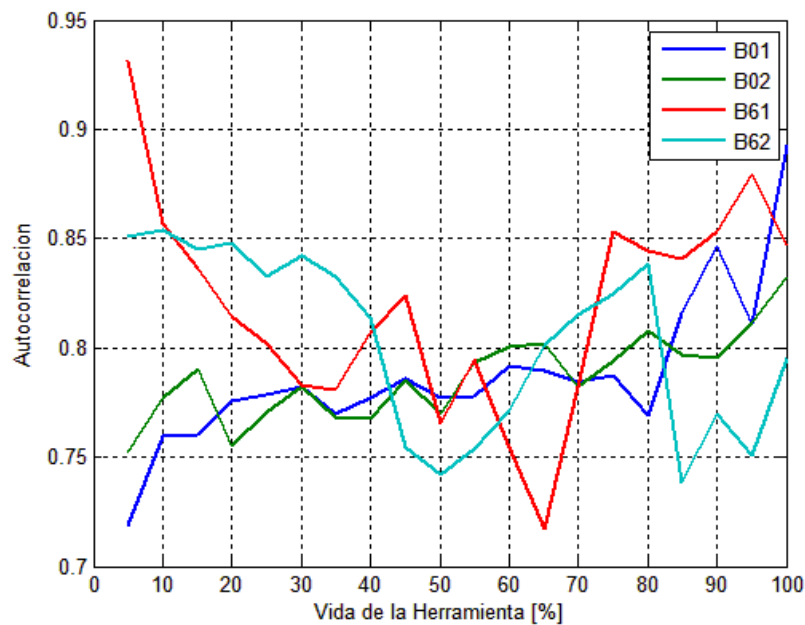
## 7.7 ANÁLISIS DE LA AUTOCORRELACIÓN

Con este análisis se busca establecer la similitud entre señales como una función de la separación de tiempo entre ellas, en la que, por medio de esta herramienta matemática se buscan patrones de repetición, tales como la presencia de una

señal periódica oscurecida por el ruido, o la identificación de la frecuencia fundamental que falta en una señal implícita por sus frecuencias armónicas.

En este análisis se tomó el valor de autocorrelación máximo diferente de la unidad, como característica de cada agujero y se graficó en el tiempo (ver figura 57). A partir de ésta se apreció para las brocas B01 y B02 una leve tendencia al alza con el tiempo, mientras que para las brocas B61 y B62, se presentó un comportamiento en forma de U, pero en general, no se observó un patrón claro.

Figura 57. Auto correlación en función de la vida de las brocas.

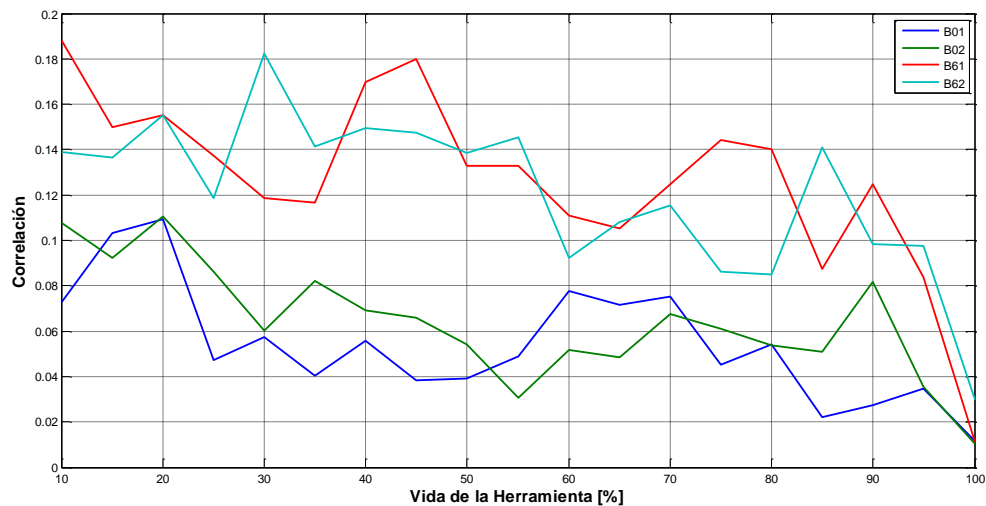


## 7.8 ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN

En este análisis es de aclarar que un valor alto de correlación conlleva a tener procesos más periódicos (similares) donde toma su máximo valor como la unidad (lo cual significa que es la misma señal), mientras que bajos valores indican aleatoriedad.

Se tomó como valor de referencia los primeros agujeros de cada broca, de tal manera que los siguientes agujeros se correlacionaron con éste. De la figura 58 se tuvieron valores muy bajos, lo cual indica que las señales son altamente aleatorias, ya que a modo de comparación, la correlación entre dos ruidos blancos tiene un valor de 0.004. Por otra parte se apreció una leve tendencia a la baja.

Figura 58. Correlación en función de la vida de las brocas.



## 7.9 CONCLUSIONES E HIPÓTESIS GENERALES

- El valor eficaz fue afectado por las condiciones del proceso, como lo son la pieza de trabajo, dureza del material, la secuencia de taladrado y el nivel de refrigerante. Sin embargo este análisis presento claramente dos zonas de interés las cuales permiten identificar si la herramienta se encuentra en buenas condiciones o por el contrario esta desgastada.
- Cuando la broca estuvo cerca del final de su vida útil, presentó un aumento del valor eficaz en los últimos tramos de cada agujero, lo cual esta relacionado con el desgaste de la broca. Tal aumento del valor eficaz posiblemente fue ocasionado por:

- Aumento de las fuerzas de corte y en consecuencia, el incremento de la energía general del proceso.
  - Aumento del contacto entre el margen de la broca con la superficie del agujero.
  - Generación de viruta irregular la que podría atascarse y generar esos incrementos repentinos en el valor eficaz.
  - Aumento de la temperatura que impide una correcta refrigeración y lubricación ya que los agujeros realizados sin refrigerante también presentaron este comportamiento.
  - Adhesión del material de la pieza de trabajo a la broca.
  - Reducción de la capa previamente endurecida por tratamiento superficial de la broca.
- El monitoreo del sonido a través de un análisis del valor eficaz por bloques, presenta potencial para indicar el estado de la broca, ya que permitiría la detección de la falla de una manera rápida y sencilla por medio del establecimiento de un valor umbral. Es de aclarar que este análisis es sensible a alteraciones y sonidos ajenos al proceso de taladrado como golpes al micrófono por virutas.
  - Los análisis de amplitud, rango y conteo de picos presentaron un comportamiento similar al observado en el análisis de valor eficaz, lo cual tiene sentido ya que estos análisis guardan cierta relación.
  - Los análisis de asimetría y curtosis presentaron un comportamiento independiente del desgaste de la herramienta de corte y mostraron valores altos cuando se presentaron anomalías de corta duración.

- El análisis de correlación y autocorrelación permitió conocer la naturaleza aleatoria de la señal.

## **8. ANÁLISIS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA**

Con el objetivo de extraer información útil y característica de la señal acústica generada por el proceso de taladrado, se analizaron los datos en el dominio de la frecuencia. De esta manera, mediante el uso de espectros se buscó detectar cambios continuos en la señal y conocer sus principales componentes y además, se buscaron anomalías transitorias o de corta duración mediante el uso de espectrogramas.

### **8.1 ANÁLISIS ESPECTRAL**

Para observar el comportamiento general de todos los agujeros, se realizó el cálculo de la densidad espectral de potencia mediante el software MATLAB y con el uso del método Welch con los siguientes parámetros:

- Ventana de Hamming de 256 puntos lo cual produce una resolución de 200 Hz.
- Traslape del 25%.

#### **8.1.1 Comportamiento General**

##### **8.1.1.1 Comportamiento General Broca B01 y B61**

Para el caso de los espectros de las brocas que alcanzaron la falla (ver figura 59 y 60), se diferencié dos zonas claramente, la primera en donde no ocurrieron cambios significativos y la segunda en la cual se observaron cambios en los agujeros finales, los cuales coincidieron con los aumentos de valor eficaz presentados al final de la vida de la herramienta.

En la figura 60 se apreció la existencia de cambios en la zona comprendida entre 2KHz y 4KHz, lo que indicó que esta región del espectro estuvo relacionada con las variaciones del valor eficaz en la mayor parte de la vida de la broca.

Figura 59. Espectro en función de la vida de la broca B01.

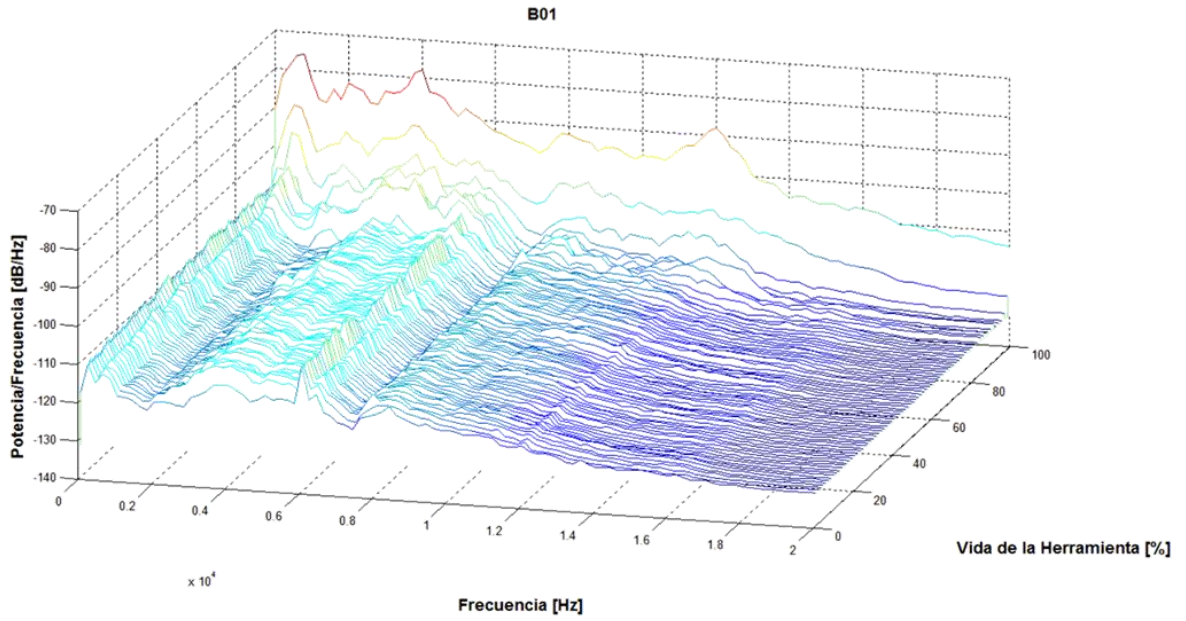
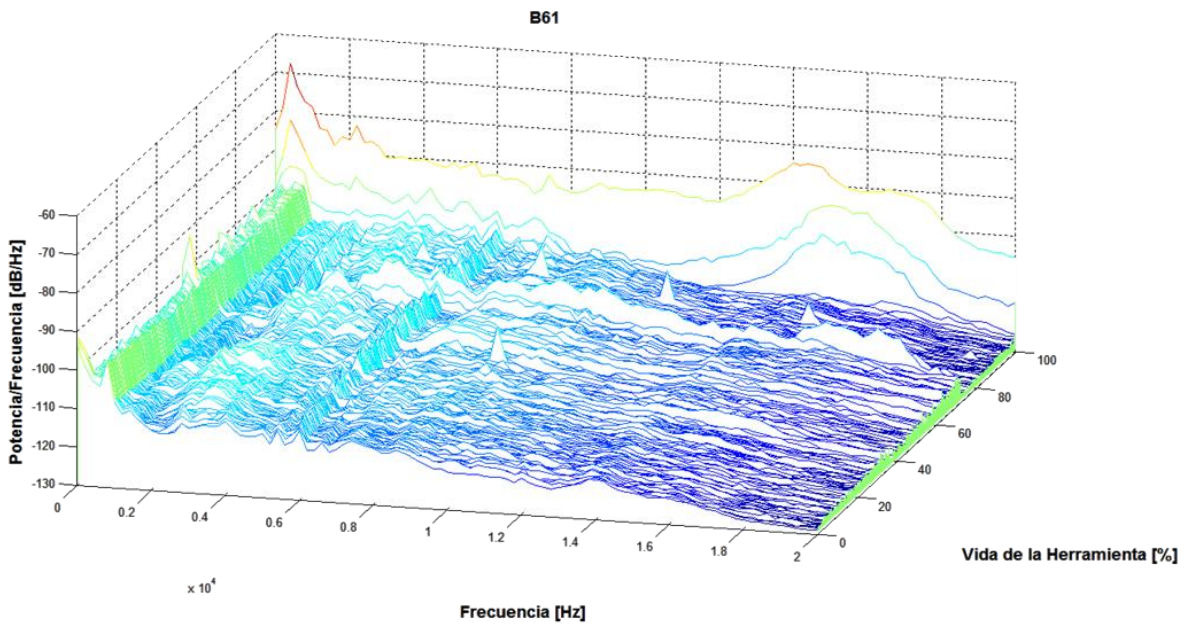


Figura 60. Espectro en función de la vida de la broca B61.



Por otra parte, al final de la vida de la broca la potencia aumentó por bandas o regiones del espectro pero siempre conservó su forma, excepto por la banda

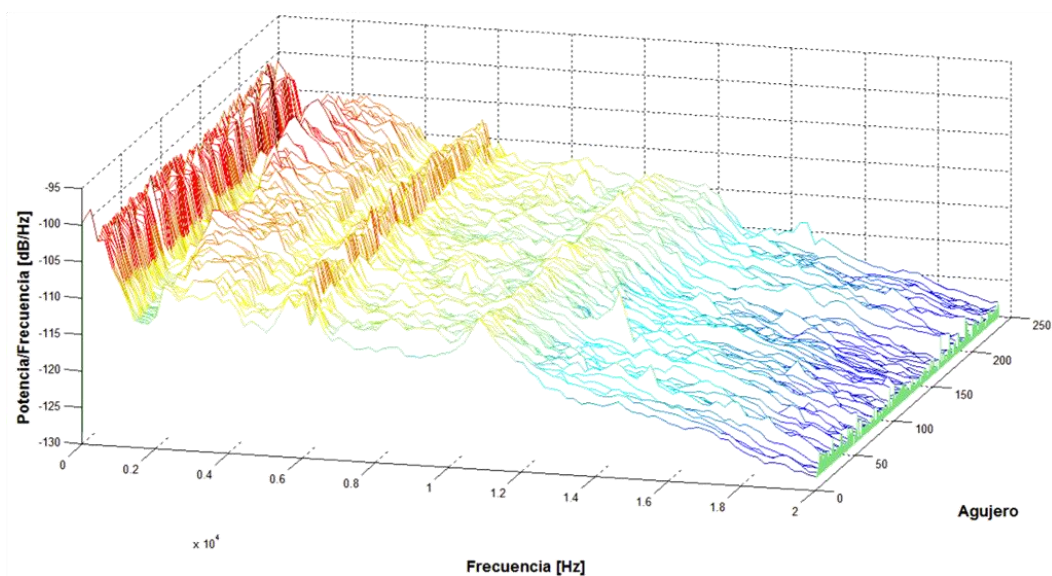
comprendida entre los 10 KHz y 13 KHz para el caso del ensayo B01 (8mm) y de 12 KHz a 18 KHz para el caso del ensayo B61 (6mm), en la cual se presentó un cambio notable de forma.

Finalmente se observaron ciertos agujeros que sobresalieron en el espectro para después desaparecer sin dejar un cambio en el comportamiento general. Sin embargo, al reproducir el sonido de estos agujeros, se notó una gran presencia de ruido y un sonido anormal al taladrado, por lo que se planteó la posibilidad de una falla o interferencia en los instrumentos de medición.

### 8.1.1.2 Comportamiento General Broca B81 y B63

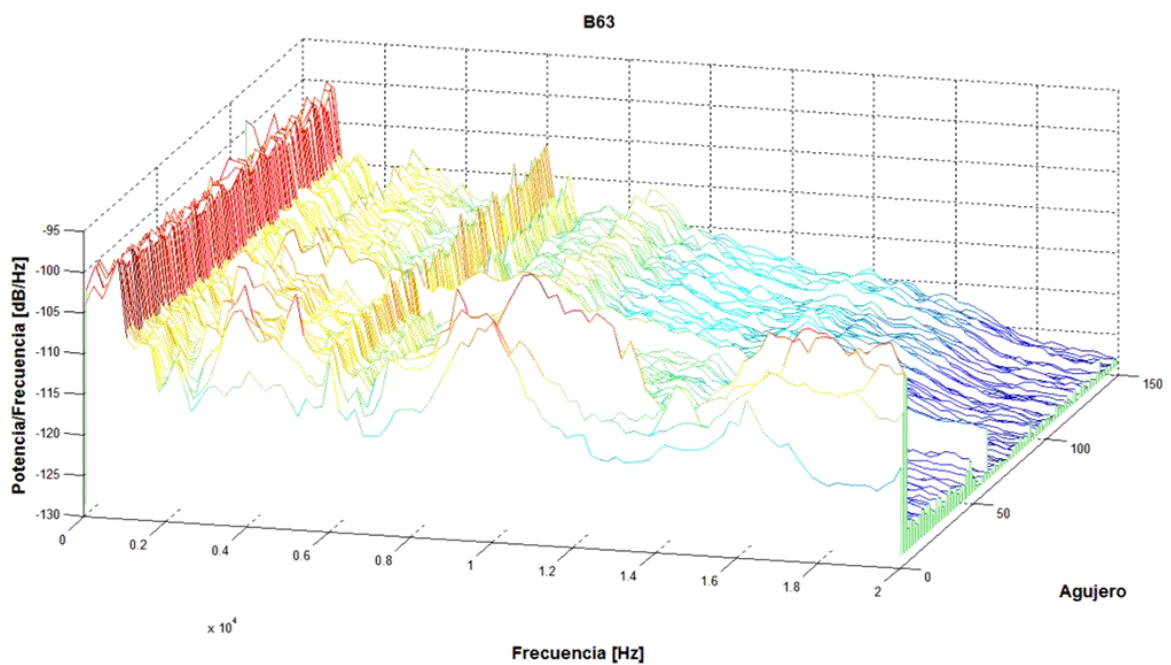
En la figura 61 se observaron ligeras variaciones en la potencia comprendida entre 2 KHz y 4 KHz, las cuales presentaron una forma similar a lo obtenido en el análisis del valor eficaz (ver figura 44). Lo anterior permitió concluir que aquellos cambios en el valor eficaz, ocurrieron en esta región del espectro.

Figura 61. Espectro en función de la vida de la broca B81.



En el caso de los primeros agujeros de la broca B63 (ver figura 62) los cuales fueron realizados sin refrigerante, se observó una diferencia notable con los agujeros finales de las brocas que fallaron, en especial en la región comprendida entre los 8KHz y 12KHz. Esto indicó que a pesar de presentar un valor eficaz elevado y similar al de los agujeros previos a la falla, el sonido producido fue diferente al generado por una broca desgastada.

Figura 62. Espectro en función de la vida de la broca B63.



### 8.1.2 Comportamiento Promedio

A continuación se procede a analizar con más detalle cada zona de interés, definidas en la tabla 21. En la primera zona se calculo el promedio de los espectros para obtener un único espectro característico por broca y la segunda zona, se analizo mediante espectrogramas para tener en cuenta la variación temporal, debido a que el valor eficaz presento grandes variaciones al final de la vida de la broca.

Tabla 21. Zonas de Interés

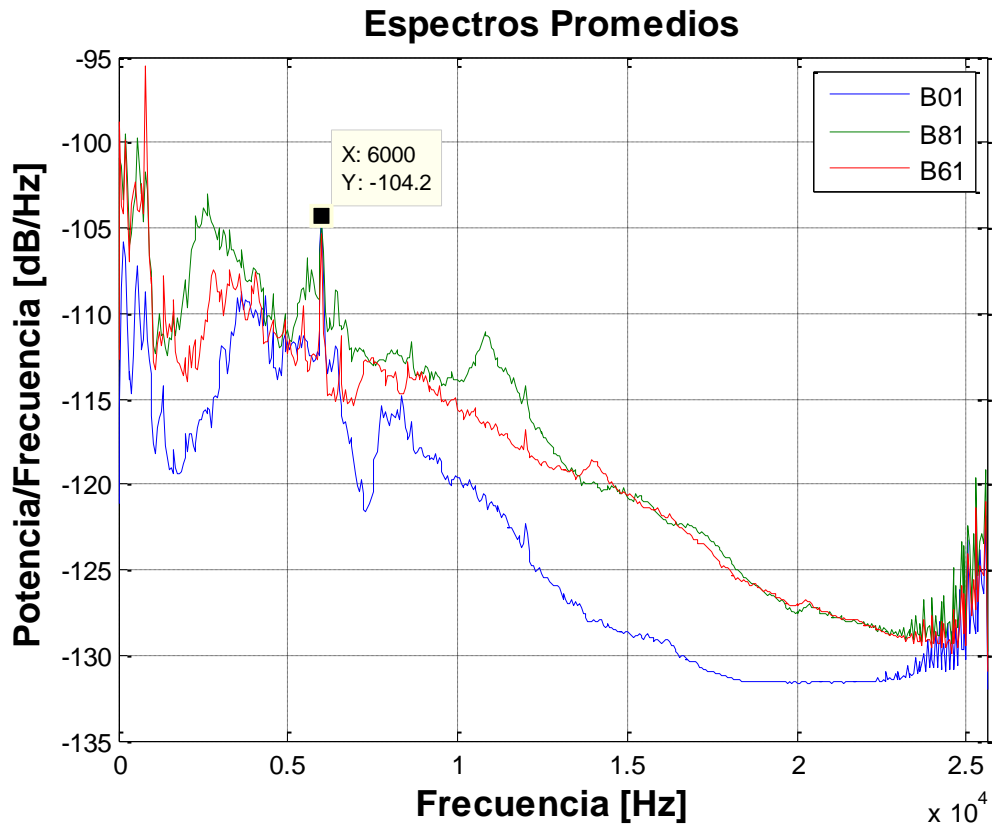
BROCA	Zona 1			Zona 2		
	Diametro [mm]	Agujero Inicial	Agujero Final	Porcentaje de vida [%]	Agujero Inicial	Agujero Final
<b>B01</b>	8	1	71	96	63	74
<b>B02</b>	8	1	114	97	115	118
<b>B81</b>	8	1	234	100	-	-
<b>B82</b>	8	1	234	100	-	-
<b>B61</b>	6	1	570	99	571	573
<b>B62</b>	6	1	586	99	587	592
<b>B63</b>	6	1	149	100	-	-

Se realizó nuevamente el cálculo de la densidad espectral de potencia mediante el software MATLAB usando el método Welch con una ventana Hamming de 1024 puntos y 25% de traslape, lo cual produjo una resolución de 50 Hz para apreciar mas detalles. Este análisis se realizo para 40 agujeros de cada broca igualmente espaciados y posteriormente se promediaron los correspondientes a la primera zona de interés. El comportamiento característico se representa en la figura 63, de donde se plantearon las siguientes hipótesis:

- Se observó influencia del micrófono con el cual se realizaron las grabaciones en el comportamiento general del espectro, en especial en la zona de alta frecuencia donde existe ruido proveniente de los instrumentos de medición.
- Las brocas B01 y B81 presentaron espectros muy distintos debido al cambio de micrófono y distancia de grabación, lo cual indicó una fuerte influencia del aparato de medición.

- Todas las brocas coincidieron en el pico de 6000 Hz que corresponde a la maquina, como se observara más adelante.

Figura 63. Espectro Promedio brocas B01, B81 y B61



### 8.1.2.1 Brocas de 8 mm

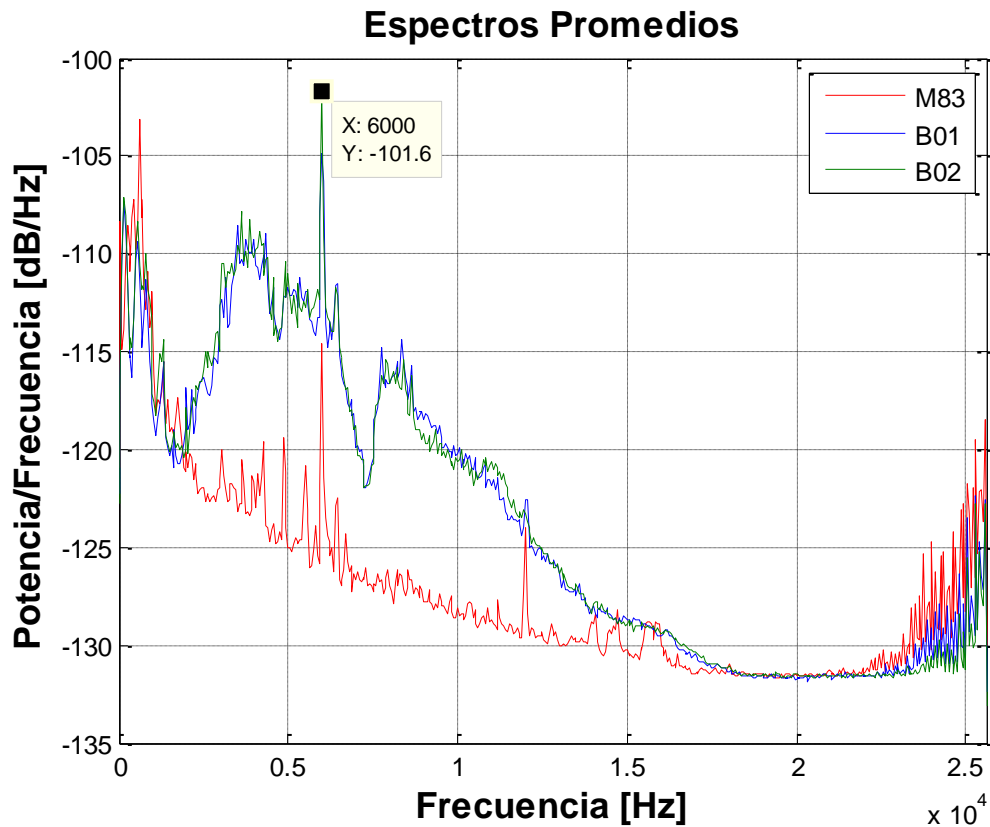
#### Brocas B01 y B02

En la figura 64 se muestra el espectro para las dos primeras brocas de 8 mm y el espectro de la maquina en funcionamiento, de la cual se observo:

- Los espectros de las dos primeras brocas de 8 mm fueron prácticamente iguales entre sí.

- En la región comprendida entre 0-2000 Hz, no existió diferencia apreciable entre el sonido de la maquina y el sonido del proceso del taladrado, lo que indicó poca influencia del sonido del proceso de taladrado en este rango.

Figura 64. Espectro Promedio brocas B01, B02 y Maquina en funcionamiento

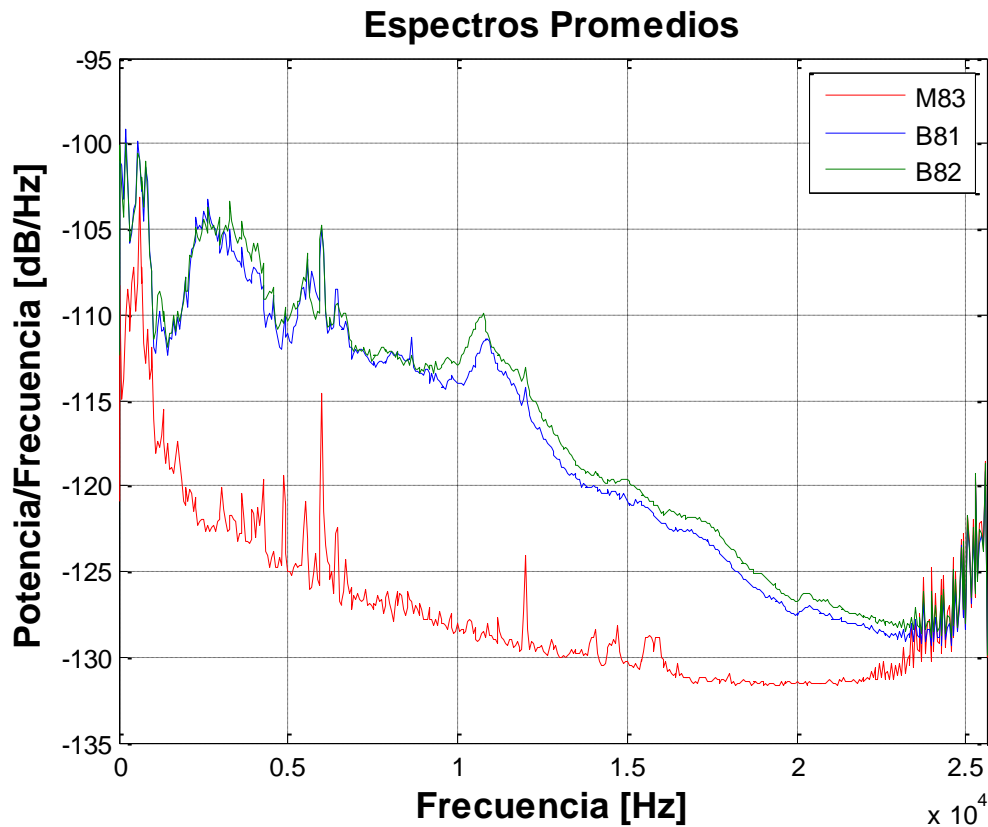


- Se apreció un pico notable en 6000 Hz, el cual fue producto de la maquina y que aumentó de magnitud cuando la maquina estaba taladrando.
- También se observó que el sonido propio al taladrado esta comprendido entre 2-17 kHz con zonas de mayor potencia alrededor de 4kHz y 8 kHz, pero sin la presencia de picos característicos.

## Brocas B81 y B82

En la figura 65 se muestra el espectro para las brocas B81 y B82 junto al espectro de la maquina en funcionamiento, de la cual se observo:

Figura 65. Espectro Promedio brocas B01, B02 y Maquina en funcionamiento



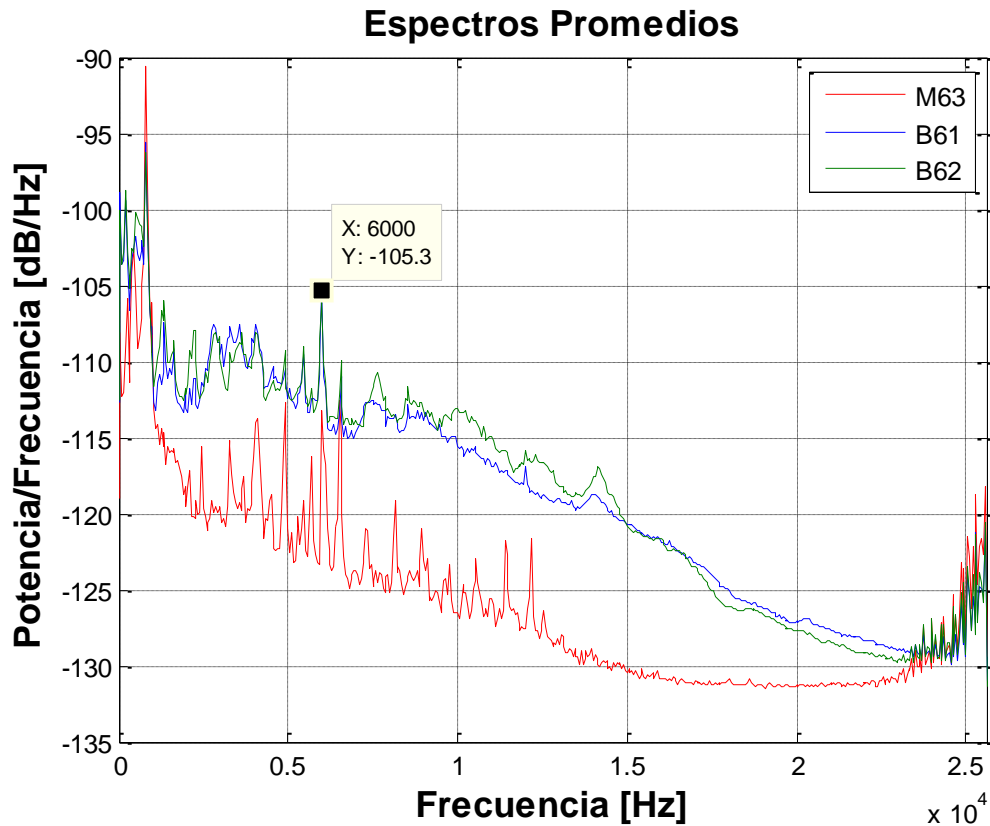
- Se observó que el espectro perteneciente a las brocas B81 y B82 presentaron un comportamiento muy similar.
- En la región comprendida entre 0-1700 Hz se apreció un parecido entre el espectro correspondiente al sonido del taladrado con el sonido de la maquina, donde existe un aumento de magnitud cuando la maquina se encuentra taladrando.

### 8.1.2.2 Brocas de 6 mm

#### Brocas B61 y B62

En la figura 66 se muestra el espectro para las brocas B61 y B62 junto al espectro de la maquina en funcionamiento, de la cual se observó:

Figura 66. Espectro Promedio brocas B61, B62 y Maquina en funcionamiento



- Se mostro un comportamiento similar para las brocas B61 y B62 con ligeras diferencias en la zona comprendida entre 10 y 15KHz, lo cual no es de extrañar porque estas dos brocas presentaron una variación en el comportamiento observado en el valor eficaz.
- También se apreció que el espectro correspondiente a la maquina, presentó una mayor cantidad de picos los cuales podrían afectar los espectros del proceso, en especial el pico de los 6KHz que sobresale de manera clara.

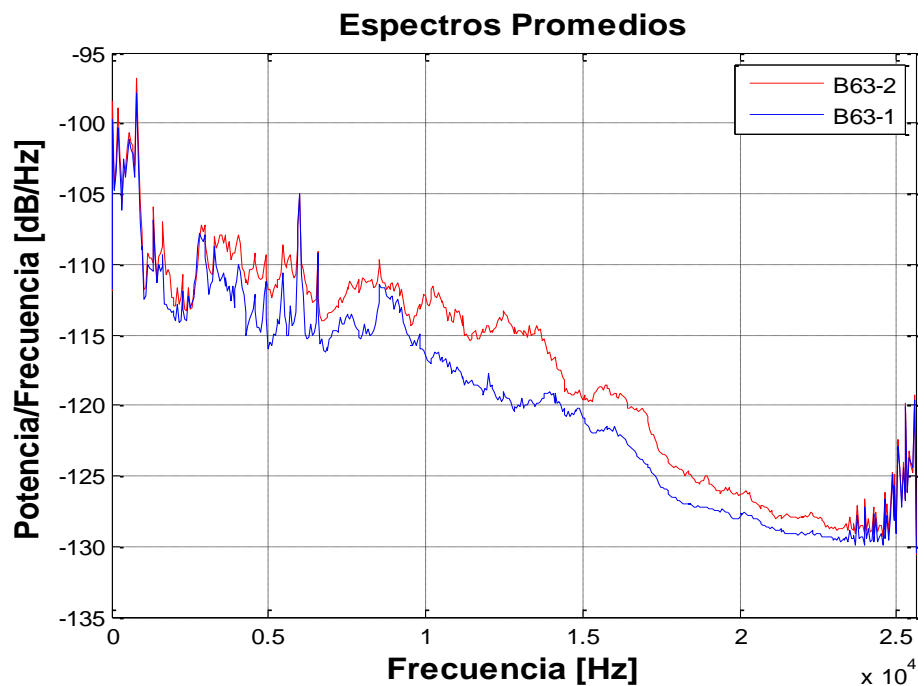
- Similar a las brocas de 8 mm, entre 0-1700 Hz se apreció un parecido entre los espectros del sonido del taladrado con el de la maquina.

### Broca B63

En la broca B63 se variaron las condiciones de corte:

- Los primeros 5 agujeros fueron realizados sin refrigerante.
- Los agujeros 6-52 se realizaron con un nivel alto de refrigerante.
- Los agujeros restantes, 53-149, con un nivel normal de refrigerante.

Figura 67. Espectro Promedio broca B63

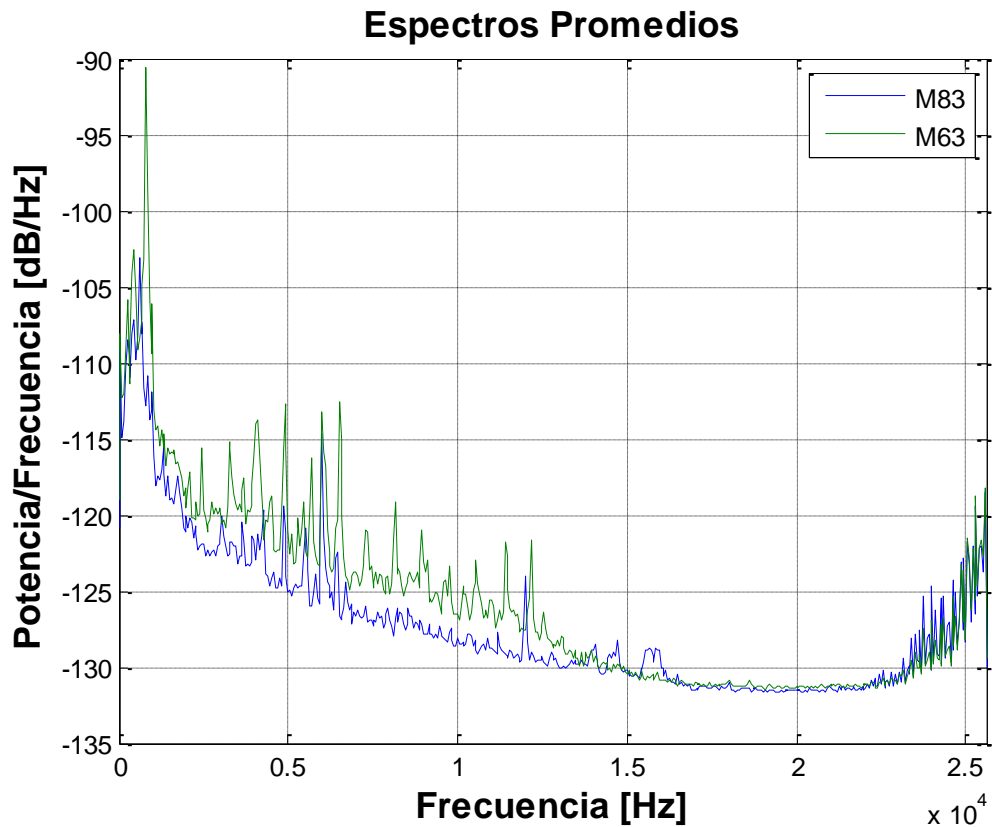


Se calcularon los espectros promedio (ver figura 67) correspondientes al nivel normal de refrigerante (B63-1) y al nivel alto (B63-2), en los cuales se apreció un claro aumento en la mayoría del espectro, desde 10kHz en adelante, especialmente, en la zona comprendida entre 10kHz y 15kHz.

### 8.1.2.3 Maquina en Funcionamiento

La maquina operó a las velocidades de 796 rpm y 1061 rpm para las brocas de 8 y 6 mm respectivamente. Se apreció un mayor nivel de potencia para la broca de 6 mm así como un mayor numero de picos, los cuales pueden ser armónicos de la maquina debido a su distribución ligeramente uniforme (ver figura 68)

Figura 68. Espectro Promedio de la Maquina en funcionamiento



## 8.2 ESPECTROGRAMA

Con el propósito de visualizar las anomalías transitorias, es decir, aquellas que se presentan durante un tiempo corto, se procedió a realizar los respectivos espectrogramas para cada una de las brocas en algunos agujeros de interés.

Los espectrogramas se realizaron con las siguientes características:

- Una ventana de 0,2 [s], lo que equivale a 10240 datos
- Traslape del 50%.
- 512 puntos para el cálculo de la transformada de Fourier discreta generando una resolución de 100 Hz.

### 8.2.1 Broca B01

En las siguientes graficas se observa el espectrograma para los agujeros 60, 61, 62, 63, 64, y 74 de la broca B01, de lo cual se planteo lo siguiente:

Figura 69. Espectrograma del agujero B01060

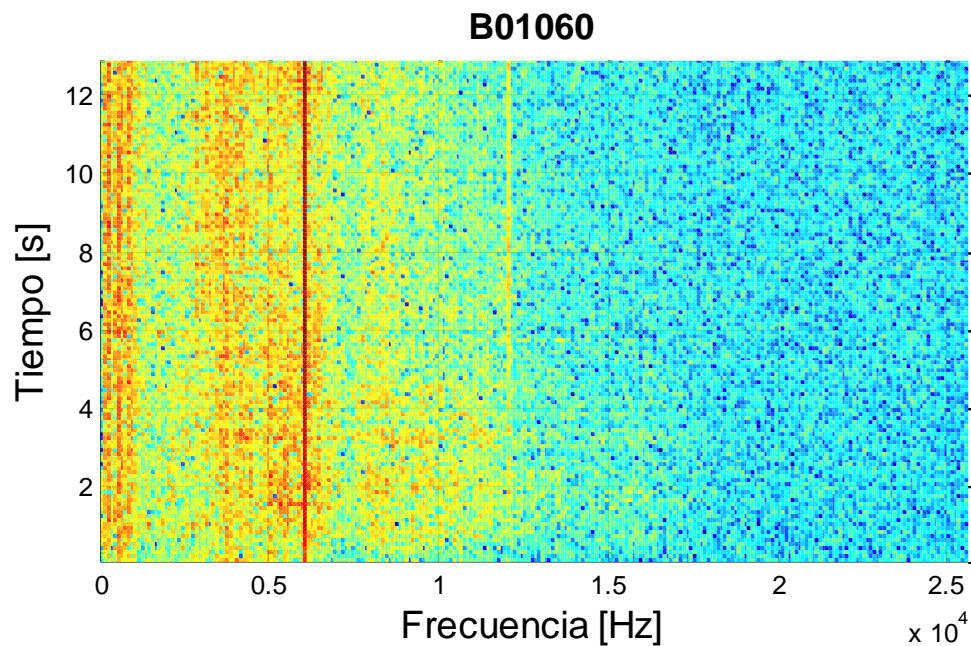


Figura 70. Espectrograma del agujero B01061

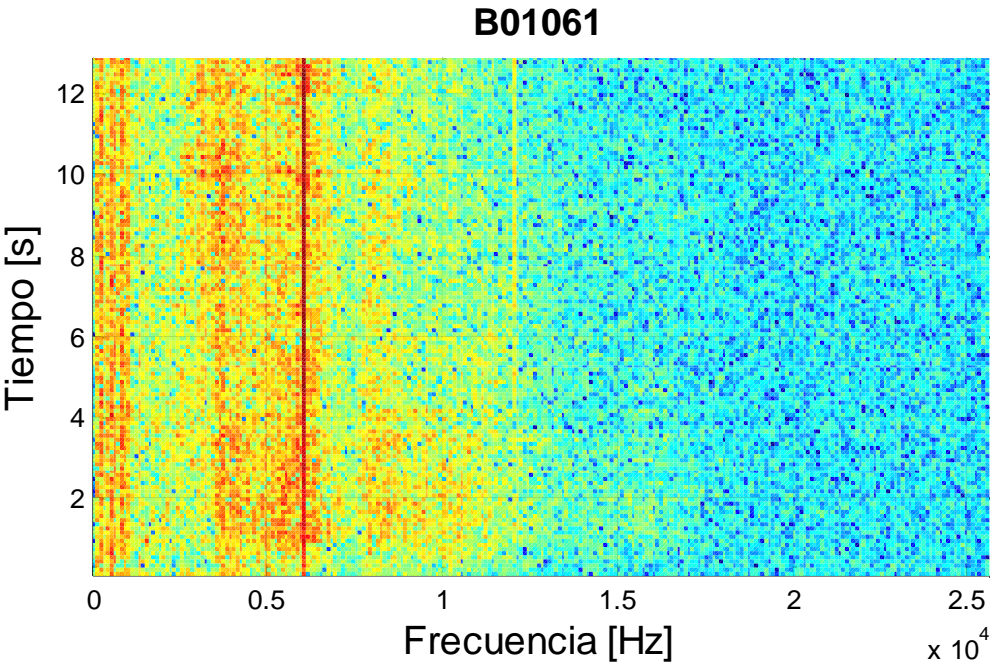


Figura 71. Espectrograma del agujero B01062

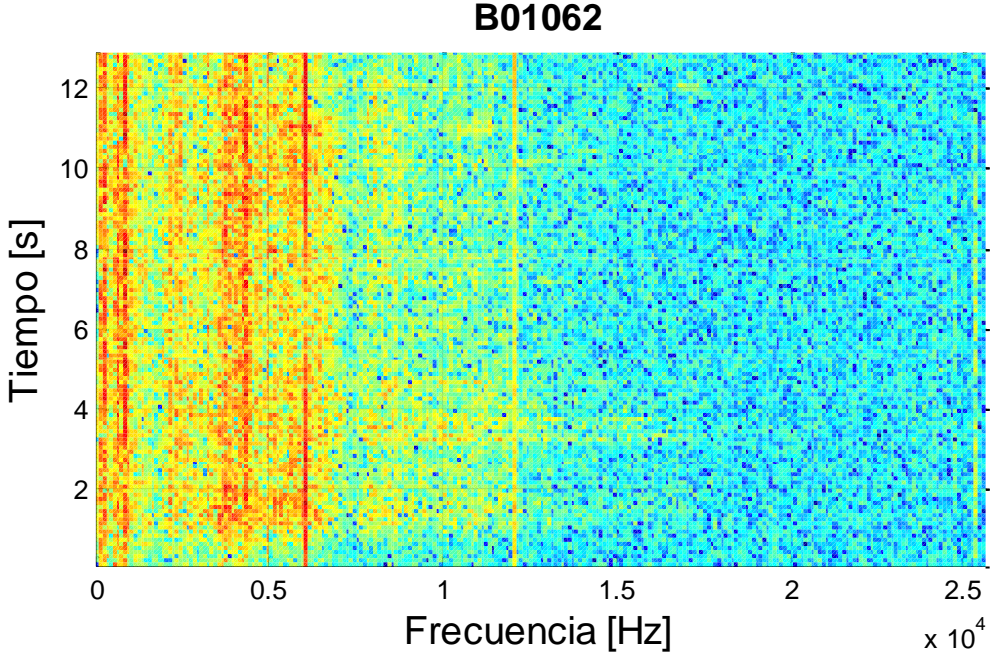


Figura 72. Espectrograma del agujero B01063

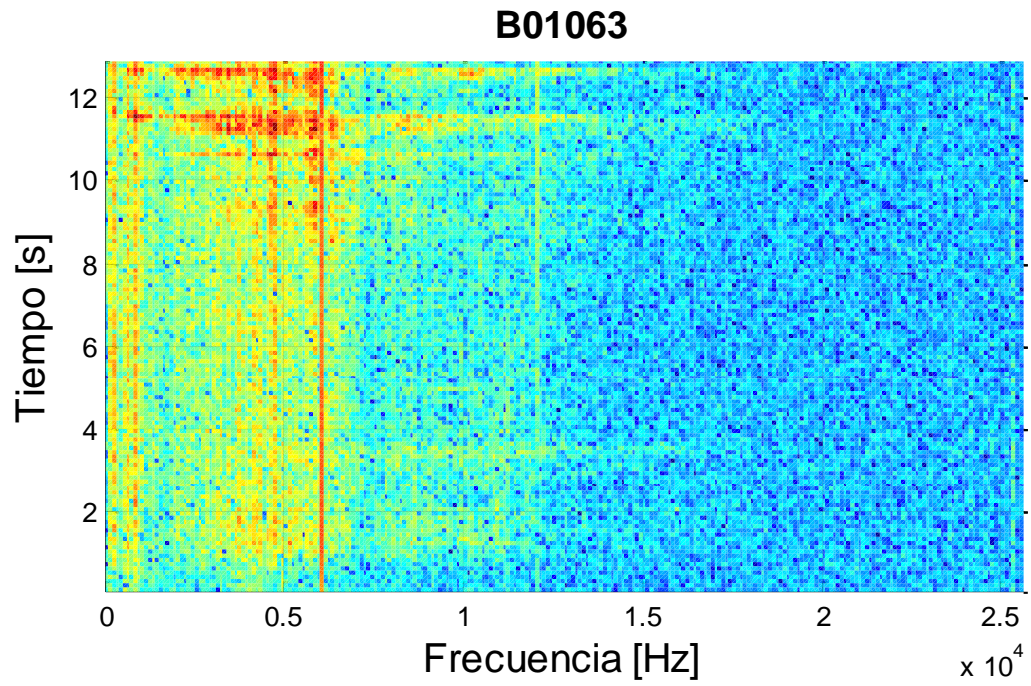


Figura 73. Espectrograma del agujero B01064

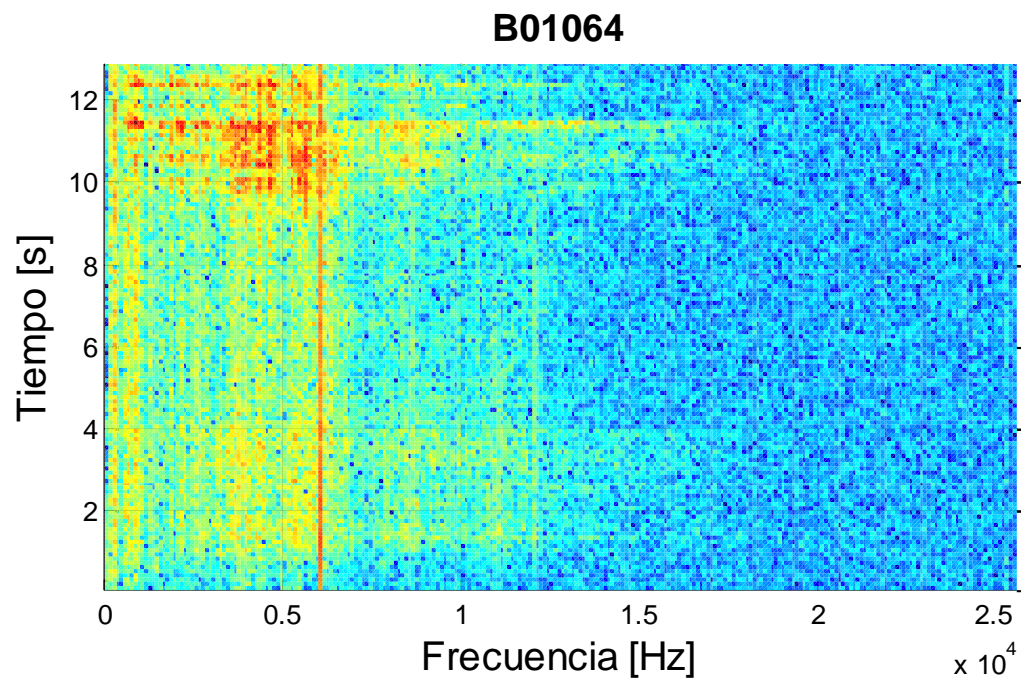
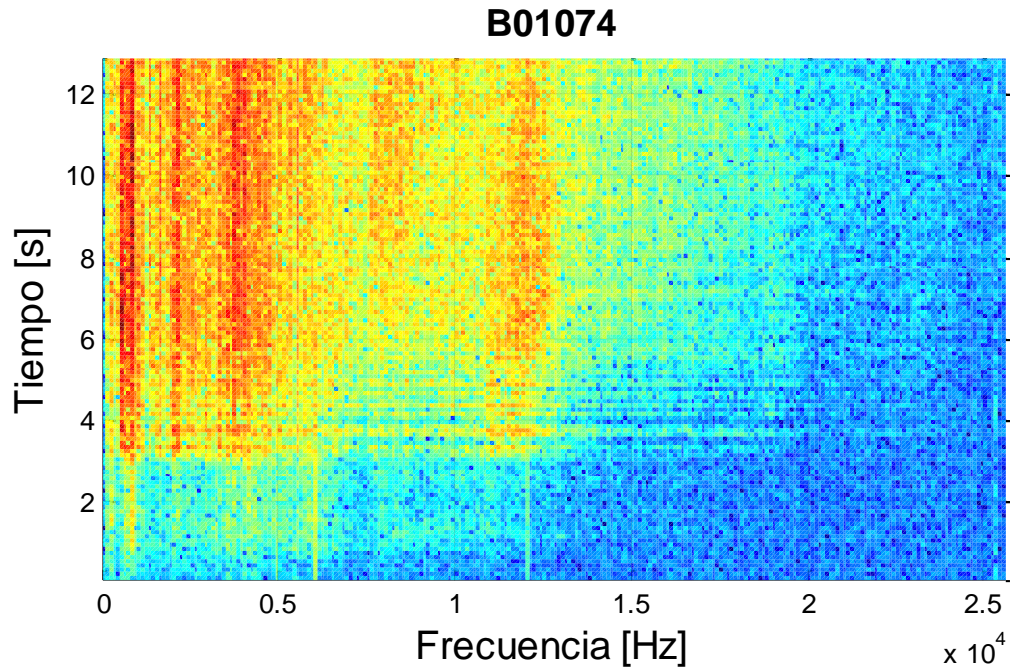


Figura 74. Espectrograma del agujero B01074



- En la transición del agujero B01060 al B01062 se apreció un leve incremento en la intensidad alrededor de los 2000Hz.
- En el agujero B01063 ocurrió una anomalía al final del mismo, la cual estuvo dada por un incremento notorio en el rango de 0 a 6000Hz. A partir de allí, comenzó a incrementar la aparición de anomalías a lo largo de cada agujero hasta su falla.
- En el agujero B01074 apareció una región en la cual aumentó la magnitud alrededor de los 13000 como previamente se observó en las figuras iniciales de muro de agua.

### 8.2.2 Agujeros finales de las brocas B02, B61 y B62

Las brocas restantes tuvieron un comportamiento similar a los espectrogramas observados en la broca B01, presentando un aumento de magnitud en varias zonas del espectro como se observa en las siguientes figuras.

Figura 75. Espectrograma del agujero B02117

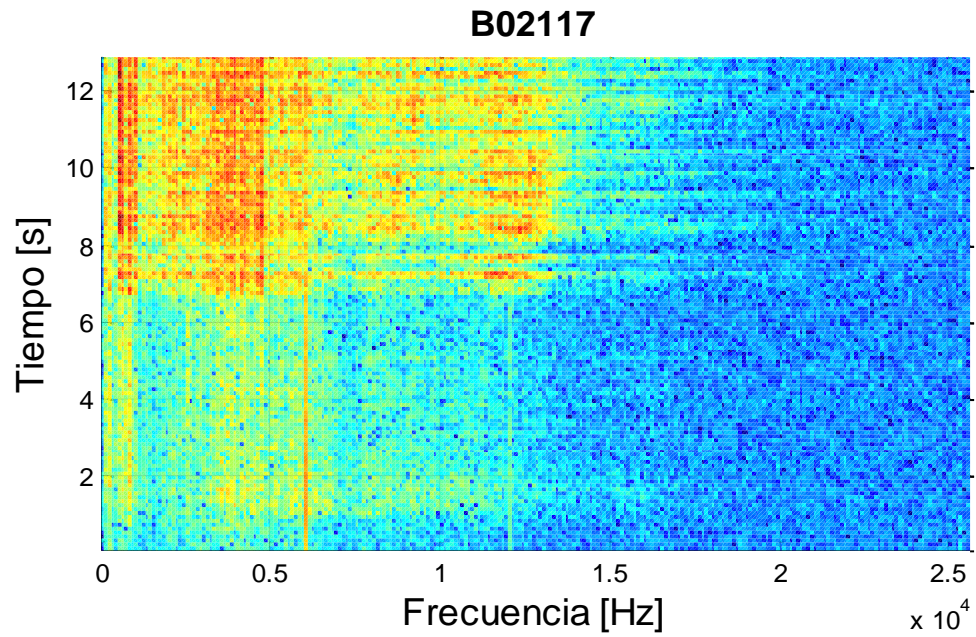


Figura 76. Espectrograma del agujero B61572

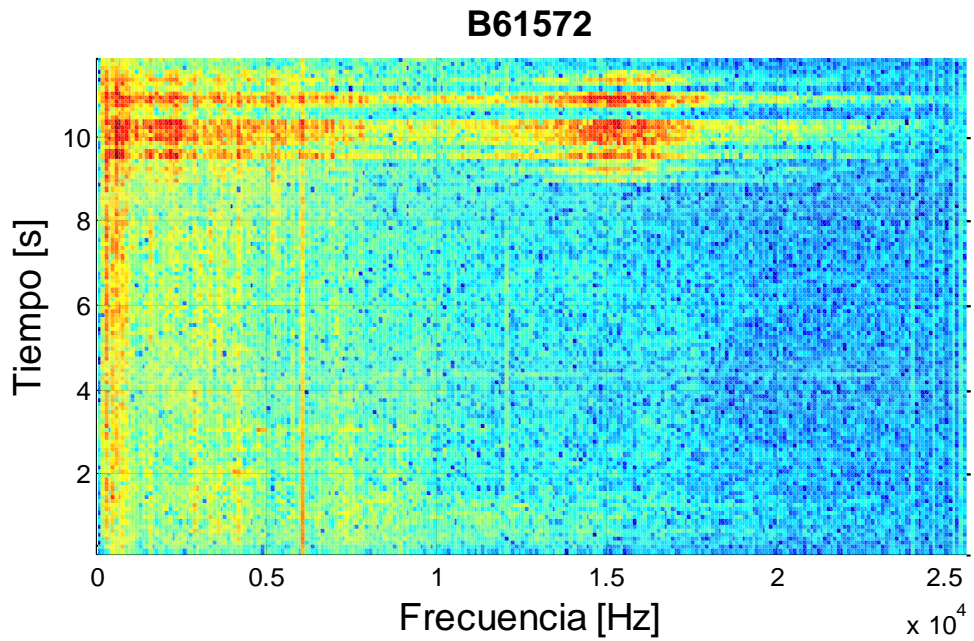
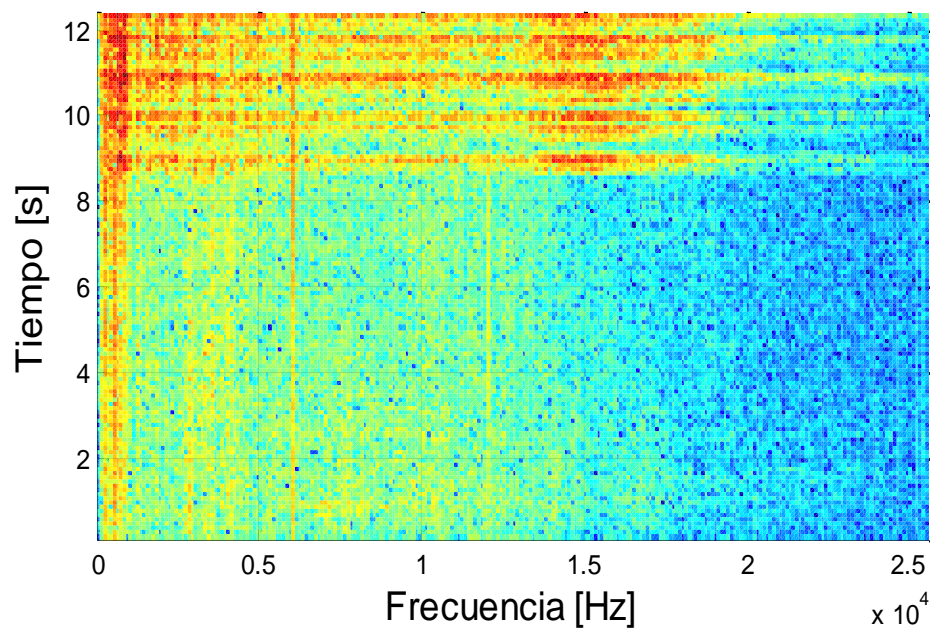


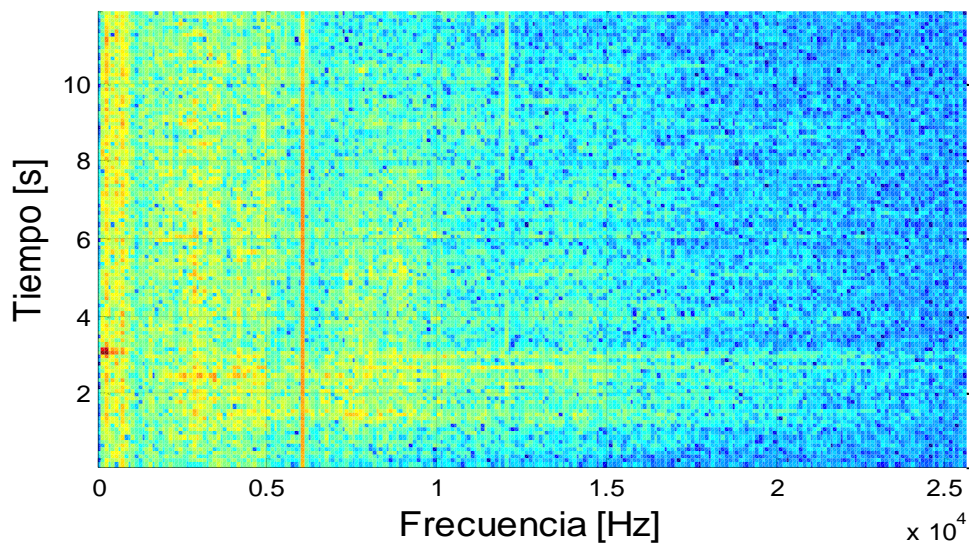
Figura 77. Espectrograma del agujero B62592



### 8.2.3 Detección de anomalías ajenas al desgaste

En el espectrograma del agujero B61305, se observó un golpe a los tres segundos, el cual se manifestó como un aumento de magnitud en la baja frecuencia.

Figura 78. Espectrograma del agujero B61305.



### 8.3 CONCLUSIONES E HIPÓTESIS GENERALES

En el análisis de las señales a través de la transformada de Fourier se concluyó:

- ✓ De manera similar al análisis en el dominio del tiempo, se observó la existencia de dos zonas de interés.
- ✓ La potencia se concentró en diferentes bandas del espectro de la siguiente manera:
  - El centro de mecanizado presentó un sonido que se encuentra en los rangos de 0 a 2000Hz y alrededor de los 6000Hz.
  - El taladrado se caracterizó por encima de los 2000Hz.
- ✓ Al final de la vida de la herramienta se apreció que la potencia aumentó en todo el rango de frecuencia pero, de una manera más notoria, por encima de los 12000Hz.
- ✓ El micrófono presentó gran influencia en la forma general del espectro.
- ✓ El sonido generado por un taladrado en seco, es de diferente naturaleza al producido por una broca desgastada.

Del análisis de los espectrogramas se observó:

- ✓ Tanto la maquina como otros fenómenos ajenos al proceso de taladrado, están localizados en la baja frecuencia. En consecuencia, con el propósito de eliminar aquellos efectos y centrarse en el proceso de taladrado, se recomienda omitir el rango por debajo de los 2KHz.
- ✓ El espectrograma tiene potencial para la detección de las anomalías previas a la falla de la herramienta de corte, ya que éste se va calculando continuamente, lo cual conlleva a identificar la anomalía instantes después de ocurra.

## **9. ANÁLISIS MEDIANTE EL USO DE LA TRANSFORMADA DE WAVELET**

Se propuso la Transformada Wavelet (TW) como una nueva técnica de procesamiento dado que ofreció la posibilidad de realizar un análisis multiresolución tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.

### **9.1 INFLUENCIA DE LA WAVELET MADRE**

Previamente a la descomposición por análisis de wavelet, se requirió la selección de la adecuada wavelet madre, ya que sus características pueden influir en el resultado. Pero debido a que no existe ningún criterio formal para su selección, se decidió usar diferentes tipos en base a otros trabajos en los cuales, se aplicara la transformada Wavelet para señales con características similares, es decir, aquellas con alto contenido aleatorio.

Con el propósito de observar la influencia de las wavelet madres, se optó por usar los siguientes tipos:

- Daubechies: db3, db4 y db7.
- Dmeyer: dmey.
- Symlets: sym2 y sym6.

Se procedió con el análisis de wavelet multinivel, para el cual se descompuso la señal en cinco (5) niveles (ver figura 79) y se calculó la energía promedio de los coeficientes (ver figura 80 y 81) y se plantearon las siguientes hipótesis:

- Debido a la naturaleza de la señal, se vio una baja influencia del uso de diferentes wavelets madre en los resultados, sin embargo, se apreció una diferencia notable en la cantidad de energía presente entre las diferentes

brocas. En consecuencia, para posteriores análisis, el uso de una sola wavelet madre es suficiente.

Figura 79. Descomposición Wavelet multinivel.

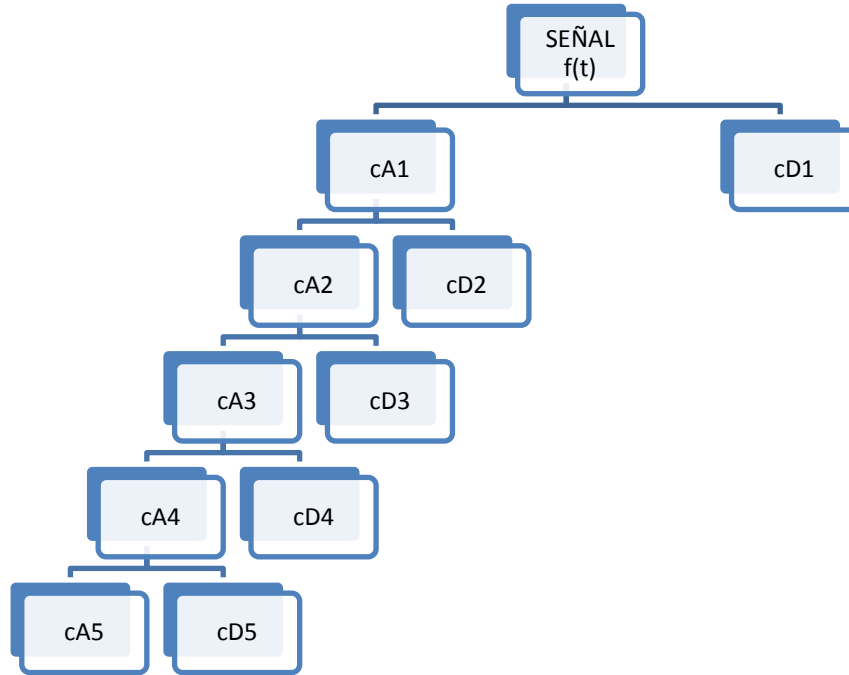
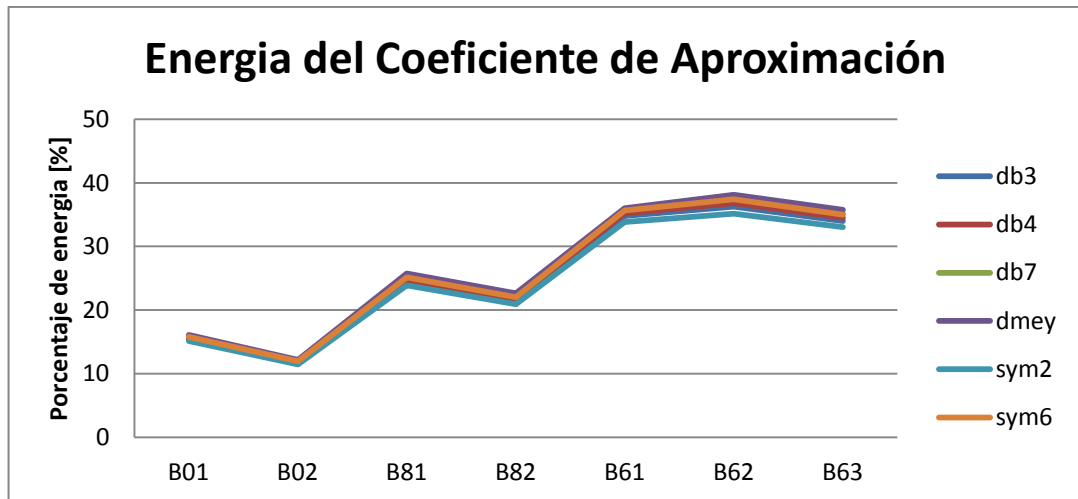


Figura 80. Energía del coeficiente de aproximación



- Se observó que los coeficientes de detalle (ver figura 81) contienen diferentes cantidades de energía para cada broca, lo cual significa que éstos detectaron distintos cambios para cada una de las brocas. Sin embargo, se apreció que los coeficientes cD2 y cD5 presentaron una baja variación.

Figura 81. Energía de los coeficientes de Detalle usando la wavelet db4

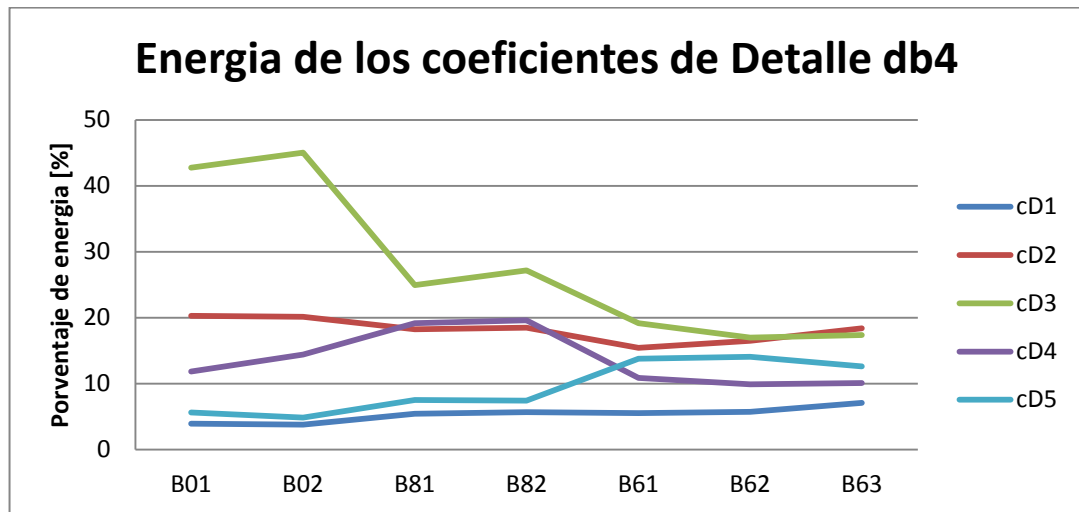
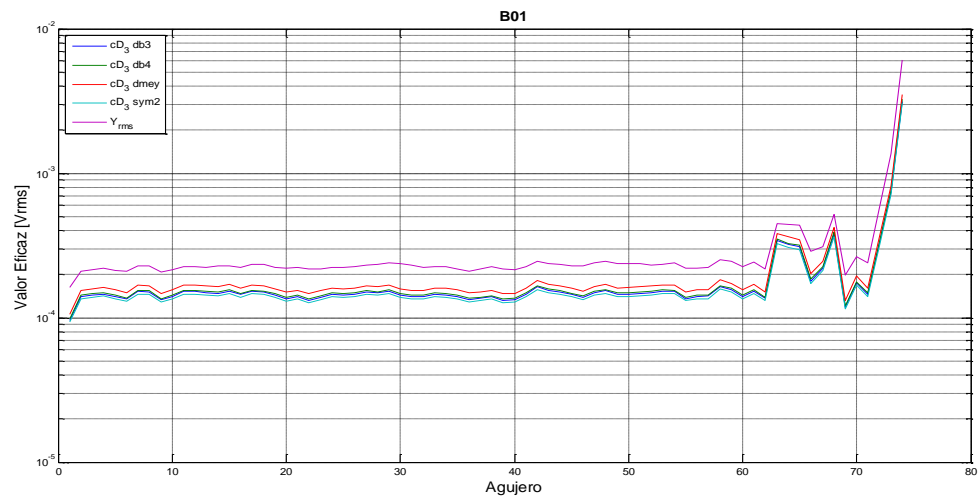


Figura 82. Influencia de las wavelets madre.



- Los coeficientes que contenían la mayor parte de la energía de la señal, son los que representan el comportamiento general presentado en el valor eficaz (Ver figura 82).

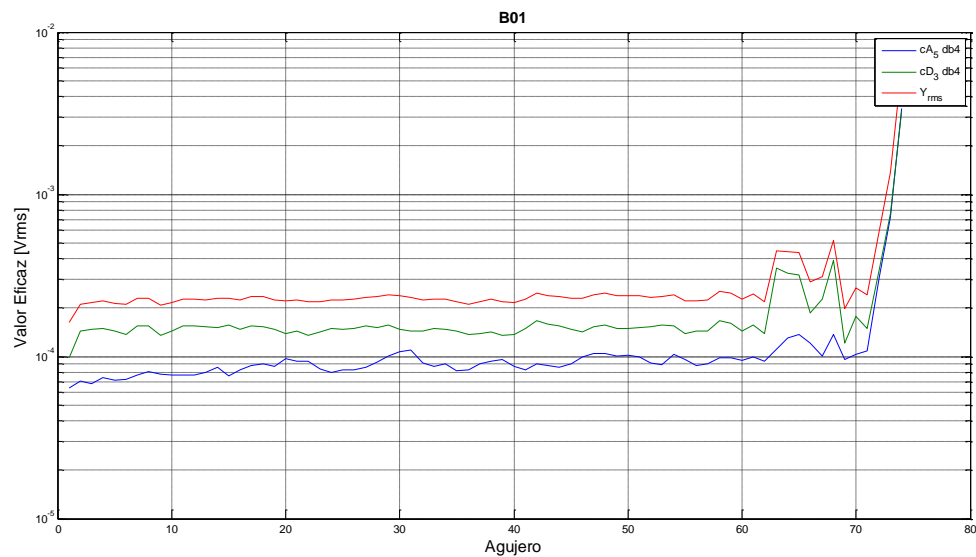
## 9.2 COMPORTAMIENTO DEL VALOR EFICAZ DE LOS COEFICIENTES RESULTANTES DE WAVELET.

Se realizó la descomposición en 5 niveles de las señales mediante la transformada Wavelet usando la Daubechies 4 (db4) y a cada coeficiente se le calculo su valor eficaz para su posterior comparación con el valor original de cada señal. Los principales resultados obtenidos se muestran a continuación:

### 9.2.1 Broca B01

El coeficiente de detalle (cD3) (ver figura 83) presentó el comportamiento general de la señal mientras que el coeficiente de aproximación no mostró las anomalías que precedieron la falla de la herramienta.

Figura 83. Coeficientes de wavelet en función de la vida de la broca B01.



### 9.2.2 Broca B02

En la broca B02 (ver figura 84), el coeficiente de detalle ( $cD_4$ ) amplió las diferencias presentes en el comportamiento del valor eficaz.

Figura 84. Coeficientes de wavelet en función de la vida de la broca B02.

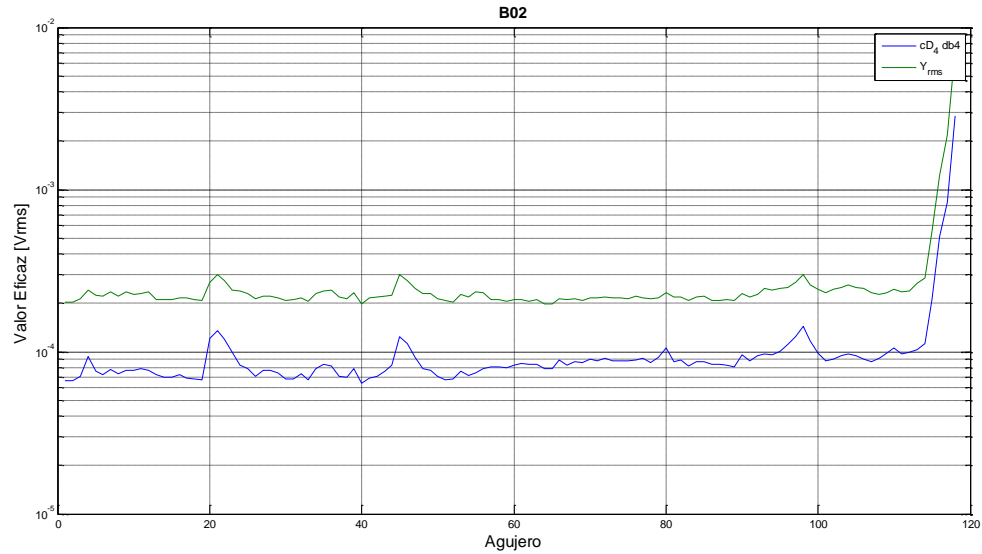
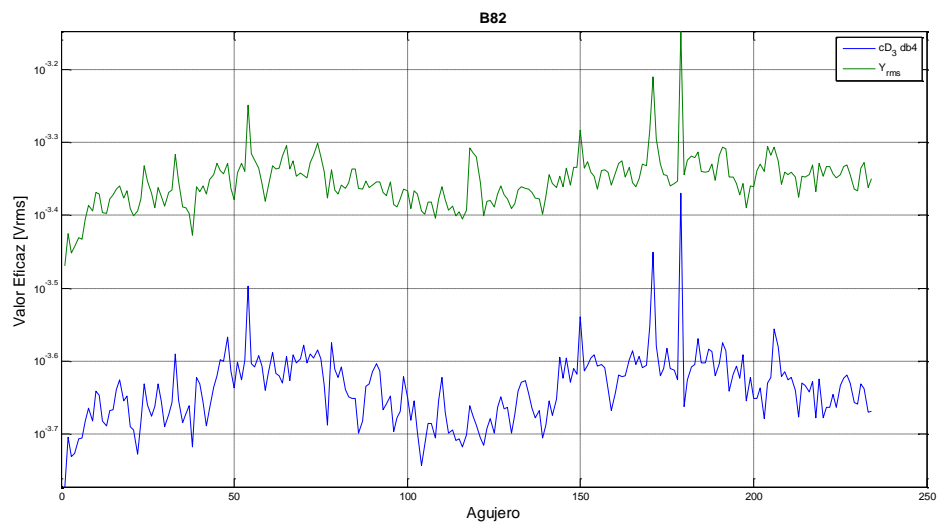


Figura 85. Coeficientes de wavelet en función de la vida de la broca B02.



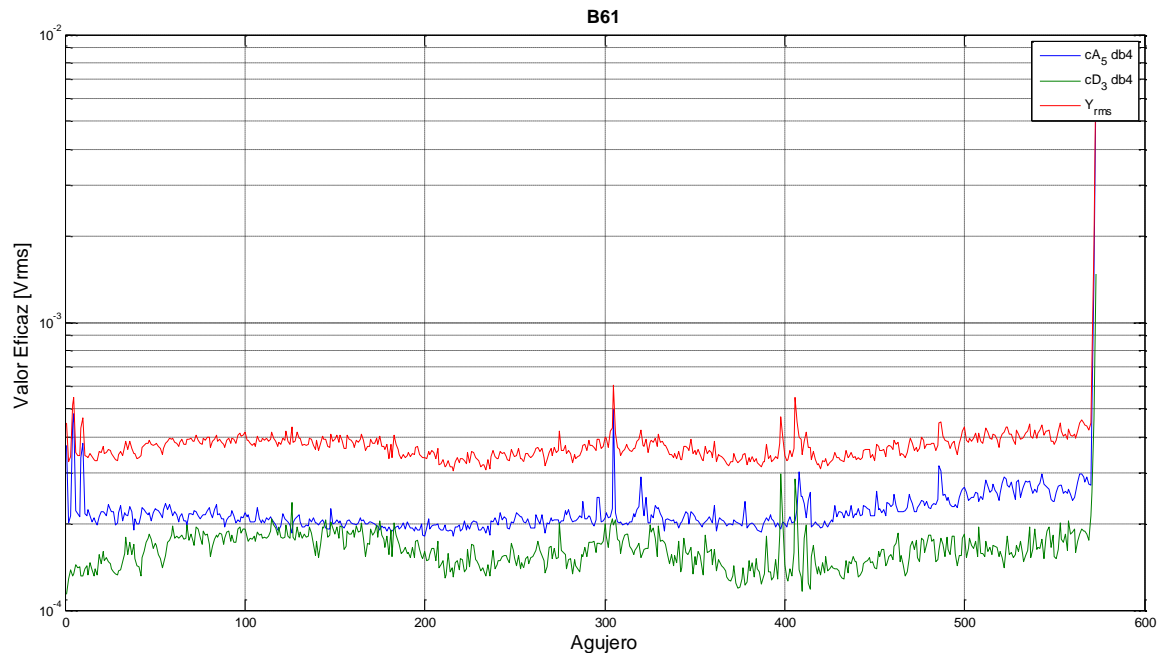
### 9.2.3 Broca B82

En la broca B82 (ver figura 85) el coeficiente de detalle  $cD3$  caracterizó el comportamiento general del valor eficaz pero disminuyó el pico presentado en el agujero 118.

### 9.2.4 Broca B61

En la broca B61, representada en la figura 86, se observó:

Figura 86. Coeficientes de wavelet en función de la vida de la broca B61.

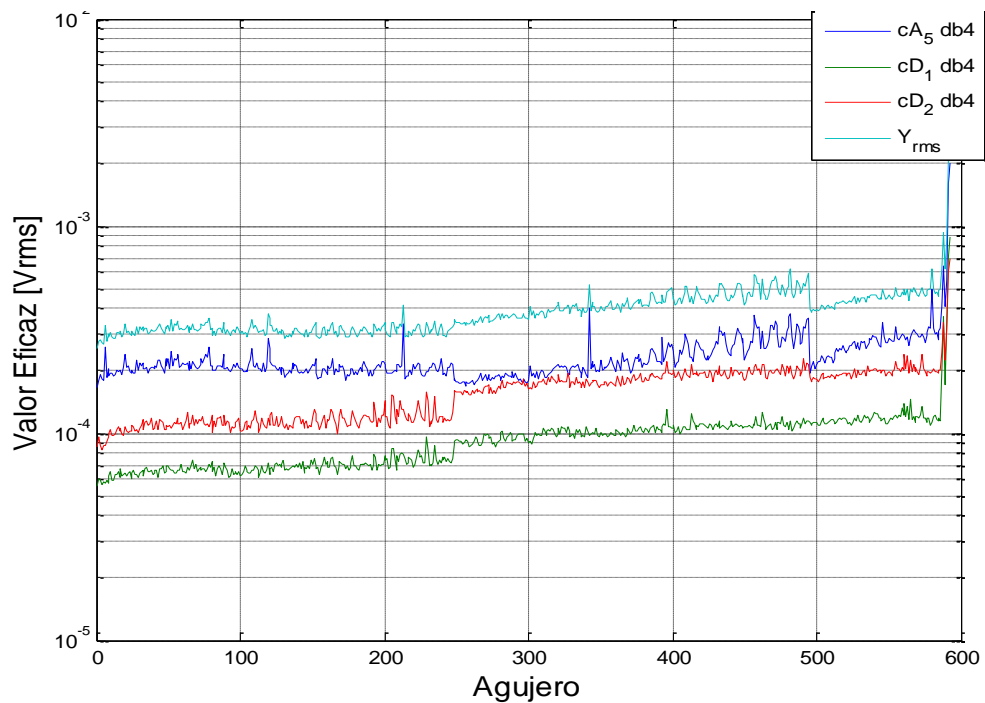


- El coeficiente de detalle 3 caracterizó el comportamiento durante la vida de la broca.
- El agujero 305 se presentó una anomalía, la cual se resaltó en la aproximación pero se redujo en el detalle.

### 9.2.5 Broca B62

La figura 87 corresponde a la broca B62, de la cual se observó:

Figura 87. Coeficientes de wavelet en función de la vida de la broca B62.

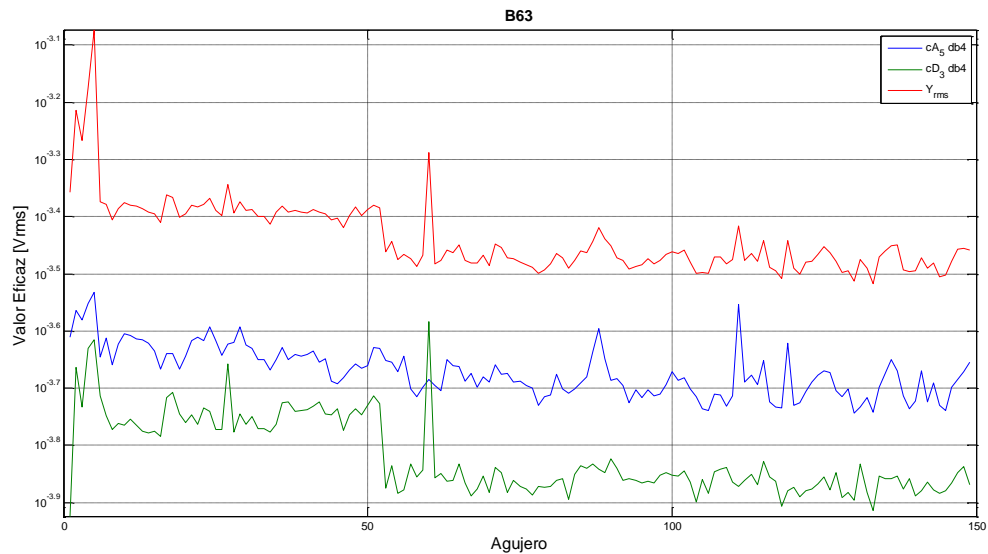


- El coeficiente de aproximación trasladó verticalmente la señal de manera que las tres regiones empezaron con aproximadamente el mismo valor eficaz.
- Los coeficientes de detalle  $CD_1$  y  $CD_2$  aplanaron ciertas regiones.
- El cambio de pieza conllevó a cambiar la naturaleza de la señal, en consecuencia, ningún coeficiente lo caracterizó en su totalidad.

### 9.2.6 Broca B63

En la broca B63 (ver figura 88) el coeficiente de detalle  $cD_3$  caracterizó el comportamiento general del valor eficaz, pero en cambio el coeficiente de aproximación disminuyó la influencia de la variación del refrigerante.

Figura 88. Coeficientes de wavelet en función de la vida de la broca B63.



### 9.3 CONCLUSIONES E HIPÓTESIS GENERALES

- El alto contenido aleatorio presente en las señales adquiridas conlleva a tener una baja influencia de la wavelet madre usada, sin embargo cada coeficiente caracteriza cada broca de manera diferente.
- Para el análisis wavelet multinivel se observó que los coeficientes presentaron una diferente concentración de energía para las diferentes brocas.
- Para el análisis wavelet multinivel a excepción del primer detalle (CD1), se observó que los coeficientes de detalle medios y los de aproximación, es decir, los correspondientes a frecuencias medias y bajas respectivamente, presentan mayor porcentaje de energía de las señales en todas las brocas.
- Este tipo de análisis requiere cierta habilidad o criterio por parte del usuario para interpretar los resultados observados, ya que presenta múltiples

opciones o herramientas, lo cual a su vez, conlleva a múltiples resultados e interpretaciones.

- Por medio de este análisis, se permitió extraer el comportamiento característico de las señales, así como la atenuación y amplificación de ciertas anomalías. Sin embargo, estos comportamientos se caracterizaron en distintos coeficientes para cada una de las brocas.
- A diferencia de los otros tipos de análisis, se logró la identificación de aquellos cambios leves en las condiciones de operación como cambios de pieza de trabajo y variación del caudal de refrigerante.
- Se observaron comportamientos progresivos en algunos coeficientes, los cuales no estaban presentes en la señal original de manera clara.

## 10. CONCLUSIONES

Las técnicas de análisis permitieron plantear diversas hipótesis y extraer características e información valiosa que en definitiva, nos condujo a concluir:

- La señal acústica y la vida de la broca no guardan una relación estrecha durante la mayor parte del tiempo, es decir, monitoreando el sonido es posible conocer solo dos estados de la herramienta: o se encuentra en buenas condiciones o por el contrario, esta desgastada.
- La señal acústica fue afectada por las condiciones del proceso, como lo son la pieza de trabajo, dureza del material, secuencia de taladrado y el nivel de refrigerante.
- Cuando la broca estuvo cerca del final de su vida útil, presentó un aumento del valor eficaz en los últimos tramos de cada agujero, lo cual esta relacionado con el desgaste de la broca. Tal aumento del valor eficaz posiblemente fue ocasionado por:
  - Aumento de las fuerzas de corte y en consecuencia, el incremento de la energía general del proceso.
  - Aumento del contacto entre el margen de la broca con la superficie del agujero.
  - Generación de viruta irregular la que podría atascarse y generar esos incrementos repentinos en el valor eficaz.
  - Aumento de la temperatura, lo cual impide una correcta refrigeración y lubricación ya que los agujeros realizados sin refrigerante también presentaron este comportamiento.
  - Adhesión del material de la pieza de trabajo a la broca.

- Reducción de la capa previamente endurecida por tratamiento superficial de la broca.
- El análisis del valor eficaz en función de la profundidad presentó características valiosas que podrían ser empleadas como criterio para la detección de las anomalías que anteceden la falla de la herramienta de corte, por medio del establecimiento de un valor umbral.
- Los análisis de amplitud, rango y conteo de picos presentaron un comportamiento similar al observado en el análisis de valor eficaz, lo cual tiene sentido ya que estos análisis guardan cierta relación.
- Los análisis de asimetría y curtosis presentaron un comportamiento independiente del desgaste de la herramienta de corte y mostraron valores altos cuando se presentaron anomalías de corta duración.
- El análisis de correlación y autocorrelación permitió conocer la naturaleza aleatoria de la señal.
- La señal acústica generada por el proceso del taladrado posee un espectro característico que está distribuido en diferentes bandas de frecuencia y cuya forma está influenciada por las características del sensor.
- El centro de mecanizado presentó un sonido que se encuentra distribuido principalmente en los rangos de 0 a 2000Hz y alrededor de los 6000Hz.
- El análisis por espectrograma de las bandas de frecuencia de 2000Hz a 6000Hz y alrededor de los 13KHz, presenta potencial para ser empleado en la detección de la falla, ya que permitió observar claramente aumentos en la potencia al final de la vida de las herramientas.

- El alto contenido aleatorio presente en las señales adquiridas conlleva a tener una baja influencia de la wavelet madre usada, sin embargo cada coeficiente caracteriza cada broca de manera diferente.
- La descomposición de las señales a través del análisis por la transformada Wavelet, permitió la detección clara de cambios que no fueron posibles representar por los otros métodos.
- El análisis wavelet permitió la extracción de comportamientos progresivos que no eran claros en la señal original.
- El análisis wavelet requiere cierta habilidad o criterio por parte del usuario para interpretar los resultados observados, ya que presenta múltiples opciones o herramientas, lo cual a su vez, conlleva a múltiples resultados e interpretaciones.

## RECOMENDACIONES

- Tanto la maquina como otros fenómenos ajenos al proceso de taladrado, están localizados en la baja frecuencia. En consecuencia, con el propósito de eliminar aquellos efectos y centrarse en el proceso de taladrado, se recomienda omitir el rango por debajo de los 2KHz.
- Crear sistemas de control alimentados por aquellas características que presentan potencial, los cuales apoyados en algoritmos de decisión logren realizar diagnósticos finales sobre el estado de la herramienta.
- Usar un micrófono profesional de medición producirá un espectro más real del proceso de taladrado.
- Automatizar la adquisición de las señales acústicas con el uso de finales de carrera.
- Medir el desgaste de la herramienta progresivamente.
- Estudiar el comportamiento del sonido en procesos de taladrado de poca profundidad, menor a dos veces el diámetro, y en agujeros pasantes.
- Estudiar el comportamiento del sonido para distintos materiales.
- Realizar más ensayos con el objetivo de buscar patrones de comportamiento en los diversos análisis en especial por medio de la transformada wavelet la cual tiene gran potencial para la detección de cambios.

- Eliminar o disminuir la influencia del sonido de la maquina en la señal propia al proceso de taladrado.

## BIBLIOGRAFÍA

AMAYA BALLESTEROS, Néstor Alfonso. Caracterización de la señal electrocardiográficas (ECG) por medio de la transformada de wavelet. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería de sistemas e informática. 2004.

BOUTROS, Tony y LIANG, Ming. Detection and diagnosis of bearing and cutting tool faults using hidden Markov models. (<http://www.sciencedirect.com/science>). 6 de Febrero, 2010.

GÓMEZ, Martín P, *et al.* Tool wear evaluation in drilling by acoustic emission. ([www.sciencedirect.com/science/journal/08906955/52/1](http://www.sciencedirect.com/science/journal/08906955/52/1)). Enero, 2009.

GÓMEZ VALDERRAMA, Oscar Mauricio y PATIÑO SILVA, Miguel Leonardo. Evaluación del desgaste de una broca en acero rápido (HSS) modificada superficialmente con iones de nitrógeno y titanio usando la metodología anova. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2013.

GROOVER Mikell. Fundamentos de la manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas. México: Mcgraw-Hill, 2007.

HEINEMANN, Robert y HINDUJA, Sri. A new strategy for tool condition monitoring of small diameter twist drills. (<http://www.sciencedirect.com/science>). 21 de Junio, 2011.

JING, Ma; KASSIM, Ashraf A y MANNANB, M.A. Application of image and sound analysis techniques to monitor the condition of cutting tools. (<http://www.sciencedirect.com/science>). 23 de Abril, 1999.

MOROS VIVAS, Ana María. Caracterización de señales de precipitación mediante la transformada de Fourier y transformada wavelet. Tesis de Maestría en Hidrosistemas. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. Departamento de Ingeniería Civil. 2010.

NARVAEZ JARAMILLO, Carlos y ORTIZ CABRERA, Mario. Estudio del mejoramiento de la calidad del mecanizado en procesos de torneado y taladrado aplicando el método taguchi. Trabajo de grado ingeniería mecánica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingeniería mecánica. 2004

OROZCO NARANJO, Alejandro y MUÑOZ GUTIÉRREZ, Pablo. Detección de latidos cardiacos patológicos y normales utilizando transformada por paquetes wavelet, máquinas de soporte vectorial y perceptrón multicapa. Tesis de Magíster en Ingeniería Eléctrica. Armenia: Universidad del Quindío. Facultad de Ingeniería Eléctrica.

ORTIZ GARCÉS, Washington y VANEGAS ROBLES, Jorge. Utilización del Criterio de desgaste de Flanco y la Ecuación de Taylor para simular el tiempo de vida de una herramienta de corte mediante el proceso de torneado en CNC para un material AISI 1018. ([www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/16991](http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/16991)). 8 de Septiembre, 2011.

PATRA, Karali. Miembro, IAENG. Acoustic Emission based Tool Condition Monitoring System in Drilling. "Proceedings of the World Congress on Engineering 2011 Vol III WCE 2011, July 6 - 8, 2011, London, U.K"

QUADRA, Alexandre L y BRANCO, J.R.T. Analysis of the acoustic emission during drilling test. ([www.sciencedirect.com/science/](http://www.sciencedirect.com/science/)). Octubre, 1997.

TORRES OVIEDO, Carlos Andrés. Análisis, descripción y comparación de los métodos de Fourier y wavelet aplicados a la identificación de características dinámicas en estructuras. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil. 2011.

VEGA GARCÍA, Valdomiro. Aplicación de la transformada discreta (DWT) en la detección e identificación de eventos de la calidad de la energía eléctrica. Trabajo de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de ingeniería eléctrica. 2004.

ANALIZADOR ESPECTRO, <http://cursosdesonido.com.ar/FFT/analizadores.htm>.

MASTERCAM, <http://www.mastercam.com/Multimedia/TutorialVideos>.

DORMER, <http://selector.dormertools.com/web/xla/es-mx/mm>.

LABVIEW, <http://www.ni.com/pdf/manuals/320999b.pdf>.

MATLAB, <http://www.mathworks.com/help/MATLAB/>.

# **ANEXOS**

## ANEXO A. COSTOS PROYECTO DE GRADO

<i>Descripción</i>	<i>Costo</i>
<b>EQUIPOS</b>	
NI Cdaq 917-4	\$ 1'800.000.00
NI 9234 IEPE de 4 Canales, $\pm 5$ V, 51.2 kS/s por Canal, 24 Bits	\$ 4'156.000.00
Préstamo de equipo de computo con acceso a internet y con LabVIEW	\$ 8'000.000.00
Préstamo de la CNC Leadwell V20	Asumido por la Universidad
Subtotal	\$1'395.600.00
<b>MATERIALES Y HERRAMIENTAS</b>	
Alquiler Micrófono TXL 235 TOPP AUDIO	\$50.000.00
Alquiler Micrófono PG81 Shure	\$30.000.00
Protector micrófonos	\$4.000.00
Material a taladrar (acero SAE 4140)	\$313.000.00
Refrentados	\$25.000.00
Brocas	\$115.000.00
Cable coaxial blanco RG6 90% 5 metros	\$4.000.00
Conector canon con cable	\$3.500.00
Trasporte	\$35.000.00
Imprevistos (10 %)	\$ 58.000.00
Subtotal	\$637.450.00
<b>TOTAL</b>	<b>\$2'033.050.00</b>

## ANEXO B. MARCO TEÓRICO

### B1. CORRELACIÓN Y AUTOCORRELACIÓN.

Una herramienta útil en análisis de señales y sistemas es la correlación. La correlación obtiene información sobre las señales en base a promediados temporales y su transformada de Fourier permite obtener funciones de Densidad Espectral de Energía o Potencia, dependiendo de las características de las señales y sistemas bajo estudio. Esta propiedad es particularmente interesante puesto que la información puede obtenerse incluso si la señal carece de Transformada de Fourier. Las herramientas basadas en correlación de señales y su transformada de Fourier, son básicas en el análisis de procesos.

#### ➤ Correlación

Frecuentemente en el procesado digital de señales se necesita cuantificar el grado de interdependencia entre dos procesos o la similitud entre dos señales  $x_1[n]$  y  $x_2[n]$ . En otras palabras determinar la correlación existente entre dos procesos o señales. Algunas de sus aplicaciones son la detección e identificación de señales.

Descripción de la correlación: Consideremos la necesidad de comparar dos señales

$x_1[n]$  y  $x_2[n]$  de la misma longitud  $N$ . Una medida de la correlación existente entre ambas señales puede efectuarse mediante la suma de los productos de los correspondientes pares de puntos mediante la expresión conocida como correlación cruzada:

$$c_{12} = \sum_{n=0}^{N-1} x_1[n] * x_2[n]$$

Un resultado negativo en  $c_{12}$  indica una correlación negativa, es decir un incremento en una variable se asocia con un decremento en la otra.

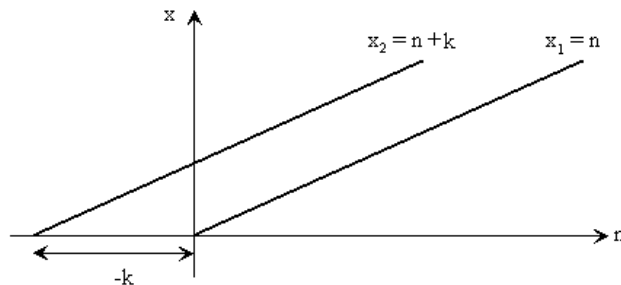
La anterior definición de la correlación cruzada produce un resultado que depende del número de muestras. Una definición alternativa es la siguiente, la cual promedia la suma entre el número N de elementos:

$$c_{12} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_1[n] * x_2[n]$$

Sin embargo la anterior expresión debe ser modificada porque en muchos casos puede indicar correlación cruzada cero y sin embargo las dos señales estar totalmente correlacionadas, tal es el caso de dos señales en oposición de fase.

Para resolver este problema es necesario rotar o retrasar una de las señales respecto de la otra. Tal y como se representa en la siguiente figura. La señal  $x_2[n]$  se retrasa o rota a la izquierda k intervalos de muestreo.

Figura B1. Retraso de señales.



Fuente: <http://www.ehu.es/Procesadodesenales/tema8/corre1.html>.

Otra alternativa equivalente es rotar  $x_1[n]$  a la derecha. En este caso, la nueva expresión para la correlación cruzada es:

$$c_{12}[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_1[n] * x_2[n + k] = c_{21}[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_1[n] * x_2[n - k]$$

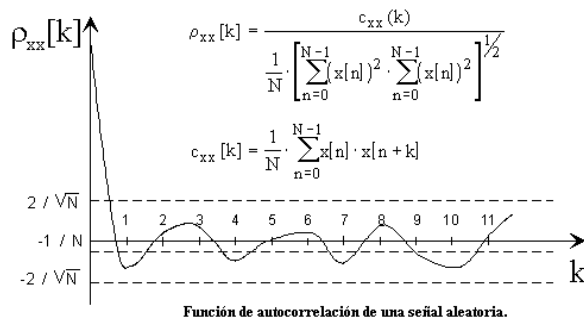
La versión normalizada de  $c_{12}[k]$  es:

$$\rho_{12}[k] = \frac{c_{12}[k]}{\frac{1}{N} [\sum_{n=0}^{N-1} (x_1[n])^2 * \sum_{n=0}^{N-1} (x_2[n])^2]^{1/2}}$$

Donde:

$\rho_{12}[k]$ : es conocido como coeficiente de la correlación cruzada. Su valor está comprendido entre +1 y -1. El valor +1 significa un 100% de correlación, mientras que -1 significa un 100% de correlación en oposición de fase. Un valor cero significa que no existe correlación y por lo tanto las dos señales son completamente independientes. Este es el caso, por ejemplo, si una de las señales fuese completamente aleatoria. Pequeños valores de  $\rho_{12}[k]$  indican poca correlación.

Figura B2. Coeficiente de correlación.



Fuente: <http://www.ehu.es/Procesadodesenales/tema8/corre1.html>.

➤ **Autocorrelación:**

La autocorrelación es la correlación cruzada de una señal consigo misma. Informalmente, es la similitud entre las observaciones como una función de la separación de tiempo entre ellos. Se trata de una herramienta matemática para la búsqueda de patrones de repetición, tales como la presencia de una señal periódica oscurecida por el ruido, o la identificación de la frecuencia fundamental que falta en una señal implícita por sus

frecuencias armónicas. A menudo se utiliza en el procesamiento de la señal para el análisis de funciones o de la serie de valores, tales como señales de dominio de tiempo.

➤ **Aspectos operativos y aplicaciones de la función de autocorrelación y correlación cruzada.**

- Correlación cruzada de dos señales periódicas de periodo distinto.
- Efecto del tiempo de observación finito en el cálculo de la función de autocorrelación.
- Utilización de la autocorrelación para detectar señales enmascaradas por el ruido.
- Estimación de una señal periódica enmascarada con ruido.
- Cálculo de la correlación cruzada mediante la IDFT.
- Determinación de la respuesta al impulso de un sistema lineal.
- Relación entre la convolución y la correlación.

## **B2. CURTOSIS.**

En teoría de la probabilidad y estadística, la curtosis es una medida de la forma. Así, las medidas de curtosis tratan de estudiar la proporción de la varianza que se explica por la combinación de datos extremos respecto a la media en contraposición con datos poco alejados de la misma. Una mayor curtosis implica una mayor concentración de datos muy cerca de la media de la distribución coexistiendo al mismo tiempo con una relativamente elevada frecuencia de datos muy alejados de la misma. Esto explica una forma de la distribución de frecuencias con colas muy elevadas y un con un centro muy apuntado.

Un coeficiente de apuntamiento o de curtosis es el basado en el cuarto momento con respecto a la media y se define como:

$$\beta_2 = \frac{\mu_4}{\sigma^4}$$

Donde  $\mu_4$  es el 4º momento centrado o con respecto a la media y  $\sigma$  es la desviación estándar.

No obstante, está más extendida la siguiente definición del coeficiente de curtosis:

$$g_2 = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3$$

Donde al final se ha sustraído 3 (que es la curtosis de la Normal) con objeto de generar un coeficiente que valga 0 para la Normal y tome a ésta como referencia de apuntamiento:

Tomando, pues, la distribución normal como referencia, una distribución puede ser:

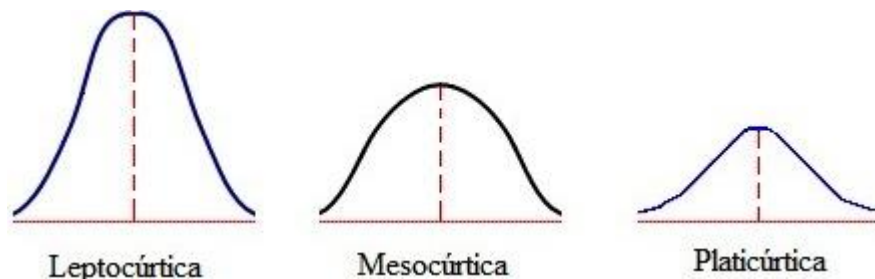
- Más apuntada y con colas más anchas que la normal es leptocúrtica.
- Menos apuntada y con colas menos anchas que la normal es platicúrtica.
- La distribución normal es mesocúrtica.

En la distribución normal se verifica que  $\mu_4 = 3 * \sigma^4$ , donde  $\mu_4$  es el momento de orden 4 respecto a la media y  $\sigma$  la desviación típica.

Así tendremos que:

- Si la distribución es leptocúrtica  $\beta_2 > 3$  y  $g_2 > 0$
- Si la distribución es platicúrtica  $\beta_2 < 3$  y  $g_2 < 0$
- Si la distribución es mesocúrtica  $\beta_2 = 3$  y  $g_2 = 0$

Figura B3. Tipos de distribución.



Fuente: <http://www.monografias.com>.

Otra forma de medir la curtosis se obtiene examinando la fórmula de la curtosis de la suma de variables aleatorias. Si  $Y$  es la suma de  $n$  variables aleatorias estadísticamente independientes, todas con igual distribución  $X$ , entonces  $Kurt[Y] = \frac{Kurt[X]}{n}$ , complicándose la fórmula si la curtosis se hubiese definido como  $\frac{\mu_4}{\sigma^4}$ .

### **B3. ASIMETRÍA.**

Es una medida de forma de una distribución que permite identificar y describir la manera como los datos tiende a reunirse de acuerdo con la frecuencia con que se hallen dentro de la distribución. Permite identificar las características de la distribución de datos sin necesidad de generar el gráfico.

#### **Tipos de asimetría.**

La asimetría presenta las siguientes formas:

- **Asimetría Negativa o a la Izquierda.-** Se da cuando en una distribución la minoría de los datos está en la parte izquierda de la media. Este tipo de distribución presenta un alargamiento o sesgo hacia la izquierda, es decir, la distribución de los datos tiene a la izquierda una cola más larga que a la derecha. También se dice que una distribución es simétrica a la izquierda o tiene sesgo negativo cuando el valor de la media aritmética es menor que la mediana y éste valor de la mediana a su vez es menor que la moda, en símbolos.

$$\bar{x} < Md < Mo$$

**Nota:** Sesgo es el grado de asimetría de una distribución, es decir, cuánto se aparta de la simetría.

➤ **Simétrica.-** Se da cuando en una distribución se distribuyen aproximadamente la misma cantidad de los datos a ambos lados de la media aritmética. No tiene alargamiento o sesgo. Se representa por una curva normal en forma de campana llamada campana de Gauss (matemático Alemán 1777-1855) o también conocida como de Laplace (1749-1827). También se dice que una distribución es simétrica cuando su media aritmética, su mediana y su moda son iguales, en símbolos  $\bar{x}Md = Mo$

- Asimetría Positiva o a la Derecha: se da cuando en una distribución la minoría de los datos está en la parte derecha de la media aritmética. Este tipo de distribución presenta un alargamiento o sesgo hacia la derecha, es decir, la distribución de los datos tiene a la derecha una cola más larga que a la izquierda.

También se dice que una distribución es simétrica a la derecha o tiene sesgo positivo cuando el valor de la media aritmética es mayor que la mediana y éste a valor de la mediana a su vez es mayor que la moda, en símbolos  $\bar{x} > Md > Mo$

➤ **Medidas de asimetría**

- Coeficiente de Karl Pearson:

$$As = \frac{3 * (\bar{x} - Md)}{s}$$

Donde:

$\bar{x}$ = media aritmética.

Md = Mediana.

s = desviación típica o estándar.

Nota:

El Coeficiente de Pearson varía entre -3 y 3

Si  $As < 0$  la distribución será asimétrica negativa.

Si  $As = 0$  la distribución será simétrica.

Si  $As > 0$  la distribución será asimétrica positiva.

Medida de Yule Bowley o Medida Cuartílica.

$$As = \frac{Q_1 + Q_3 - 2Q_2}{Q_3 - Q_1}$$

Donde:

$Q_1$ = Cuartil uno;  $Q_2$ = Cuartil dos = Mediana;  $Q_3$ = Cuartil tres.

Nota:

La Medida de Bowley varía entre -1 y 1

Si  $As < 0$  la distribución será asimétrica negativa.

Si  $As = 0$  la distribución será simétrica.

Si  $As > 0$  la distribución será asimétrica positiva.

- **Medida de Fisher**

Para datos sin agrupar se emplea la siguiente fórmula:

$$As = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^3}{n \sigma^3}$$

Para datos agrupados en tablas de frecuencias se emplea la siguiente fórmula:

$$As = \frac{\sum f(x_i - \bar{x})^3}{n \sigma^3}$$

Para datos agrupados en intervalos se emplea la siguiente fórmula:

$$As = \frac{\sum f(xm - \bar{x})^3}{n \sigma^3}$$

Donde:

$x_i$  = cada uno de los valores; n = número de datos;

$\bar{x}$  = media aritmética;

f = frecuencia absoluta

$\sigma^3$  = cubo de la desviación estándar poblacional;

xm = marca de clase

Nota:

Si  $As < 0$  indica que existe presencia de la minoría de datos en la parte izquierda de la media, aunque en algunos casos no necesariamente indicará que la distribución sea asimétrica negativa

Si  $As = 0$  la distribución será simétrica

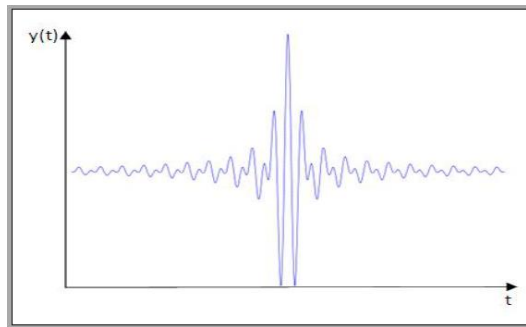
Si  $As > 0$  indica que existe presencia de la minoría de datos en la parte derecha de la media, aunque en algunos casos no necesariamente indicará que la distribución sea asimétrica positiva

#### **B4. LA TRANSFORMADA WAVELET.**

Esta transformada es una de las técnicas más recientes propuestas para resolver problemas de compresión de imágenes, relevamiento de bordes, análisis de textura y análisis multiescala. El interés por esta nueva herramienta matemática nace de la “*emergencia*” que ofrece de superar alguna de las limitaciones que se enfrentan al emplear la transformada de Fourier y la Transformada de Fourier de Tiempo Corto.

Una “*wavelet*” es el nombre dado a una “pequeña onda u ondita” que tiene su energía concentrada en un periodo de tiempo determinado, lo cual proporciona una herramienta para el análisis de fenómenos transitorios no estacionarios.

Figura B4. Wavelet.



Fuente: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wavelet\\_-\\_Morlet.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wavelet_-_Morlet.png).

### **Aplicaciones:**

Para la detección de discontinuidades, puntos de rupturas, identificar frecuencias puras, reducir del ruido, comprimir información, aproximar funciones, solución de ecuaciones diferenciales en señales unidimensionales, dinámica molecular, la astrofísica, la geofísica de los sismos, la óptica, el estudio de las turbulencias y la mecánica cuántica, así como en otros campos muy variados como el análisis de electrocardiogramas, el estudio del ADN, al análisis de sangre, el reconocimiento de voz, meteorología, en el campo de la biometría y análisis Multifractal.

La Transformada Wavelet proporciona las herramientas apropiadas para diseñar estrategias analíticas para caracterizar los parámetros especiales de las señales unidimensionales y bidimensionales.

### **Propiedades de las funciones Wavelet**

La elección de un tipo “*wavelet*” para aproximar una determina señal requiere de un balance entre diferentes propiedades, tales como la suavidad, localización espacial y temporal, la localización de frecuencia, la habilidad para presentar

funciones polinómicas locales, la ortogonalidad y la simetría. Estas propiedades se discuten a continuación:

*La suavidad.* En varias aplicaciones, las “*wavelet*” deben ser lo suficientemente suaves como para poder representar eficientemente las características de la señal que se desee aproximar. La suavidad en la “*wavelets*” se mide por el número de derivadas que existen, y esta también relacionado con el número de momentos nulos.

*Localización espacial y temporal.* Una propiedad muy importante de las “*wavelet*” es su habilidad para localizar las características del fenómeno analizado en espacio y en tiempo.

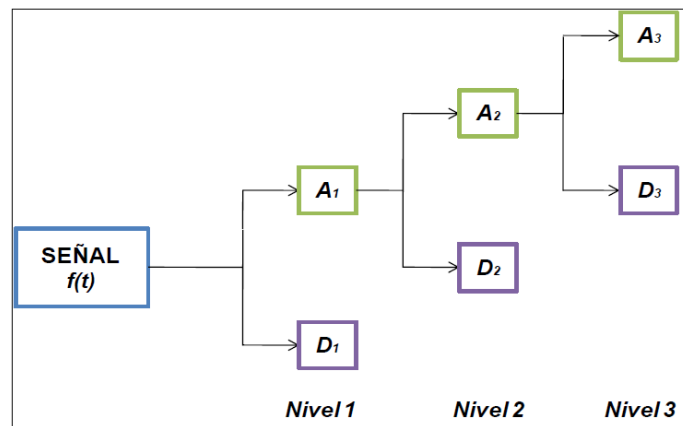
*Localización de frecuencias.* Las wavelets no solo localizan características en tiempo y en espacio, sino también en frecuencia. En general, las funciones “*wavelets*” más suaves tienen mejores propiedades de la localización de frecuencias.

*Simetría.* Las “*wavelets*” ortogonales de soporte compacto no son simétricas, excepto la wavelet de Haar.

*Ortogonalidad.* Característica fundamental en el análisis con la transformada wavelet, ya que la información capturada por una función wavelet es completamente independiente de la información capturada por la función de escalamiento por lo tanto son mutuamente excluyentes. De esta manera no hay superposición de la representación de los datos en el análisis del dominio de la frecuencia.

La siguiente figura presenta como funcionan el análisis de una señal con la transformada wavelet. Se tiene una señal de la cual se desea hacer una descomposición de 3 niveles:

Figura B5. Niveles Wavelet.



Fuente: Toolbox MATLAB.

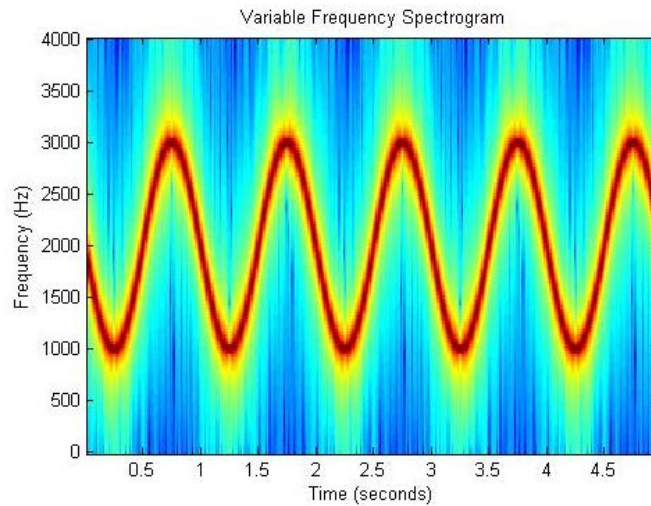
Las cajas del diagrama que se observan en la Figura nombradas con la letras y corresponde a las subseñales de aproximación ( $A_i$ ) y detalles ( $D_j$ ), respectivamente. El subíndice que acompaña las letras corresponde al nivel descomposición. Por lo tanto para obtener la señal presentada en la figura a partir de la descomposición hecha se tiene:

$$\text{Señal} = A_3 + D_3 + D_2 + D_1$$

## B5. ESPECTROGRAMA.

Un espectrograma es una representación visual del espectro de frecuencias de un sonido u otra señal y que varían con el tiempo o alguna otra variable. Los espectrogramas son a veces llamadas cascadas espectrales, impresiones de voz, o *voicegrams*.

Figura B6. Espectrograma.



Fuente: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:VariableFrequency.jpg>.

#### Algunas aplicaciones:

- Identificar palabras habladas fonéticamente
- Analizar las diversas llamadas de animales.
- Son ampliamente utilizados en el desarrollo de los campos de la música, de sonar, de radar, y el procesamiento del habla, la sismología, etc.

#### Formato:

Un formato común es un gráfico con dos dimensiones geométricas:

- El eje horizontal representa el tiempo o rpm.
- El eje vertical es la frecuencia.
- Una tercera dimensión que indica la amplitud de una frecuencia particular en un momento particular, está representado por la intensidad o el color de cada punto de la imagen.

Hay muchas variaciones de formato en las que a veces los ejes verticales y horizontales se intercambian y la amplitud se representa como la altura de una superficie en 3D en lugar de color o intensidad.

Los ejes de frecuencia y amplitud pueden ser lineales o logarítmicos, dependiendo de lo que se está graficando, por ejemplo, las señales de audio normalmente se representan con un eje logarítmico de amplitud (decibelios o dB), y la frecuencia de manera lineal para acentuar aquellas relaciones armónicas o logarítmicas para enfatizar relaciones tonales musicales.

### **B6. Método de Welch**

El método de Welch consiste en dividir la señal en varios segmentos de datos, los cuales se solapan y posteriormente, se calcula la densidad espectral de potencia (PSD) a cada uno de éstos para finalmente, promediarlos. Nota: si el solapamiento es del 0%, conlleva al método de Barlett.

### **ESTIMACIÓN DEL ESPECTRO DE POTENCIA**

La estimación de la densidad espectral de potencia (DEP) para procesos aleatorios discretos en el tiempo está basada en las técnicas del uso de la transformada rápida de Fourier. Los dos problemas esenciales asociados con el procesamiento de registro de datos finitos en la estimación de la DEP son: la salida espectral y el smearing.

- La salida espectral es el resultado del procesamiento de registros de datos de duración finita en  $n_t$  segundos.
- El smearing espectral resulta de la operación de ventaneo del registro de datos para reducir la salida, por tanto, representa la comparación entre la resolución de frecuencia deseada, la cual se define como el análisis del ancho de banda de la FFT y la adecuada estadística de la estimación espectral.

La elección de una ventana óptima es una decisión entre el nivel del lóbulo lateral y los coeficientes del ruido equivalente  $k_w$ . Las ventanas con bajos niveles de lóbulo lateral tienen grandes valores de  $k_w$ , lo cual resulta en un amplio análisis de anchos de banda.

## ANEXO C. CÓDIGOS DE PROGRAMACIÓN

### C1. Función para convertir los datos de LabVIEW a MATLAB.

```
function [ y ] = leerdatos(archivo)
% Se importan los datos en formato .lvm provenientes de LabVIEW para ser
% convertidos y usados en MATLAB.

Y1=fileread(archivo);          % Lectura de la información en el archivo .lvm
Datos = textscan(Y1,'%[\n\r]', 'whitespace', '', 'delimiter', '\n'); %
Reconocimiento de texto
Y2=Datos{1,1};                % Extracción de los datos de interés
A = char(Y2);
clearvars -except A
[f,c]=size(A);                % Tamaño de la matriz de datos
y=zeros(f,1);                 % Se crea una nueva matriz donde se almacenaran los
datos, eliminando el encabezado

%Sin vector de tiempo
if c<21
A(A==',' )='.';               % Cambio de la "," a "."
for i=1:f
y(i)= sscanf(A(i,:), '%f'); % Conversión a un numero de punto flotante
end
end

%Con vector de tiempo
if c>=21
A(A==',' )='.';               % Cambio de la "," a "."
for i=1:f
z=sscanf(A(i,:), '%f');      % Conversión a un numero de punto flotante
y(i)=z(2);                   % Extracción del valor medido, omitiendo el tiempo
end
end
end
```

### C2. Conversión y almacenamiento de los datos.

```
% Convertir todos los datos de una broca, y guardándolos de la forma
% BXXYYY, donde XX es la broca, e YYY es el agujero
clear all
clc

BXX='B81';                    % Broca a convertir
YYY=1:234;                     % Agujeros de interés

nombre='broca8_1_';            % Nombre del archivo original
ubicacion='D:\Brocas\broca 8 1\'; % Ubicacion de los archivos a
convertir
ubicacion_guardar='D:\Brocas\Broca 8 1 mat\'; % Ubicacion para guardar los
archivos en formato MATLAB

% Generación de los nombres de los archivos
for i=1:length(YYY) %Cantidad de agujeros
tic
k=YYY(i);
disp(['Agujero: ', num2str(k)]);
```

```

if k<10
filename=[ubicacion_guardar BXX '00' num2str(k) '.mat'];
varname = [BXX '00' num2str(k)];
A=[ubicacion nombre '00' num2str(k) '.lvm'];
s = [BXX '00' num2str(k) '= B;'];
z=[BXX '00' num2str(k)];
elseif k<100
filename=[ubicacion_guardar BXX '0' num2str(k) '.mat'];
varname = [BXX '0' num2str(k)];
A=[ubicacion nombre '0' num2str(k) '.lvm'];
s = [BXX '0' num2str(k) '= B;'];
z=[BXX '0' num2str(k)];
else
filename=[ubicacion_guardar BXX num2str(k) '.mat'];
varname = [BXX num2str(k)];
A=[ubicacion nombre num2str(k) '.lvm'];
s = [BXX num2str(k) '= B;'];
z=[BXX num2str(k)];
end

B=leerdatos(A);           % Lectura y conversión de los datos
eval(s);
save(filename,varname); % Almacenamiento de los datos
clear (z)
toc
end

```

### C3. Detección del inicio del taladrado en cada agujero.

```

%% Detección del intervalo de interés en las señales
% Se almacena el tiempo de inicio de cada señal en la matriz t_in
% t_in(i,k) Almacenamiento del tiempo inicial, i=broca, k=agujero
clear all
clc

BROCAS=char('B01','B02','B81','B82','B61','B62','B63');
n_aguB=[74 118 234 234 573 592 149]; % Cantidad de agujeros de cada broca
ubicacion=char('D:\Proyecto de Grado\MATLAB\B01\','D:\Proyecto de
Grado\MATLAB\B02\','D:\Proyecto de Grado\MATLAB\B81\','D:\Proyecto de
Grado\MATLAB\B82\','D:\Proyecto de Grado\MATLAB\B61\','D:\Proyecto de
Grado\MATLAB\B62\','D:\Proyecto de Grado\MATLAB\B63\');
B=1:7; % Brocas a analizar
t_max=[13 13 12 12 12 12.5 12.5]; % Duración de cada taladrado

% Todos los agujeros
YYY2=zeros(7,592);
for i=1:length(B)
YYY2(i,1:n_aguB(B(i)))=1:n_aguB(B(i));
end

% Crear el nombre de los archivos a analizar, BXXYYY
for i=1:length(B)
BXX=BROCAS(B(i),:);
YYY=YYY2(i,:);
for k=1:length(YYY)
if YYY(k)<10
arc=[BXX '00' num2str( YYY(k))];
elseif YYY(k)<100
arc=[BXX '0' num2str( YYY(k))];

```

```

else
arc=[BXX num2str( YY(k))];
end
archivo(k,:,i)=arc;      %agujero, nombre, broca
end
end

%% Cargar y Recortar las señales
Fs=51200;                % Frecuencia de muestreo [Hz]
T = 1/Fs;                % Tiempo de muestreo [s]
nd=100;                  % Numero de bloques
[c1,c2]=size(YYY2);
graficar=0;              % 0=no graficar, 1= graficar las señales

for i=1:length(B)        % Contador para brocas
for k=1:c2                % Contador para agujeros
    if YYY2(i,k)>0

% Cargar los archivos-----
A=[ubicacion(B(i),:) archivo(k,:,i)];
load(A,archivo(k,:,i));
x=eval(archivo(k,:,i))'; % Señal original
clear (archivo(k,:,i));

% Eliminación del offset y detección del comienzo-----
x=x-mean(x);             % Señal sin offset
[c3,c4]=size(x);
t=(0:c4-1)*T;            % Vector de tiempo para la señal
t_d(i,k)=c4/Fs;          % Duración original [s]
d=fix(c4/nd);

% Cálculo del valor eficaz por bloques-----
for j=1:nd
y_temp1=x(1+d*(j-1):j*d); % Vector de cada bloque
Y_rms_ins(j)=sqrt(mean(y_temp1.^2)); % Valor eficaz del bloque
end
t2=(0:nd-1)*t_d(i,k)/nd; % Vector de tiempos para cada bloque

% Detección del comienzo
in=1;
for j=1:nd-5
ener=mean(Y_rms_ins(1:j));
if Y_rms_ins(j+5)>1.3*ener
    in=j+3;
    break
end
end

if in==1
    disp(['Advertencia: ', archivo(k,:,i)]); % La grabación de la señal fue desde
el comienzo
end

t_in(i,k)=t2(in);        % Almacenamiento del tiempo inicial, i=broca, k=agujero

if (t_d(i,k)-t2(in))<t_max(i)
t_in(i,k)=t_d(i,k)-t_max(i);
end

% Grafica de la señal y la detección de su comienzo-----

```

```

if graficar==1
subplot(211)
plot(t,x); grid on
title(archivo(k,:,i));

subplot(212)
plot(t2,Y_rms_ins,'-s'),grid on
hold on
plot(t2(in),Y_rms_ins(in),'rs')
hold off
title('Detección del comienzo')
xlabel('Tiempo [s]')
pause
end

disp(['Progreso Broca: ', BROCAS(B(i),:), ' Agujero: ', num2str(k)]);
end
end
end

```

#### C4. Función para recortar las señales

```

function [ y ] = recortar( x,t_o,t_d )
% Recorta una señal de entrada
% Donde t_o es el tiempo de inicio y t_d es la duración
Fs=51200; % Frecuencia de muestreo [Hz]
T = 1/Fs; % Tiempo de muestreo
[a,dim]=size(x);
t_so=dim/Fs; %Duracion de la señal original

if t_d>(t_so-t_o)
t_d=t_so-t_o; %Duracion cada bloque
disp(['Duracion de cada bloque: ', num2str(t_d)]);
end

in=fix(t_o*Fs+1); % Posición inicial
fin=fix(in+t_d*Fs-1); % Posición final
y(1,:)=x(in:fin); % Señal recortada
end

```

#### C5. Señal de prueba para los micrófonos

```

%% Generación de tonos para la prueba de los micrófonos
clear all
clc
Fs=3*51200; % Frecuencia de muestreo [Hz]
t_d=10; % Duracion de la señal
T = 1/Fs; % Periodo
t=(0:t_d*Fs-1)*T; % Vector de tiempo
f=(1:100)*250; % Frecuencias a generar
y2=zeros(1,length(t));
for i=1:length(f)
y_temp=sin(2*pi.*f(i).*t);
y2=y2+y_temp; % Señal de prueba
end

%%

```

```

y=1*y2+1*randn(1,t_d*Fs); % Señal de prueba con ruido blanco
soundsc(y,Fs); % Reproducción de la señal

%% Calculo del espectro de la señal de prueba para los micrófonos
h=spectrum.periodogram;
hm=psd(h,y,'Fs',Fs);
Pw= hm.Data;
Fw= hm.Frequencies;

% Grafica
plot(Fw,10*log10(abs(Pw)), 'r'), hold on, grid on
xlim([0 25600])
ylim([-50 10])
xlabel('Frecuencia [Hz]', 'fontsize',14, 'fontweight', 'b')
ylabel('Potencia/Frecuencia
[dB/Hz]', 'fontsize',14, 'fontweight', 'b')%ylabel('Valor Eficaz [Vrms]')
title('Señal de Prueba', 'fontsize',14, 'fontweight', 'b')

```

## C6. Análisis en el dominio Temporal

```

%% Análisis de las señales en el dominio temporal
clear all
clc

BROCAS=char('B01','B02','B81','B82','B61','B62','B63');
n_aguB=[74 118 234 234 573 592 149]; % Cantidad de agujeros de cada broca
ubicacion=char('D:\Proyecto de Grado\MATLAB\B01\','D:\Proyecto de
Grado\MATLAB\B02\','D:\Proyecto de Grado\MATLAB\B81\','D:\Proyecto de
Grado\MATLAB\B82\','D:\Proyecto de Grado\MATLAB\B61\','D:\Proyecto de
Grado\MATLAB\B62\','D:\Proyecto de Grado\MATLAB\B63\');
B=1; % Brocas a Analizar
t_max=[13 13 12 12 12 12.5 12.5]; % Duracion de cada taladrado
n_a=10; % Numero de agujeros a analizar
criterio=1; % 0 todo, 1 puntos extremos, 2 porcentaje

% Todos los agujeros
if criterio==0
    YY2=zeros(7,592);
    for i=1:length(B)
        YY2(i,1:n_aguB(B(i)))=1:n_aguB(B(i));
    end
end

% Vida con los puntos extremos
if criterio==1
    for i=1:length(B)
        YY2(i,:)=round(linspace(1,n_aguB(B(i)),n_a));
    end
end

% Vida Porcentaje
if criterio==2
    for i=1:length(B)
        YY2(i,:)=fix((1:n_a)*n_aguB(B(i))/n_a);
    end
end
vida=fix((1:n_a)*100/n_a);

% Crear el nombre de los archivos a analizar, BXXYYY
for i=1:length(B)

```

```

BXX=BROCAS(B(i),:);
YYY=YYY2(i,:);
for k=1:length(YYY)
if YYY(k)<10
arc=[BXX '00' num2str( YYY(k))];
elseif YYY(k)<100
arc=[BXX '0' num2str( YYY(k))];
else
arc=[BXX num2str( YYY(k))];
end
archivo(k,:,i)=arc; %agujero, nombre, broca
end
end
%% Cargar y Recortar las señales

load t_in.mat % Cargar la matriz con los tiempos iniciales
nd=100; % Cantidad de bloques a analizar
[c1,c2]=size(YYY2);
for i=1:length(B) % Contador de brocas
for k=1:c2 % Contador de agujeros
if YYY2(i,k)>0

% Cargar los archivos-----
A=[ubicacion(B(i),:) archivo(k,:,i)];
load(A,archivo(k,:,i));
x1=eval(archivo(k,:,i))';
clear (archivo(k,:,i));

x=recortar(x1,t_in(B(i),YYY2(i,k)),t_max(B(i)));
medio(k)=mean(x);
x=x-mean(x);
[c3,c4]=size(x);

% Autocorrelación-----
[r,lags]=xcorr(x,'coeff');
r(c4)=0;
autocorr(k,i)=max(r);

% Correlación-----
A=[ubicacion(B(i),:) archivo(1,:,i)];
load(A,archivo(1,:,i));
x2=eval(archivo(1,:,i))';
x_ref=recortar(x2,t_in(B(i),YYY2(i,1)),t_max(B(i)));
x_ref=x_ref-mean(x_ref);

[r,lags]=xcorr(x,x_ref,'coeff');
corr(k,i)=max(r);

%Amplitud-----
amplitud(k,i)=max(abs(x));

%Rango-----
rango(k,i)=max(x)-min(x);

%Desviación estándar-----
[mu(k,i) sigma(k,i)] = normfit(x);

% Curtosis, un valor de 3 para una señal aleatoria-----
kurt(k,i)=kurtosis(x);

```

```

%Asimetria-----
asimetria(k,i)=skewness(x);

% Valor RMS-----
Y_rms(k,i)=sqrt(mean(x.^2));

% Valor medio-----
Y_medio(k,i)=mean(abs(x));

% Valor RMS por bloques-----
d=fix(c4/nd);
for j=1:nd
y_temp1=x(1+d*(j-1):j*d);           %Vector de cada segmento
Y_rms_temp(j)=sqrt(mean(y_temp1.^2)); %Valor del segmento
end
Y_rms_ins(:,k,i)=Y_rms_temp;

% Conteo de Picos-----
A=[ubicacion(B(i),:) archivo(1,:,i)];
load(A,archivo(1,:,i));
x2=eval(archivo(1,:,i)');
clear(archivo(1,:,i));
x_ref=recortar(x2,t_in(B(i),YYY2(i,1)),t_max(B(i)));
x_ref=x_ref-mean(x_ref);
ref=6*sqrt(mean(x_ref.^2));
d=fix(c4/nd);

for j=1:nd
y_temp=abs(x(1+d*(j-1):j*d));       %Vector de cada segmento
y_temp(y_temp<ref)=[];
n_picos_b(j,k,i)=length(y_temp);
end

n_picos(k,i)=sum(n_picos_b(:,k,i));

disp(['Progreso Broca: ', BROCAS(B(i),:), ' Agujero: ', num2str(k)]);
end
end
end

```

## C7. Calculo de Espectros

```

%% Análisis en el dominio de la frecuencia. Calculo de los espectros
clear all
clc

BROCAS=char('B01','B02','B81','B82','B61','B62','B63');
n_aguB=[74 118 234 234 573 592 149]; % Cantidad de agujeros de cada broca
ubicacion=char('D:\Proyecto de Grado\MATLAB\B01\','D:\Proyecto de
Grado\MATLAB\B02\','D:\Proyecto de Grado\MATLAB\B81\','D:\Proyecto de
Grado\MATLAB\B82\','D:\Proyecto de Grado\MATLAB\B61\','D:\Proyecto de
Grado\MATLAB\B62\','D:\Proyecto de Grado\MATLAB\B63\');
B=1; % Brocas a Analizar
t_max=[13 13 12 12 12 12.5 12.5]; % Duracion de cada taladrado
n_a=2; % Numero de agujeros a analizar
criterio=1; % 0 todo, 1 puntos extremos, 2 porcentaje

% Todos los agujeros
if criterio==0
YYY2=zeros(7,592);

```

```

for i=1:length(B)
YYY2(i,1:n_aguB(B(i)))=1:n_aguB(B(i));
end
end

% Vida con los puntos extremos
if criterio==1
for i=1:length(B)
YYY2(i,:)=round(linspace(1,n_aguB(B(i)),n_a));
end
end

% Vida Porcentaje
if criterio==2
for i=1:length(B)
YYY2(i,:)=fix((1:n_a)*n_aguB(B(i))/n_a);
end
end
vida=fix((1:n_a)*100/n_a);

% Crear el nombre de los archivos a analizar, BXXYYY
for i=1:length(B)
BXX=BROCAS(B(i),:);
YYY=YYY2(i,:);
for k=1:length(YYY)
if YYY(k)<10
arc=[BXX '00' num2str( YYY(k))];
elseif YYY(k)<100
arc=[BXX '0' num2str( YYY(k))];
else
arc=[BXX num2str( YYY(k))];
end
archivo(k,:,i)=arc; %agujero, nombre, broca
end
end
%% Cargar y Recortar las señales
tic
load t_in.mat
[c1,c2]=size(YYY2);

Fs=51200; % Frecuencia de muestreo
metodo=0; % 0=welch, 1= periodograma

% Welch
if metodo==0
window=256; % 256 tesis
noverlap=64; % puntos de overlap
h =spectrum.welch('Hamming',window,100*noverlap/window);
end

% Periodograma
if metodo==1
h=spectrum.periodogram;
end

for i=1:length(B)
for k=1:c2
if YYY2(i,k)>0
A=[ubicacion(B(i),:) archivo(k,:,i)];
load(A,archivo(k,:,i));

```

```

x1=eval (archivo(k, :, i))';
clear (archivo(k, :, i));

x=recortar(x1,t_in(B(i),YYY2(i,k)),t_max(B(i)));
x=x-mean(x);
%x=x/std(x); % Normalizar la señal
[c3,c4]=size(x);

hpsd = psd(h,x,'Fs',Fs);
Pw1= hpsd.Data;
Fw= hpsd.Frequencies;

PW(:,k,i)=Pw1;

disp(['Broca: ', BROCAS(B(i),:), ' Agujero: ', num2str(k)]);
end
end
end
toc

```

## C8. Calculo de Espectrogramas

```

%% Análisis en el dominio de la frecuencia. Calculo de los espectrogramas
clear all
clc

BROCAS=char('B01','B02','B81','B82','B61','B62','B63');
n_aguB=[74 118 234 234 573 592 149]; % Cantidad de agujeros de cada broca
ubicacion=char('D:\Proyecto de Grado\MATLAB\B01\','D:\Proyecto de
Grado\MATLAB\B02\','D:\Proyecto de Grado\MATLAB\B81\','D:\Proyecto de
Grado\MATLAB\B82\','D:\Proyecto de Grado\MATLAB\B61\','D:\Proyecto de
Grado\MATLAB\B62\','D:\Proyecto de Grado\MATLAB\B63\');
B=1; % Brocas a Analizar
t_max=[13 13 12 12 12 12.5 12.5]; % Duracion de cada taladrado
n_a=4; % Numero de agujeros a analizar
criterio=1; % 0 todo, 1 puntos extremos, 2 porcentaje

% Todos los agujeros
if criterio==0
    YYY2=zeros(7,592);
    for i=1:length(B)
        YYY2(i,1:n_aguB(B(i)))=1:n_aguB(B(i));
    end
end

% Vida con los puntos extremos
if criterio==1
    for i=1:length(B)
        YYY2(i,:)=round(linspace(1,n_aguB(B(i)),n_a));
    end
end

% Vida Porcentaje
if criterio==2
    for i=1:length(B)
        YYY2(i,:)=fix((1:n_a)*n_aguB(B(i))/n_a);
    end
end
vida=fix((1:n_a)*100/n_a);

```

```

% Crear el nombre de los archivos a analizar, BXXYYY
for i=1:length(B)
BXX=BROCAS(B(i),:);
YYY=YYY2(i,:);
for k=1:length(YYY)
if YYY(k)<10
arc=[BXX '00' num2str( YYY(k))];
elseif YYY(k)<100
arc=[BXX '0' num2str( YYY(k))];
else
arc=[BXX num2str( YYY(k))];
end
archivo(k,:,i)=arc; %agujero, nombre, broca
end
end
%% Cargar y Recortar las señales
tic
load t_in.mat
[c1,c2]=size(YYY2);
Fs=51200;
window=0.2*Fs;
noverlap=window/2;
nfft=512;

for i=1:length(B)
for k=1:c2
if YYY2(i,k)>0
A=[ubicacion(B(i),:) archivo(k,:,i)];
load(A,archivo(k,:,i));
x1=eval(archivo(k,:,i));
clear (archivo(k,:,i));

x=recortar(x1,t_in(B(i),YYY2(i,k)),t_max(B(i)));
x=x-mean(x);
[c3,c4]=size(x);

spectrogram(x>window,noverlap,nfft,Fs)
%[S,F,T,P] =spectrogram(x>window,noverlap,nfft,Fs);
% surf(F,T,10*log10(P),'edgecolor','none'); axis tight;
% view(0,90);
xlabel('Frecuencia [Hz'],'fontsize',14);
ylabel('Tiempo [s'],'fontsize',14);
title(archivo(k,:,i),'fontsize',14,'fontweight','b')
pause

disp(['Broca: ', BROCAS(B(i),:), ' Agujero: ', num2str(k)]);
end
end
end

```

## C9. Análisis Wavelet

```

%% Análisis Wavelet
clear all
clc

BROCAS=char('B01','B02','B81','B82','B61','B62','B63');
n_aguB=[74 118 234 234 573 592 149]; % Cantidad de agujeros de cada broca
ubicacion=char('D:\Proyecto de Grado\MATLAB\B01\','D:\Proyecto de
Grado\MATLAB\B02\','D:\Proyecto de Grado\MATLAB\B81\','D:\Proyecto de

```

```

Grado\MATLAB\B82\','D:\Proyecto de Grado\MATLAB\B61\','D:\Proyecto de
Grado\MATLAB\B62\','D:\Proyecto de Grado\MATLAB\B63\');
B=1; % Brocas a Analizar
t_max=[13 13 12 12 12 12.5 12.5]; % Duracion de cada taladrado
n_a=4; % Numero de agujeros a analizar
criterio=1; % 0 todo, 1 puntos extremos, 2 porcentaje

% Todos los agujeros
if criterio==0
    YYY2=zeros(7,592);
    for i=1:length(B)
        YYY2(i,1:n_aguB(B(i)))=1:n_aguB(B(i));
    end
end

% Vida con los puntos extremos
if criterio==1
    for i=1:length(B)
        YYY2(i,:)=round(linspace(1,n_aguB(B(i)),n_a));
    end
end

% Vida Porcentaje
if criterio==2
    for i=1:length(B)
        YYY2(i,:)=fix((1:n_a)*n_aguB(B(i))/n_a);
    end
end
vida=fix((1:n_a)*100/n_a);

% Crear el nombre de los archivos a analizar, BXXYYY
for i=1:length(B)
    BXX=BROCAS(B(i),:);
    YYY=YYY2(i,:);
    for k=1:length(YYY)
        if YYY(k)<10
            arc=[BXX '00' num2str( YYY(k))];
        elseif YYY(k)<100
            arc=[BXX '0' num2str( YYY(k))];
        else
            arc=[BXX num2str( YYY(k))];
        end
        archivo(k,:,i)=arc; %agujero, nombre, broca
    end
end

%% Wavedec, Descomposición Multinivel
tic
load t_in.mat
[c1,c2]=size(YYY2);
%wfilters 'dmey' 'sym2' 'sym6'
w_madre=char('db3','db4','db7','dmey','sym2','sym6');
[wf,wc]=size(w_madre);
nivel=5;

for i=1:length(B)
    for k=1:c2
        if YYY2(i,k)>0
            A=[ubicacion(B(i),:) archivo(k,:,i)];
            load(A,archivo(k,:,i));
            x1=eval(archivo(k,:,i)');
        end
    end
end

```

```

clear (archivo(k,:,i));

x=recortar(x1,t_in(B(i),YYY2(i,k)),t_max(B(i)));
x=x-mean(x);
[c3,c4]=size(x);
for j=1:wf
% Descomposición Wavelet
[c,l] = wavedec(x,nivel,w_madre(j,:));
[Ea,Ed] = wenergy(c,l);

Eax(k,i,j)=Ea;      %agujero broca wavelet
Edx(:,k,i,j)=Ed;   %coeficientes agujero broca wavelet
end
disp(['Broca: ', BROCAS(B(i),:), ' Agujero: ', num2str(k)]);
end
end
end

clearvars -except Eax Edx w_madre BROCAS n_aguB
%% Graficas
% 1 B01 74
% 2 B02 118
% 3 B81 234
% 4 B82 234
% 5 B61 573
% 6 B62 592
% 7 B63 149
load AnTemp
clearvars -except Y_rms
load WWall
clc
w_madre=char('db3','db4','db7','dmey','sym2','sym6');
wx=2; % Wavelet a graficar
for nivel=0:5
%nivel=5; %0 aproximación, los demás detalle 5 niveles
B=7; %Brocas

if nivel==0
    for w=wx:wx
for k=1:length(B)
y=Eax(1:n_aguB(B(k)),B(k),w);
subplot(211)
h=plot(y,'-bx'); grid on, hold on
xlabel('Agujero','fontsize',14)
ylabel(['Aproximacion ' w_madre(w,:)], 'fontsize',14)
title(['Porcentaje de Energia ' BROCAS(B(k),:)], 'fontsize',14, 'fontweight', 'b')
set(h, 'LineWidth',1)
hold off

subplot(212)
y2=Y_rms(1:n_aguB(B(k)),B(k));
y3=sqrt(y/100).*y2;
h2=semilogy(y3,'-bx'); grid on, hold on
plot(y2,'r')
xlabel('Agujero','fontsize',14)
ylabel(['Valor Eficaz Aproximacion ' w_madre(w,:)], 'fontsize',14)
set(h2, 'LineWidth',1)
hold off

pause

```

```

end
    end
end

if nivel>0
n=nivel;
    for w=wx:wx
for k=1:length(B)
y=Edx(n,1:n_aguB(B(k)),B(k),w); %Edx(:,k,i,j)=Ed;    %coeficientes agujero broca
wavelet
subplot(211)
h=plot(y,'-bx'); grid on, hold on
ylabel(['Detalle ' num2str(n) ' ' w_madre(w,:) ],'fontsize',14)
title(['Porcentaje de Energia ' BROCAS(B(k),:)],'fontsize',14,'fontweight','b')
set(h,'LineWidth',1)
hold off

subplot(212)
y2=Y_rms(1:n_aguB(B(k)),B(k));
y3=sqrt(y/100).*y2';
h2=semilogy(y3,'-bx'); grid on, hold on
plot(y2,'r')
xlabel('Agujero','fontsize',14)
ylabel(['V. Eficaz Detalle ' num2str(n) ' ' w_madre(w,:) ],'fontsize',14)
set(h2,'LineWidth',1)
hold off
pause
end
    end
end
end

%% Graficas 2

% 1 B01 74
% 2 B02 118
% 3 B81 234
% 4 B82 234
% 5 B61 573
% 6 B62 592
% 7 B63 149
load AnTemp
clearvars -except Y_rms
load WVall
w_madre=char('db3','db4','db7','dmey','sym2','sym6');
desc=char('cA_5','cD_1','cD_2','cD_3','cD_4','cD_5');

B=1; %Brocas
wm=[1 2 4 5];
c=[3]; %nivel=5; %0 aproximación, los demás detalle 5 niveles
%nombres=char('cA_5 db4','cD_3 db4','cA_5 dmey','cA_5 sym2','Y_r_m_s');
nombres=char('cD_3 db4','Y_r_m_s');
i=1;
y2=Y_rms(1:n_aguB(B),B);
hold off
for c1=1:length(c)
nivel=c(c1);

if nivel==0
    for c2=1:length(wm)

```

```

        w=wm(c2);

y=Eax(1:n_aguB(B),B,w);
y3(i,:)=sqrt(y/100).*y2';
i=i+1;
    end
end

if nivel>0
n=nivel;
    for c2=1:length(wm)
        w=wm(c2);

y=Edx(n,1:n_aguB(B),B,w); %Edx(:,k,i,j)=Ed;      %coeficientes agujero broca
wavelet
y3(i,:)=sqrt(y/100).*y2';
i=i+1;

        end
    end
end

y3(i,:)=y2';
semilogy(y3');grid on, hold on %semilogy
title(BROCAS(B,:), 'fontsize',14, 'fontweight','b')
xlabel('Agujero', 'fontsize',14)
ylabel('Valor Eficaz [Vrms] ', 'fontsize',14)

legend(nombres)

%% Energia promedio por coeficiente

% 1 B01 74
% 2 B02 118
% 3 B81 234
% 4 B82 234
% 5 B61 573
% 6 B62 592
% 7 B63 149
clear all
clc
load WVall

% Eax(k,i,j)=Ea;      %agujero broca wavelet
% Edx(:,k,i,j)=Ed;    %coeficientes agujero broca wavelet
%w_madre=char('db3','db4','db7','dmey','sym2','sym6');

for i=1:7
    for j=1:6
        Eaprox(i,j)=mean(Eax(n_aguB(i),i,j)); %agujero broca wavelet
    end
end

for c=1:5
    for i=1:7
        for j=1:6

Edprox(i,c,j)=mean(Edx(c,n_aguB(i),i,j)); % broca wavelet coeficientes

        end
    end
end

```

```
    end
end

% Energia promedio coeficientes
figure
c=5;
ED=Edprox(:, :, 2);
h2=plot(ED);
legend(w_madre)
set(h2, 'LineWidth', 2)
```