



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL, DE MATERIALES Y**  
**FABRICACIÓN**  
**ÁREA DE CONOCIMIENTO DE INGENIERÍA DE LOS**  
**PROCESOS DE FABRICACIÓN**

# **TRABAJO FIN DE GRADO**

**INSTALACIÓN, PUESTA A PUNTO Y VALIDACIÓN DE UN**  
**VIBRÓMETRO LÁSER PARA MONITORIZACIÓN DE**  
**PROCESOS DE MECANIZADO**

Grado en

**INGENIERÍA MECÁNICA**

Autor: SALVADOR GONZÁLEZ CAMPOS

Tutor: FRANCISCO JAVIER TRUJILLO VILCHES

Cotutor: MANUEL JOSÉ HERRERA FERNÁNDEZ

MÁLAGA, SEPTIEMBRE de 2.023



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





## Breve Resumen

Las vibraciones que se producen durante los procesos de mecanizado (chattering) pueden afectar de forma notable a los resultados obtenidos durante estos procesos, desde el punto de vista de las tolerancias geométricas obtenidas o el desgaste de la herramienta de corte, entre otros. Su monitorización durante el proceso de corte es de especial relevancia para detectar posibles anomalías durante el mecanizado. Este aspecto es aún más relevante cuando el mecanizado se ejecuta en ausencia total de fluidos de corte (en seco), por motivos medioambientales. Bajo estas condiciones, el proceso es mucho más agresivo, pudiéndose obtener desviaciones significativas en la calidad de las piezas mecanizadas, reduciéndose, además, la vida útil de la herramienta.

Dentro de este marco se encuentra trabajando el Grupo de Investigación TEP-933 “Ingeniería de Fabricación de la Universidad de Málaga”, dentro de una de sus principales líneas de investigación “Optimización de procesos de mecanizado de aleaciones ligeras”. En concreto, este Trabajo Fin de Grado se encuentra enmarcado dentro del proyecto de investigación “Sistema experto para la mejora de la integridad superficial en el mecanizado sostenible de aleaciones ligeras (SPAREMETAL)”, con referencia PID2021-125988OBI00, convocatoria de 2021 de «PROYECTOS DE GENERACIÓN DE CONOCIMIENTO» en el marco del Programa Estatal para Impulsar la Investigación Científico-Técnica y su Transferencia, del Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación 2021-2023, del Ministerio de Ciencia e Innovación.

En este Trabajo de Fin de Grado se ha desarrollado una metodología para el montaje y la puesta a punto de un vibrómetro láser, con el fin de monitorizar procesos de mecanizado en un centro de torneado. Se ha desarrollado una guía para explicar, de forma muy concreta, los pasos a seguir para su utilización, tanto de todos los componentes que forman el equipo como del software usado para el análisis de los ensayos realizados. Tras todo el montaje y configuración, se ha conseguido un método rápido y sencillo de validación del instrumento para asegurar su correcto funcionamiento. Una vez validado, se han realizado varios ensayos con distintos materiales, analizando las señales de vibración captadas por el vibrómetro durante el proceso de mecanizado y variando los parámetros de corte, con el objetivo de detectar anomalías en el proceso cuando existan vibraciones que estén fuera de un rango común.

**Palabras clave:** Aleaciones ligeras, mecanizado, parámetros de corte, vibraciones, análisis en frecuencia.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





## Abstract

The vibrations that occur during machining processes (chattering) can significantly affect the results obtained during these processes, from the point of view of the geometric tolerances obtained or the tool wear, among others. Its monitoring during the cutting process is of special relevance to detect possible anomalies during machining. This aspect is even more relevant when machining is carried out in the total absence of cutting fluids (dry conditions), for environmental reasons. Under these conditions, the process is much more aggressive, being able to obtain significant deviations in the quality of the machined parts, also reducing the tool life.

The Research Group TEP-933 “Manufacturing Engineering of the University of Malaga” is working within this framework, within one of its main lines of research “Optimization of light alloy machining processes”. Specifically, this Final Degree Project is framed within the research project "Expert system for improving surface integrity in sustainable machining of light alloys (SPAREMETAL)", with reference PID2021-125988OBI00, 2021 call for <<PROJECTS OF KNOWLEDGE GENERATION>> within the framework of the State Program to Promote Scientific-Technical Research and its Transfer, of the State Plan for Scientific, Technical and Innovation Research 2021-2023, of the Ministry of Science and Innovation.

In this Final Degree Project, a methodology has been developed for the assembly and tuning of a laser vibrometer, in order to monitor machining processes in a turning center. A guide has been developed to explain, in a very specific way, the steps to follow for its use, both of all the components that make up the equipment and of the software used for the analysis of the tests carried out. After all the assembly and configuration, a quick and simple method of validation of the instrument has been achieved to ensure its correct operation. Once validated, several tests have been carried out with different materials, analyzing the vibration signals captured by the vibrometer during the machining process and varying the cutting parameters, with the aim of detecting anomalies in the process when there is chattering that is out of a common range.

**Key words:** Light alloys, machining, cutting parameters, chattering, frequency-domain analysis.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





## Agradecimientos

En primer lugar, a mis padres por su incansable sacrificio diario y confiar en mí hasta el final. Por sufrir conmigo las penas y celebrar conmigo las alegrías, gracias, os quiero mucho.

A mis hermanas que entre broma y broma me han ayudado a seguir adelante.

A ti, Victoria, que me viste comenzar esta hazaña, confiaste en mí, pero no has podido verme acabar, estés donde estés no me olvido de ti, tus rezos y de tus palabras de consuelo y ánimo cada vez que tropezaba en el camino.

A mis amigos de la universidad que me han hecho más ameno y divertido este trayecto cuando las cosas se ponían cuesta arriba, sobre todo a ti, Alex, has sido mi palmada en la espalda, mi hombro donde llorar y el abrazo de alegría en cada triunfo, que, para mí, han sido de los dos.

A mis tutores Manuel y Javier, por acompañarme y guiarme en este trayecto final.

Y a mí, por no rendirme, por seguir y no desistir, solo yo sé lo que ha costado llegar hasta aquí.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





## ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.3. Estructura de la memoria.....	3
CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS Y MEDICIÓN DE VIBRACIONES EN PROCESOS DE MECANIZADO. ....	5
2.1. Introducción .....	5
2.1.1. Variables de análisis de una vibración .....	5
2.1.2. Tipos de vibraciones.....	7
2.1.3. Frecuencia natural y resonancia .....	7
2.1.4. Transformada Rápida de Fourier.....	7
2.1.5. Desplazamiento, velocidad y aceleración de una vibración.....	8
2.2. Concepto de vibración dentro del mecanizado.....	9
2.2.1. Parámetros de corte en el torneado.....	10
2.2.2. Fuerzas de corte.....	12
2.2.3. Vibraciones en el mecanizado.....	13
2.2.4. Sistemas lineales y no lineales .....	13
2.2.5. Relación de las fuerzas de corte en los fenómenos de vibración.....	14
2.2.6. La influencia de la estabilidad de la máquina-herramienta sobre la vibración.....	14
2.3. Técnicas de medición de vibraciones en el proceso del mecanizado .....	16
2.3.1. Instrumentos de medida de vibraciones .....	18
2.3.1.1 Acelerómetros .....	18
2.3.1.2. Sensores de proximidad o próxímetros .....	19
2.3.1.3. Sensores de desplazamiento sin contacto .....	19
2.3.1.4. Sensor de desplazamiento relativo con contacto .....	19
2.3.1.5. Sensores de velocidad o velocímetros.....	20
2.3.1.6. Vibrómetros.....	21
2.3.2. Análisis de vibraciones.....	22
2.3.2.1. Proceso de análisis de vibraciones .....	25
2.4. Vibrómetro láser.....	29
2.4.1. Funcionamiento del VLD.....	30
2.4.1.1. Interferometría. Interferómetro de Michelson.....	31
2.4.2. Tipos de vibrómetros VLD.....	32
2.4.2.1. Vibrómetro de un solo punto.....	32
2.4.2.2. Vibrómetro diferencial .....	32



2.4.2.3. Vibrómetro Doppler de barrido SLDV o de escaneo .....	33
2.4.2.4. Vibrómetros rotacionales .....	33
2.4.2.5. Vibrómetros de plano .....	33
2.4.2.6. Vibrómetros multipunto .....	34
2.4.3. Aplicaciones del vibrómetro láser .....	34
2.4.3.1. Industria automotriz .....	35
2.4.3.2. Calibración de instrumentos .....	35
2.4.3.3. Salud .....	35
2.5. Vibraciones (chattering) en el mecanizado .....	35
2.5.1. Análisis predictivo .....	35
2.5.2. Chattering .....	37
2.5.3. Vibración en el mecanizado de aleaciones ligeras. ....	40
<b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>41</b>
3.1. Características técnicas del equipo .....	43
3.1.1. Vibrómetro láser IVS-500 .....	43
3.1.2. Caja de conexiones IVS-E-500 (JUNCTION BOX) .....	45
3.1.3. Indicador de nivel de señal .....	46
3.1.4. SIRIUS HS 8xACC .....	47
3.1.5. Conexiones entre dispositivos. Cableado .....	49
3.1.5.1. Cable de conexión principal IVS-C-500 .....	49
3.1.5.2. Cable de conexión de serie IVS-C-520 .....	50
3.1.5.3. Cable de conexión del indicador de señal IVS-A-510 .....	50
3.1.5.4. Cable de entrada de tensión de red de la caja de conexiones .....	51
3.1.5.5. Interfaz USB (Universal Serial Bus, tipo B) .....	51
3.1.5.6. Cable de conexión entre la caja de conexiones y el amplificador .....	52
3.1.5.7. Interfaz USB (tipo B-mini) .....	52
3.1.5.8. Cable de entrada de tensión de red al amplificador SIRIUS .....	53
3.2. Configuración del equipo .....	53
3.3. Monitorización del proceso .....	58
3.4. Interpretación de datos con el software .....	69
3.5. Guía rápida de uso .....	75
<b>CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>77</b>
4.1. Análisis de vibraciones en mecanizado de Aluminio 7075 .....	81
4.2. Análisis de vibraciones en mecanizado de Acero Inoxidable AISI 14404 .....	83
4.3. Análisis de vibraciones en mecanizado de Acero al Carbono .....	85
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>89</b>
<b>CAPÍTULO 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>91</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Obtención y análisis de vibraciones en un proceso de mecanizado con torno.....	5
Figura 2. Conceptos de análisis de una señal. ....	6
Figura 3. Concepto de fase. Dos señales desfasadas.....	7
Figura 4. Transformada Rápida de Fourier (FFT).....	8
Figura 5. Ejemplo de una señal analizada en base a cada variable. ....	9
Figura 6. Proceso de torneado. ....	10
Figura 7. Fuerza total de corte descompuesta en tres fuerzas: $F_c$ , $F_a$ , $F_p$ . ....	12
Figura 8. Relación entre flexión, fuerza y cotas de un componente cilíndrico en voladizo (sujeto de un solo lado). ....	15
Figura 9. Contrapunto para piezas largas en el mecanizado con torno .....	16
Figura 10. Contrapunto y luneta como sistemas de sujeción para piezas demasiado largas o delgadas. La imagen muestra una luneta fija . ....	16
Figura 11. Efecto piezoeléctrico.....	17
Figura 12. Componentes de un transductor piezoeléctrico. ....	18
Figura 13. Acelerómetro piezoeléctrico .....	19
Figura 14. Transductor sísmico de velocidad.....	20
Figura 15. Componentes de un transductor sísmico de velocidad. ....	20
Figura 16. Vibrómetro.....	21
Figura 17. Dominio del tiempo - Dominio de la frecuencia .....	22
Figura 18. Escala lineal de amplitud .....	23
Figura 19. Escala de amplitud logarítmica.....	24
Figura 20. Escala de amplitud en Decibelios .....	24
Figura 21. FFT de una onda compleja.....	26
Figura 22. Suma de vibraciones simples en el dominio de la frecuencia .....	26
Figura 23. Desfase entre desplazamiento, velocidad y aceleración .....	27
Figura 24. Magnitud que usar según la frecuencia.....	28
Figura 25. Comportamiento del espectro según la magnitud de vibración utilizada .....	28
Figura 26. Vibrómetro láser. Modelo: IVS-500 Industrial Vibration Sensor.....	30
Figura 27. Ilustración del efecto Doppler. A) Cuerpo alejándose de la fuente. B) Cuerpo acercándose a la fuente.....	30
Figura 28. Esquema del funcionamiento básico de la interferometría láser.....	31
Figura 29. Interferometría Michelson. ....	32
Figura 30. Esquema de los haces de láser del vibrómetro láser diferencial. ....	32
Figura 31. Esquema de los haces de láser del vibrómetro de barrido o escaneo.....	33
Figura 32. Esquema de los haces de láser del vibrómetro rotacional.....	33
Figura 33. Esquema del haz de láser del vibrómetro de plano.....	34
Figura 34. Esquema de los haces de láser de un vibrómetro multipunto. ....	34
Figura 35. Ubicación relativa en el SLD.....	39
Figura 36. Proceso de obtención del Diagrama de lóbulos de estabilidad (SLD). ....	39
Figura 37. Esquema general de la metodología experimental.....	42
Figura 38. Elementos del equipo completo. ....	43
Figura 39. Vista lateral (a) y posterior (b) del Vibrómetro láser IVS-500. ....	43
Figura 40. Dimensiones Vibrómetro Láser IVS-500. ....	45
Figura 41. Vista frontal y posterior (a) y vista superior (b) de la caja de conexiones.....	45
Figura 42. Indicador de nivel de señal. ....	46
Figura 43. Vista frontal y posterior (a) y vista superior (b) del amplificador de señal SIRIUS HS 8xACC.....	48
Figura 44. Dimensiones del amplificador SIRIUS.....	49
Figura 45. Cable de conexión principal IVS-C-500.....	49

Figura 46. Cable de conexión de serie IVS-C-520.....	50
Figura 47. Cable de conexión del indicador de señal IVS-A-510.....	50
Figura 48. Cable de entrada de tensión de red de la caja de conexiones.....	51
Figura 49. Interfaz USB (Universal Serial Bus, tipo B) y USB a PC. ....	51
Figura 50. Cable de conexión entre la caja de conexiones y el amplificador de señal SIRIUS HS. .....	52
Figura 51. Cable de conexión entre el amplificador SIRIUS (USB tipo B-mini) al PC (USB tipo A). ....	52
Figura 52. Cable de toma de corriente del amplificador de señal. ....	53
Figura 53. Trípode y soporte del Vibrómetro.....	54
Figura 54. Preparación del soporte del trípode para la correcta fijación del vibrómetro. ....	54
Figura 55. Vibrómetro fijado en el soporte del trípode. ....	55
Figura 56. Conexiones Vibrómetro - Caja de conexiones - Indicador de nivel de señal. ....	56
Figura 57. Conexiones PC – Amplificador - Caja de conexiones - corriente. ....	56
Figura 58. Metro para la colocación correcta del vibrómetro. ....	57
Figura 59. Distancia correcta de colocación de acuerdo con las marcas verdes. ....	58
Figura 60. Pantalla al iniciar el programa. ....	58
Figura 61. Acceso a configuración del canal. ....	59
Figura 62. Opciones de selección de canal.....	59
Figura 63. Acceso al canal seleccionado.....	59
Figura 64. Pantalla de configuración del canal seleccionado.....	60
Figura 65. Edición del sensor y configuración.....	61
Figura 66. Continuación del proceso de configuración del canal. ....	61
Figura 67. Pantalla final de la configuración del canal. ....	62
Figura 68. Inicio de un análisis cualquiera.....	62
Figura 69. Pantalla inicial de gráficas de señal. ....	63
Figura 70. Proceso de acceso a una gráfica FFT.....	63
Figura 71. Pantalla tras añadir la gráfica FFT. ....	64
Figura 72. Correcta selección de la ventana gráfica FFT mostrando el color naranja. ....	64
Figura 73. Columna de configuración de la gráfica seleccionada.....	65
Figura 74. Montaje para la comprobación de que la toma de datos es correcta. ....	65
Figura 75. Procedimiento para grabar la señal captada.....	66
Figura 76. Ventana general de las gráficas de la señal captada.....	66
Figura 77. Botones que usar para el análisis de una zona más específica de la señal. ....	67
Figura 78. Señal y frecuencia captada por el vibrómetro láser. ....	67
Figura 79. Señal y frecuencia captada por el vibrómetro láser. ....	68
Figura 80. Señal y frecuencia captada por el vibrómetro láser. ....	68
Figura 81. Señal y frecuencia captada por el vibrómetro láser. ....	69
Figura 82. Introducción del código CNC en el centro de torneado.....	69
Figura 83. Imagen general de la señal captada en diferentes gráficas.....	70
Figura 84. Señal completa en el dominio del tiempo (Amplitud-Tiempo). ....	70
Figura 85. Ventana gráfica "Registrador". ....	71
Figura 86. Fases de la señal captada en el proceso de mecanizado.....	71
Figura 87. Ampliación de la zona de la señal previa al comienzo del mecanizado. ....	71
Figura 88. Interferencia de un nido de viruta en el láser. ....	72
Figura 89. Interferencia de un nido de viruta en el láser.....	72
Figura 90. FFT con magnitud de amplitud la velocidad (mm/s).....	73
Figura 91. FFT con magnitud de amplitud la aceleración.....	73
Figura 92. Pasos para obtener la integración de la señal.....	74
Figura 93. Diagrama de flujo como guía rápida de la puesta a punto del equipo. ....	75
Figura 94. Herramienta de corte utilizada en los ensayos.....	79



Figura 95. Plaquita de corte utilizada para los ensayos.....	79
Figura 96. Ejemplo de caja de plaquitas con etiqueta de clasificación en buen estado.....	80
Figura 97. Los seis grupos de la Clasificación ISO de metales duros.....	80
Figura 98. Incidencia del láser sobre la propia probeta a mecanizar.....	81
Figura 99. Señal captada previa al mecanizado. ....	82
Figura 100. Frecuencias dominantes en el proceso. ....	82
Figura 101. Imagen general de la señal captada en el primer ensayo con Acero Inoxidable AISI 14404.....	83
Figura 102. Frecuencia dominante del ensayo. ....	84
Figura 103. Diferentes zonas de la señal captada.....	85
Figura 104. Similitud de los dos primeros ensayos con Acero al Carbono.....	86
Figura 105. Acabado superficial de la probeta por fallo prematuro de la plaquita. ....	87
Figura 106. Amplitudes de vibración exageradas en el momento de la rotura de la hta. ....	87



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA





## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Conexiones principales .....	44
Tabla 2. Condiciones ambientales.....	44
Tabla 3. Calibración .....	44
Tabla 4. Carcasa .....	44
Tabla 5. Conexiones principales de la caja de conexiones.....	46
Tabla 6. Condiciones ambientales.....	46
Tabla 7. Carcasa de la caja de conexiones .....	46
Tabla 8. Indicador .....	47
Tabla 9. Condiciones ambientales.....	47
Tabla 10. Carcasa del indicador de señal .....	47
Tabla 11. Cable del indicador de señal .....	47
Tabla 12. Alimentación del amplificador.....	48
Tabla 13. Condiciones ambientales.....	48
Tabla 14. Composición en % en masa de la aleación ensayada.....	77
Tabla 15. Parámetros de corte utilizados en los ensayos de Al 7075.....	77
Tabla 16. Parámetros de corte utilizados en los ensayos de AISI 1.4404 .....	78
Tabla 17. Parámetros de corte utilizados en los ensayos de Acero al carbono .....	78
Tabla 18. Comparación de los datos de amplitud recogidos con Al 7075. ....	83
Tabla 19. Valores máximos y mínimos de amplitud de los dos primeros ensayos realizados con AISI 1.4404.....	84
Tabla 20. Valores máximos y mínimos del ensayo según la zona de proceso de mecanizado. ...	85



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

La Industria aeronáutica tiene unas características muy especiales que hacen que se diferencie, de forma notoria, del resto de sectores industriales. Es por esta razón, que es una industria con un gran interés estratégico internacional y nacional.

En España, en las últimas décadas, el sector aeronáutico ha aumentado su desarrollo de forma exponencial, colocando a nuestro país entre los principales de Europa en el sector, tanto por niveles de producción como de generación de empleo. Aun así, existen continuos retos tecnológicos en esta industria que, junto con la gran competencia que existe a nivel internacional, hace que se creen nuevas estrategias para reforzar la productividad de estas empresas.

Algunos de los factores importantes a la hora de mejorar la productividad y competitividad son las actuaciones en I+D+i, que se enfocan, en la gran mayoría de los casos, en el estudio más exhaustivo de los materiales empleados en estas industrias, como también mejorar el rendimiento de los procesos de fabricación que se utilizan, teniendo en cuenta algunos aspectos: funcional, económico, medioambiental y energético [1].

Desde el punto de vista de los materiales empleados, las aleaciones ligeras presentan una serie de propiedades que las hacen idóneas para su uso en la industria aeroespacial. Dentro de este tipo de aleaciones se encuentran las aleaciones de aluminio. En concreto, su baja densidad y su excelente resistencia mecánica hacen que sean muy utilizadas en la fabricación de componentes estructurales para aeronaves. Estas aleaciones, como las de aluminio, titanio y magnesio, proporcionan una combinación excelente de propiedades para su uso en el sector aeroespacial.

En cuanto a los procesos de fabricación aplicados a este tipo de componentes, uno de los más usados es el conformado por arranque de viruta.

En los últimos años, se han promulgado numerosas leyes y normativas desarrolladas con respecto al medioambiente. Es por esto, que se trata de uno de los principales retos al que se enfrentan las empresas del sector industrial, debiendo desarrollar y aplicar tecnologías productivas, pero con menor impacto ambiental, sin bajar el nivel de competitividad.

En los procesos de mecanizado se han utilizado tradicionalmente los llamados fluidos de cortes, que aportan beneficios desde el punto de vista de la lubricación y refrigeración del proceso, sin embargo, presentan un impacto negativo sobre el medio ambiente por la generación de residuos tóxicos. La tendencia actual es la de evitar su uso debido a que el reciclado de estos residuos supone un alto coste para las empresas.

El problema de la eliminación total de estas sustancias es que se dan condiciones agresivas con respecto a los esfuerzos mecánicos y térmicos que se generan. Es por esto por lo que surge la necesidad de indagar aún más en el estudio de todas las variables que afectan al rendimiento del proceso en estas nuevas condiciones con el fin de mejorar su rendimiento. Es importante destacar la escasez de estudios sobre el mecanizado en seco de aleaciones de aluminio de uso principal en la industria aeroespacial.

Dentro del marco expuesto se encuentran investigando de forma conjunta distintos miembros de las Universidades de Málaga (UMA) y Cádiz (UCA), pertenecientes a los grupos de investigación TEP933 (Ingeniería de Fabricación, UMA) y TEP027 (Ingeniería y Tecnologías de Materiales y Fabricación, UCA). Una de las líneas de investigación, común a ambos grupos, se centra en el mecanizado de aleaciones ligeras de uso en la industria aeroespacial, así como en el análisis y evaluación del rendimiento de procesos de mecanizado [2].

El Grupo TEP-933 “Ingeniería de Fabricación de la Universidad de Málaga” entre sus diversas líneas de investigación, incluye una actividad investigadora que se centra en la optimización de parámetros de procesos de fabricación especialmente aplicados a aleaciones ligeras de uso aeronáutico. Actualmente, motivaciones económicas y medioambientales hacen del mecanizado en seco, realizado en ausencia de fluidos de corte, uno de los procesos con mayor interés, a pesar de que sus agresivas condiciones de corte pueden afectar a la integridad estructural de las piezas mecanizadas [2].

La vibración producida por la interacción pieza/herramienta de corte y la viruta generada puede capturarse mediante el empleo de acelerómetros o piezosensores así como a distancia mediante el empleo de vibrómetros láser. La señal de vibración se puede utilizar para detectar el desgaste y rotura de la herramienta, el tipo de formación de la viruta, el perfil superficial de la pieza (rugosidad superficial) y otras anomalías del proceso con la adopción de algoritmos que aislen de otras fuentes de vibración los obtenidos mediante el proceso de mecanizado.

Recientemente se ha adquirido un sistema de monitorización para medida de vibración que puede resultar adecuado para el análisis de esta variable en mecanizados mediante torneado sostenible (en seco) de aleaciones de titanio, con los que se pretende ampliar el estudio de la influencia de los parámetros de corte en las propiedades macro y microgeométricas de las piezas mecanizadas [1].

El vibrómetro láser Modelo IVS-500 de la marca POLYTEC se empleará para la captación de estas señales oscilatorias que se producen durante el proceso, lo que puede resultar factible dado que este equipo realiza el proceso de medición sin contacto. Este equipo se complementará a una máquina-herramienta de control numérico junto con otros sistemas de captación de señales de diversa índole y se integrará en un sistema amplio de monitorización de procesos de mecanizado por arranque de viruta.

A través de este Trabajo Fin de Grado se pretende realizar un análisis de las especificaciones técnicas del vibrómetro láser, identificar sus parámetros principales y proceder a su instalación dentro del conjunto en el que se va a emplear. Para la puesta a punto se desarrollará su procedimiento de verificación, así como un manual de uso tanto del equipo como del software asociado al mismo, que incluyan las principales aplicaciones, una selección rápida y optimizada de los parámetros, así como los protocolos de seguridad necesarios.

## **1.2. Objetivos**

El principal objetivo a través de este Trabajo Fin de Grado es analizar las características técnicas del vibrómetro láser, identificando sus principales parámetros y realizar su instalación, desarrollando una metodología para su puesta a punto y verificación. Finalmente, se pretende desarrollar un manual de uso del equipo y del software asociado que permita su posterior utilización por miembros del grupo de investigación.

En concreto, se pretende realizar un análisis detallado del vibrómetro láser, estudiando el funcionamiento físico del aparato, su entorno y mostrando algunos ejemplos de aplicaciones, de las muchísimas que tiene.

Por otro lado, se pretende estudiar el software asociado al vibrómetro, su configuración y parámetros más importantes, para poder realizar el consiguiente análisis de los datos obtenidos.

Finalmente, se pretende llevar a cabo un procedimiento de verificación del funcionamiento del vibrómetro, que sea rápido y sencillo, usando un dispositivo móvil. Se pretende que dicho procedimiento de verificación, además de sencillo, esté al alcance de cualquier persona y en cualquier momento.

### **1.3. Estructura de la memoria**

Este Trabajo de Fin de Grado ha sido estructurado en 6 capítulos.

En el capítulo 1, se proporciona una visión general de la importancia que tiene la monitorización de los procesos de mecanizado, introduciendo de forma superficial conceptos como la vibración, torneado, mecanizado en seco... que posteriormente se explicarán con detalle.

En el capítulo 2, es el apartado más teórico donde se explican todos los conceptos necesarios para comprender las vibraciones, sus parámetros, la influencia que tienen las fuerzas de corte en el mecanizado en estas. Los diferentes instrumentos más usados para captar estas vibraciones, además del funcionamiento teórico del vibrómetro láser.

En el capítulo 3, donde se desarrolla la metodología experimental, se explica el funcionamiento y las características de los instrumentos utilizados para captar las vibraciones durante un proceso de mecanizado. Se muestra un manual paso a paso para la configuración del equipo y del software utilizado, dejando el equipo listo para el comienzo del ensayo que se desee estudiar. Finalmente, en este capítulo se realiza una validación del equipo para comprobar su buen funcionamiento y que los datos obtenidos son correctos.

En el capítulo 4 se muestran los diferentes ensayos que se han realizado para poner a prueba el correcto funcionamiento de este, analizando los resultados obtenidos y confirmando la veracidad de los datos gracias a una previa validación.

En el capítulo 5 se exponen las conclusiones obtenidas a lo largo del presente trabajo.

En el capítulo 6 y último, se recogen las referencias bibliográficas que se han consultado para elaborar este Trabajo de Fin de Grado.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS Y MEDICIÓN DE VIBRACIONES EN PROCESOS DE MECANIZADO.

### 2.1. Introducción

La vibración en el mecanizado de una pieza se produce por la interacción que existe entre dicha pieza y la herramienta de corte, la cual, también depende de algunos factores que se estudiarán en apartados siguientes. Esta vibración se puede captar gracias al uso de acelerómetros o, con el aparato en el que se centra este Trabajo de Fin de Grado, un vibrómetro láser, cuya gran ventaja es la medición a distancia. Esta vibración o vibraciones producidas en el proceso de mecanizado son útiles para detectar o predecir posibles roturas o fallas en la herramienta o pieza, afectando al mecanizado en general, al resultado superficial del corte de la pieza y, por consiguiente, en el caso de una industria, alterando los tiempos de producción estipulados.



**Figura 1. Obtención y análisis de vibraciones en un proceso de mecanizado con torno.**

Para comenzar a comprender la importancia que supone la vibración en el mecanizado, se puede definir el concepto de vibración como el movimiento oscilatorio de un cuerpo respecto a su posición de equilibrio o reposo. Los movimientos vibratorios aparecen con gran frecuencia en la naturaleza y ocurren en campos muy diversos de la física y la ingeniería [3].

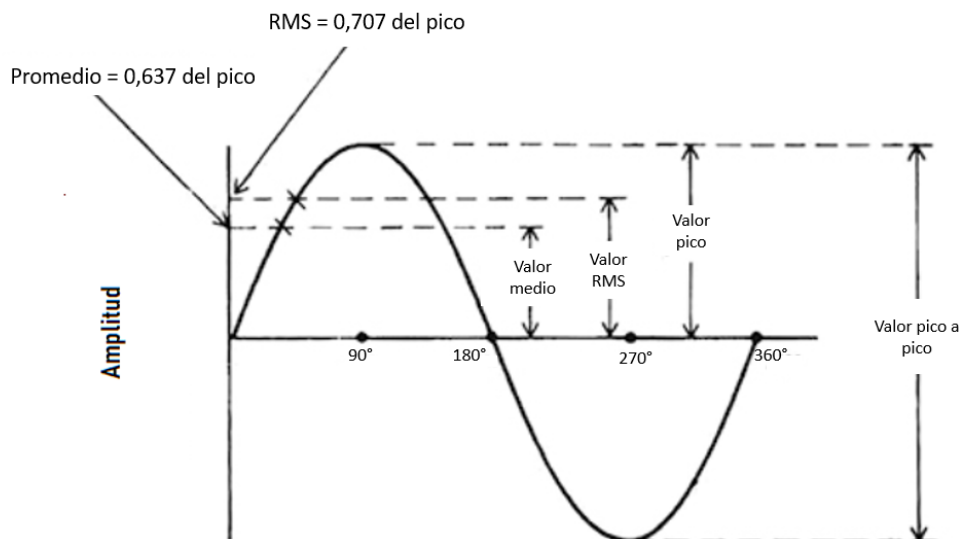
#### 2.1.1. Variables de análisis de una vibración

Después de mencionar el concepto de vibración, es conveniente nombrar algunas variables que son fundamentales para comprender mejor éste fenómeno y que se deberán tener en cuenta a la hora de analizar vibraciones [4].

Una vibración se caracteriza por su periodo, frecuencia y amplitud:

- El periodo es el tiempo que tarda la masa oscilante para completar un ciclo, es decir, para ir y regresar al mismo punto. Generalmente se mide en segundos.
- La frecuencia, es la inversa del periodo, es el número de ciclos (oscilaciones) que realiza el sistema o partícula en un segundo. Está representado por la letra “f” y la unidad de medida es el hercio, Hz.

- La amplitud de la vibración es la distancia entre un máximo y un mínimo del sistema alrededor de la posición de referencia. Generalmente se mide en valores pico-pico para desplazamiento, y valores cero-pico y RMS para velocidad y aceleración (Figura 2):
  - El valor pico es el valor máximo, se aplica tanto al pico positivo como al negativo.
  - El valor pico a pico es el doble del valor pico cuando los picos positivos y negativos son simétricos.
  - El valor promedio es el promedio aritmético de todos los valores de una onda senoidal durante medio ciclo. El medio ciclo se utiliza para obtener el promedio porque el valor promedio durante un ciclo completo es cero.
  - RMS, raíz cuadrática media o valor efectivo es 0.707 veces el valor pico [5].

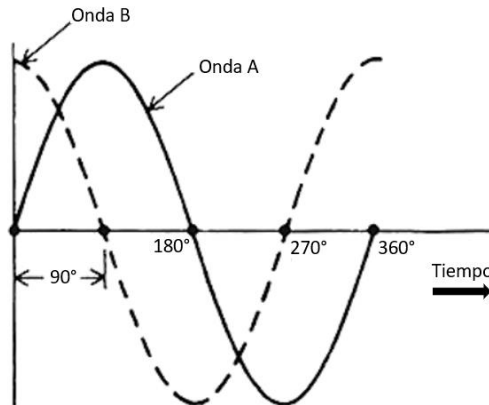


**Figura 2. Conceptos de análisis de una señal. Imagen adaptada de [5].**

La velocidad indica qué tan rápido que el cuerpo está vibrando. Se puede decir que la velocidad es máxima cuando el cuerpo pasa por su punto de reposo o punto de referencia (desplazamiento cero) y es cero cuando el cuerpo alcanza el punto más alto o bajo de su máximo desplazamiento (en un movimiento armónico simple). Generalmente, se mide en mm/s. Es la derivada del desplazamiento con respecto al tiempo.

La aceleración es la derivada de la velocidad con respecto al tiempo.

La fase, en vibraciones, es una medida de tiempo entre la “separación” de dos señales, como se puede ver en la Figura 3, la cual puede ser relativa o absoluta. Suele ser una medida en grados [4].



**Figura 3. Concepto de fase. Dos señales desfasadas. Imagen adaptada de [6].**

### 2.1.2. Tipos de vibraciones

Las vibraciones pueden clasificarse como libres o forzadas y ambas pueden amortiguarse.

- Vibración libre, es aquella que realiza un cuerpo cuando se separa de su posición de equilibrio y se abandona libremente. A la frecuencia correspondiente a la vibración libre del sistema, se le llama frecuencia natural.
- Vibración forzada, es aquella que realiza un cuerpo cuando su movimiento es forzado por una perturbación externa. A la frecuencia de este tipo de vibración se le llama frecuencia forzada.

Las vibraciones amortiguadas son aquellas en las que cada ciclo el cuerpo va perdiendo energía y la amplitud de la oscilación va disminuyendo [3].

Una vibración puede ser simple, compuesta o aleatoria.

- Vibración simple, se trata del concepto clásico de vibración ya antes descrito.
- Vibración compuesta, es el sumatorio de varias señales sinusoidales simples que generan cada uno de los componentes que se encuentran en la máquina.
- Vibración aleatoria, es un tipo de vibración que no cumple con patrones que se repiten constantemente o es muy difícil saber dónde comienza un ciclo y donde acaba. Estas vibraciones están asociadas generalmente a problemas de lubricación y contacto metal-metal. Este tipo de vibraciones es mejor analizarlas en el espectro y no en la onda con respecto al tiempo. Dentro de las vibraciones aleatorias, se encuentran los golpeteos intermitentes, que son golpes que generan una señal repetitiva, este tipo de señales tienden a “morir” debido a la amortiguación del medio [4].

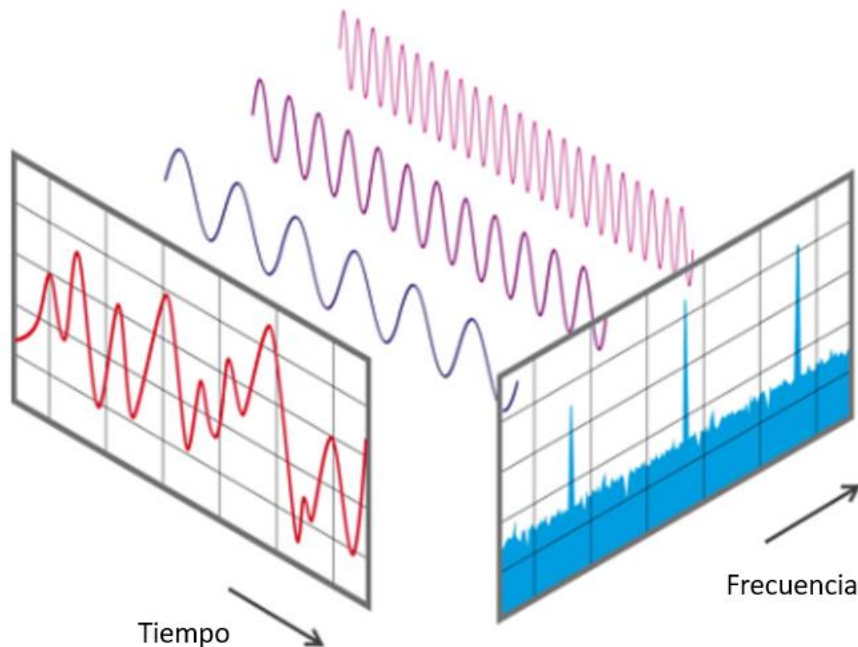
### 2.1.3. Frecuencia natural y resonancia

La frecuencia natural, como ya se ha explicado anteriormente, es la frecuencia a la que un objeto vibrará después de golpearlo. A partir de este concepto, aparece el concepto de resonancia, que es un fenómeno que amplifica la vibración del sistema producido cuando la frecuencia natural es excitada por una fuerza externa.

### 2.1.4. Transformada Rápida de Fourier

Hasta ahora sólo se han visto vibraciones en el dominio del tiempo, el problema es que, a la hora de analizar estas señales, vienen cargadas de información en forma muy compleja, por lo que en general es muy difícil estudiarlas. Para facilitar el estudio de las vibraciones, existe otra forma de

analizar las señales en función de la amplitud y la frecuencia, esta gráfica es conocida como espectro. Entonces, lo que hace un analizador de espectros que trabaja con la Transformada Rápida de Fourier (FFT, de sus siglas en inglés) es capturar una señal desde una máquina, luego calcula todas las series de señales sinusoidales que contiene la señal compleja y, por último, las muestra en forma individual en el eje x de la frecuencia (Figura 4) [4].



**Figura 4. Transformada Rápida de Fourier (FFT). Imagen adaptada de [7] .**

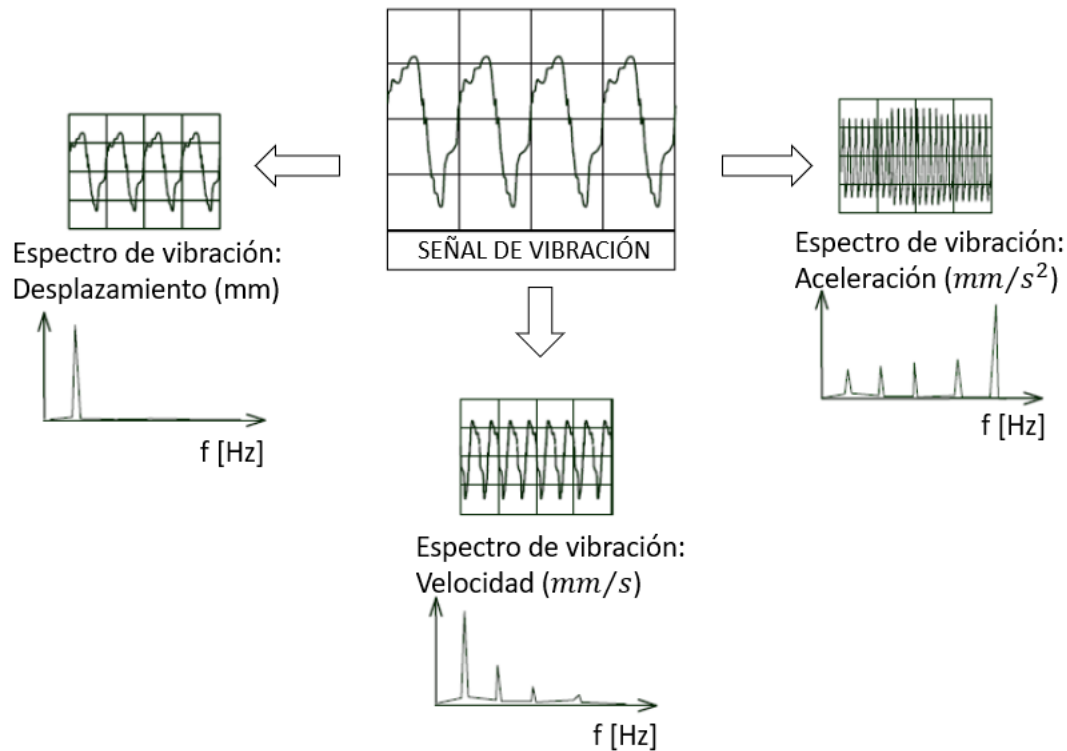
### 2.1.5. Desplazamiento, velocidad y aceleración de una vibración

Existen diferentes variables para medir la amplitud de vibración de un espectro. Para vibraciones mecánicas lo más común es medirlas en unidades de desplazamiento, velocidad y aceleración (Figura 5). Cada una tiene sus ventajas con respecto a las otras:

La medida en desplazamiento (mm o  $\mu\text{m}$ ) es importante para reconocer patrones que están a muy baja frecuencia. Los picos de vibración que están al comienzo del espectro son mejor resaltados.

La medida en velocidad (mm/s) permite reconocer la mayoría de los patrones de fallas primarias y de otros componentes cuando están en un estado evidente, como por ejemplo desbalanceo, desalineación, holgura mecánica, fricciones abrasivas, resonancias, pulsaciones, engranajes de pocos dientes, sistema de poleas, aspas de bombas y ventiladores. Esta variable de velocidad es importante para resaltar picos de bajas y medias frecuencias.

La medida en aceleración ( $g$  o  $\text{mm}/\text{s}^2$ ) permite reconocer patrones asociados a contactos metal-metal y fricciones abrasivas, problemas en engranajes, cavitación, entre otros. Esta variable resalta picos de vibración de medias y altas frecuencias, y es muy utilizada para la detección prematura de fallas en chumaceras y rodamientos, y otros componentes como engranajes [4].



**Figura 5. Ejemplo de una señal analizada en base a cada variable. Imagen adaptada de [4].**

Estas tres curvas que se muestran arriba proporcionan la misma información, pero el acento se ha cambiado. Como se puede observar, la curva de desplazamiento es más difícil de leer en las frecuencias más altas. La curva de velocidad es la más uniforme en nivel sobre frecuencia. Eso es típico para la mayoría de la maquinaria rotativa, pero en algunos casos, las curvas de desplazamiento y aceleración serán las más uniformes. Es una buena idea seleccionar las unidades de tal manera que se obtenga la curva más plana. Eso proporciona la mayor cantidad de información visual al observador. El parámetro de vibración que se usa más comúnmente en trabajos de diagnóstico de maquinaria es la velocidad [8].

## 2.2. Concepto de vibración dentro del mecanizado

Las vibraciones, como ya se ha explicado en el apartado anterior, son un fenómeno mecánico en el que se producen oscilaciones alrededor de un punto de equilibrio.

A veces la vibración es deseable. Sin embargo, la vibración desperdicia energía mientras crea una deformación y ruido no deseados. En el mecanizado, la máquina-herramienta, las piezas de trabajo y las herramientas no son completamente rígidas, y también, las fuerzas de corte pueden hacerlas vibrar.

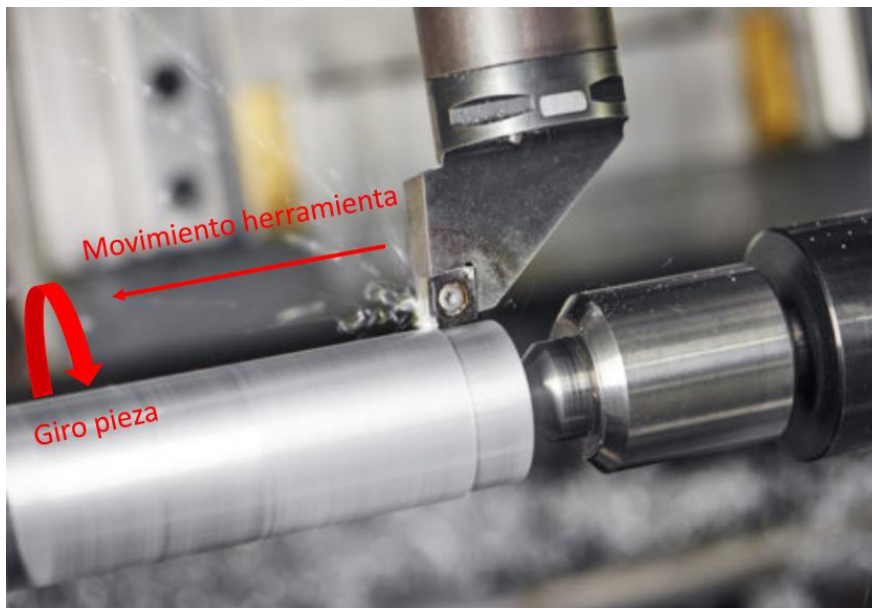
Algunas consecuencias negativas de las vibraciones en el mecanizado pueden ser:

- Mayor desgaste en los filos de corte que pueden poner en peligro el trascurso correcto del mecanizado.
- Los acabados superficiales deteriorados y piezas desechadas, poniendo en peligro el sistema de mecanizado y puede crear desajustes con los plazos de entregas de las piezas.
- Teniendo en cuenta los dos puntos anteriores, se puede decir que las vibraciones cuestan dinero.

- Las vibraciones también requieren energía, por lo que se desperdicia energía con ellas [9].

Dentro de los tipos de mecanizado, se va a estudiar, en particular, las vibraciones producidas en el proceso de torneado.

El torneado es un proceso de mecanizado utilizado para hacer piezas cilíndricas, en el cual la herramienta de corte se mueve de forma lineal mientras la pieza de trabajo gira (Figura 6).



**Figura 6. Proceso de torneado. Imagen adaptada de [10].**

Un factor muy ligado a las vibraciones producidas en el mecanizado, son las fuerzas de corte. Por lo que será necesario tener un concepto básico de la geometría de la herramienta de corte y su influencia en el proceso de corte y, de los parámetros de corte en el torneado.

### **2.2.1. Parámetros de corte en el torneado**

Como se ha mencionado anteriormente, el torneado es un proceso de mecanizado mediante máquinas herramientas que generan piezas de revolución con herramientas de un solo punto de corte. Se puede partir de piezas de revolución en bruto o mecanizar las creces de mecanizado de piezas procedentes de otros tipos de procesos de fabricación [11].

- El movimiento fundamental de corte es rotativo y lo realiza la propia pieza.
- El movimiento de avance es lineal, realizado por la herramienta.

Los parámetros de corte son [11]:

- Velocidad del husillo principal ( $N$ ) [rev/min]: Es la velocidad a la que gira la pieza.
- Velocidad de corte  $V_c$  o  $V$  [m/min]: Velocidad a la que el filo de corte mecaniza la superficie de la pieza.
  - Es constante siempre y cuando se mantengan constantes el diámetro a mecanizar y las revoluciones del husillo.
  - Si es demasiado pequeña, no se generan las fuerzas suficientes para que se produzca el corte.

$$V_c = \pi \cdot D \cdot N \quad (1)$$

- Velocidad de avance  $V_f$  [m/min]: Es el desplazamiento axial de la herramienta.
- Avance  $f$  o  $a$  [mm/rev]: Es una manera de medir el avance, determinando el desplazamiento lineal de la herramienta por cada vuelta del husillo principal. Es un factor clave a la hora de determinar el acabado superficial de la pieza y la geometría de la viruta.
- Profundidad de corte  $a_p$  o  $p$  [mm]: Es la diferencia entre la superficie sin mecanizar y una vez mecanizada. Se mide en milímetros y en ángulo recto (90°) respecto a la dirección del avance.

$$V_f = a \cdot N \quad (2)$$

Otros parámetros son [11]:

Algunos mencionados anteriormente como el ángulo de posición del filo principal ( $\kappa$ ), el ángulo de posición del filo secundario ( $\kappa'$ ), ángulo de la punta de la herramienta ( $\epsilon$ ) y otros como:

- Espesor de viruta o de corte,  $a_c$  [mm]:

$$a_c = f \cdot \text{sen } \kappa \quad (3)$$

- Ancho de viruta,  $a_w$  [mm]:

$$a_w = \frac{a_p}{\text{sen } \kappa} \quad (4)$$

- Sección de viruta,  $S_c$  [mm<sup>2</sup>]:

$$S_c = a_c \cdot a_w = f \cdot a_p \quad (5)$$

- Fuerza de corte,  $F_c$  [N]:

$$F_c = p_s \cdot S_c \quad (6)$$

Siendo  $p_s$ , la energía específica de corte [N/mm<sup>2</sup>], que depende del material de la pieza y del espesor de corte  $a_c$ .

- Potencia de corte,  $P_c$  [W]:

$$P_c = F_c \cdot V_c \quad (7)$$

Siendo la unidad de la velocidad de corte en [m/s].

Algunos aspectos que se deben tener en cuenta por la influencia que tienen sobre los parámetros de corte son, por ejemplo [11]:

- Que el material de la herramienta influye en la velocidad de corte  $V_c$ .
- La geometría de la herramienta influye en:
  - El avance  $f$ .
  - La profundidad de pasada  $a_p$ .

### 2.2.2. Fuerzas de corte

Concretamente, en el torneado de una pieza cilíndrica, la herramienta, al cortar el material, ejerce una fuerza sobre la pieza, la cual tiene una orientación en el espacio que puede ser descompuesta en tres direcciones ortogonales coincidentes con las direcciones de los movimientos fundamentales del corte: velocidad de corte, avance y profundidad de corte [1,10].

- Fuerza de corte ( $F_c$ ): Es la componente tangencial, la más importante en magnitud, tomándose generalmente como fuerza de corte.
- Fuerza de avance ( $F_a$ ): Es la componente, según la pieza, longitudinal, que sirve para vencer la resistencia del material al movimiento de avance de la herramienta.
- Fuerza radial ( $F_p$ ): Es la componente hacia el interior de la pieza, según el radio de esta. Es la fuerza que contrarresta la reacción del material a ser penetrado, manteniéndolo firmemente en contacto con la herramienta.

La fuerza total ejercida por la herramienta sobre el material se puede expresar como (Figura 7) [1,10]:

$$\vec{F} = \vec{F}_c + \vec{F}_a + \vec{F}_p \quad (8)$$

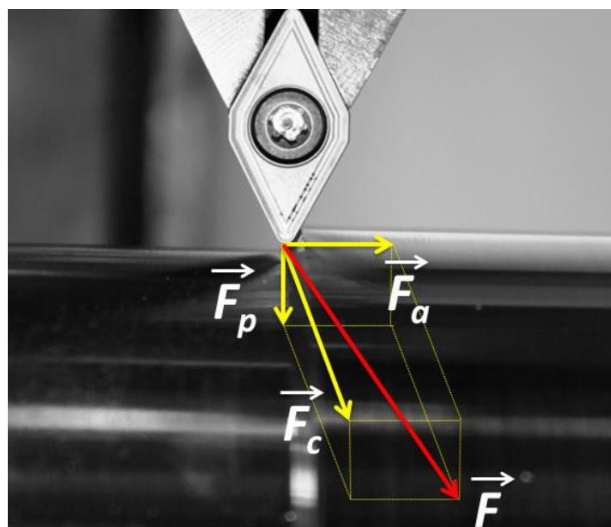


Figura 7. Fuerza total de corte descompuesta en tres fuerzas:  $F_c, F_a, F_p$  [1].

De la misma forma que las fuerzas de corte, podemos expresar los vectores velocidad como[1]:

$$\vec{V} = \vec{v}_c + \vec{v}_a + \vec{v}_p \quad (9)$$

Como se ha mencionado antes,  $F_c$  es la componente de la fuerza de corte de mayor magnitud. Lo mismo ocurre con el vector velocidad, donde los valores  $v_a$  y  $v_p$  suelen ser despreciables frente a  $v_c$ . Por eso, se suele equiparar la magnitud de la fuerza total con la de la fuerza de corte ( $F = F_c$ ) y la magnitud de la velocidad total con la de la velocidad de corte ( $v = v_c$ ). Por ello, de forma habitual se suele expresar, como ya se mencionó en el apartado anterior, la potencia de corte en la forma [1]:

$$P = F_c \cdot v \quad (10)$$

### 2.2.3. Vibraciones en el mecanizado

La vibración libre se produce cuando una fuerza inicial activa la vibración en un sistema mecánico, que luego vibra libremente. [9]

La vibración forzada se produce cuando se le aplica a un sistema mecánico una perturbación que varía en el tiempo (carga, desplazamiento o velocidad). En un fenómeno llamado resonancia, la amplitud de la vibración puede llegar a ser muy alta cuando la frecuencia de forzamiento se acerca a la frecuencia natural del sistema.[9]

La vibración por resonancia en el mecanizado puede llevar a un fallo sistémico, por tanto, el análisis de vibraciones debe predecir cuándo puede ocurrir este tipo de resonancia y determinar los pasos a seguir para prevenirla. Por ejemplo, un amortiguamiento adicional puede reducir bastante la magnitud de la vibración, como también, cambiar la rigidez del sistema para alejar la frecuencia natural de la frecuencia de resonancia (frecuencia de forzamiento). En caso de que el sistema no pueda cambiar, puede que la frecuencia de forzamiento cambie, por ejemplo, cambiando la velocidad de la máquina que genera la fuerza [9].

### 2.2.4. Sistemas lineales y no lineales

El término "lineal" se refiere a las características de un sistema que puede tener señales de entrada y de salida. Un sistema es cualquier aparato o estructura que puede aceptar una señal de entrada o estímulo en alguna forma y producir una señal de salida o respuesta. Ejemplos de sistemas son grabadoras y amplificadoras, que funcionan con señales eléctricas y estructuras mecánicas en las que las señales de entrada son fuerzas de vibración y las señales de salida son desplazamientos, velocidades y aceleraciones de vibraciones.

Se dice que un sistema es lineal, cuando cumple con los dos criterios siguientes:

- Si una entrada X al sistema produce una salida X, entonces una entrada 2X producirá una salida 2X. En otras palabras, la magnitud de la salida del sistema es proporcional a la magnitud de la entrada del sistema.
- Si una entrada X produce una salida X, y una entrada Y produce una salida Y, entonces una entrada X+Y producirá X+Y. En otras palabras, el sistema maneja dos entradas simultáneas de manera independiente y esas no interactúan en el sistema. Esos criterios implican el hecho que un sistema lineal no producirá frecuencias de salida, que no estén presentes en la entrada.

Se puede observar que no hay nada en estos criterios que diga que la salida del sistema es la misma que la entrada, o que la salida se parece a la entrada. Por ejemplo, la entrada podría ser una corriente eléctrica y la salida podría ser una temperatura. En el caso de estructuras mecánicas como máquinas consideraremos la entrada como una fuerza vibratoria y la salida como la vibración medida [8].

### **2.2.5. Relación de las fuerzas de corte en los fenómenos de vibración**

Las mismas fuerzas que cortan metal también actúan sobre la herramienta de corte. Estas fuerzas deforman la herramienta de corte y pueden provocar vibraciones. Las fuerzas de corte y la falta de resistencia de la herramienta provocan vibraciones en el corte de metal.

La naturaleza dinámica de las fuerzas de corte puede llevar a la vibración por resonancia. La probabilidad de que este fenómeno se produzca aumenta con herramientas de corte o piezas de trabajo delgadas, fuerzas de corte muy altas o materiales a mecanizar que carecen de capacidad de amortiguación, métodos de corte o geometría incorrectos de la herramienta. La vibración por resonancia puede ocurrir cuando la frecuencia con la que la fuerza de corte impacta en el filo de corte es igual a la frecuencia de la herramienta de corte. Esta situación se puede dar cuando se cambian las condiciones de corte, con la irregularidad en la estructura del material o con la fragmentación intermitente y fuerte de la viruta.

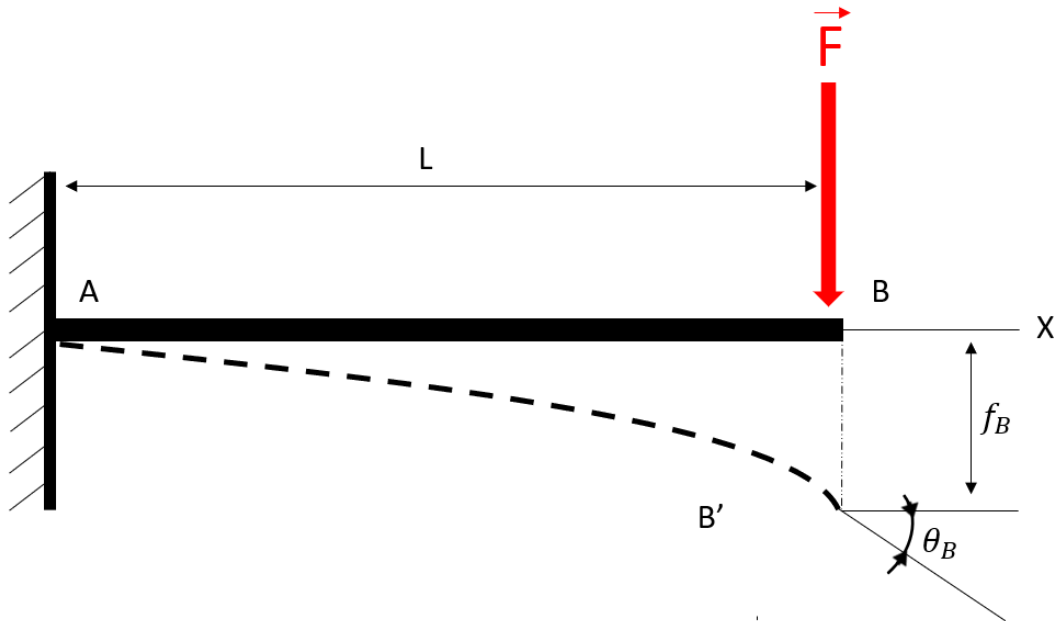
Realmente, la vibración no es un problema en sí, solo que, en algunas situaciones, la vibración puede poner en peligro la calidad del proceso por el desgaste incontrolado del filo de corte o un acabado superficial defectuoso de la pieza mecanizada. En estos casos, se necesita reducir la vibración, y se puede lograr modificando las condiciones de corte o seleccionando herramientas modificadas [9].

### **2.2.6. La influencia de la estabilidad de la máquina-herramienta sobre la vibración**

Para realizar cualquier análisis de vibraciones y los peligros que pueden existir durante el mecanizado, se debe tener en cuenta la estabilidad de la máquina herramienta. La estabilidad que puede proporcionar una máquina herramienta no es ilimitada y depende mucho de la velocidad de rotación del husillo, conforme aumenta la velocidad de este, disminuye la estabilidad de la herramienta.

En general, cuanto más altas sean las revoluciones por minuto (rev/min) a las que funciona una máquina herramienta, mayor será el riesgo de vibración. Sin embargo, a ciertas velocidades, la estabilidad aumenta. Para evitar vibraciones, sobre todo durante el mecanizado a altas revoluciones por minuto, se deben seleccionar cuidadosamente las velocidades.

Otro aspecto para tener en cuenta es la flexión de un componente cilíndrico que, en el torneado, en algunos casos, se encuentra sujeto en un solo lado. Explicándolo con términos sencillos, cuanto mayor sea la flexión o la deflexión, mayor será el riesgo de vibración perjudicial, por lo que, reduciendo la flexión o deflexión de la herramienta, se reduce el riesgo de vibración [9].



**Figura 8. Relación entre flexión, fuerza y cotas de un componente cilíndrico en voladizo (sujeto de un solo lado).**

$$f_B = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} = \frac{F \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot \frac{\pi \cdot D^4}{64}} \quad (11)$$

Para disminuir la flexión o deflexión y con ello, la vibración, se tienen las siguientes opciones [9]:

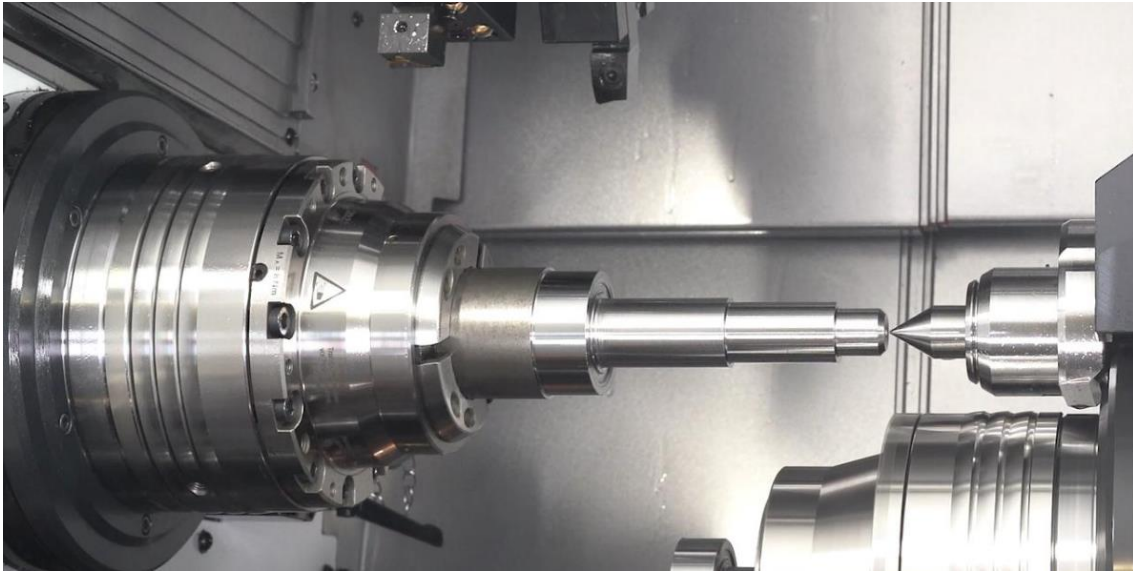
- Reducir las fuerzas de corte o cambiar la dirección en la que las fuerzas de corte actúan.
- Hacer la herramienta más robusta, con una mayor resistencia a la flexión. Con la ecuación 11, se puede ver que, si se dobla la longitud del voladizo Figura 8. Relación entre flexión, fuerza y cotas de un componente cilíndrico en voladizo (sujeto de un solo lado), aumenta la flexión, mientras que, si se dobla el diámetro, se divide la flexión. En conclusión, se puede decir que las herramientas más cortas y gruesas tienen menos riesgo de vibración.
- Utilizar un material de herramienta más rígido. El módulo de elasticidad (E) es un elemento primario.

Cuando el riesgo de vibración es elevado, el diámetro de la herramienta es más importante.

Algunos consejos prácticos para controlar y reducir la vibración en el mecanizado están directamente relacionados con cambiar la magnitud o dirección en la que las fuerzas de corte actúan sobre la herramienta de corte [9]:

- Utilizar un ángulo de filo de corte cercano a 90°.
- Utilizar un radio de punta más pequeño y/o borde de corte más afilado.
- Utilizar un mejor sistema de sujeción de herramientas.
- Cambiar la velocidad de corte.
- Reducir la profundidad de corte y reducir el avance.

En la gran mayoría de los casos, se trabaja en el torno con un contrapunto (Figura 9), esto permite mecanizar piezas largas eliminando grandes vibraciones. En este caso podríamos asemejar la pieza a una viga empotrada-apoyada para el posible estudio de la flexión de la pieza con la aplicación de la fuerza de corte de la herramienta. En el caso de la sujeción de piezas demasiado largas, como podemos ver en la Figura 10, se usan lunetas como apoyos intermedios, con el objetivo de que no flecten o pandeen por la presión ejercida por la herramienta.



**Figura 9. Contrapunto para piezas largas en el mecanizado con torno [12].**



**Figura 10. Contrapunto y luneta como sistemas de sujeción para piezas demasiado largas o delgadas. La imagen muestra una luneta fija [13].**

### **2.3. Técnicas de medición de vibraciones en el proceso del mecanizado**

El hecho de medir vibraciones tiene como objetivo el análisis de estas, este proceso tiene como fin la medición de los niveles y frecuencias de vibración de la maquinaria industrial, y la utilización de esa información para determinar la “salud” de la máquina y sus componentes.

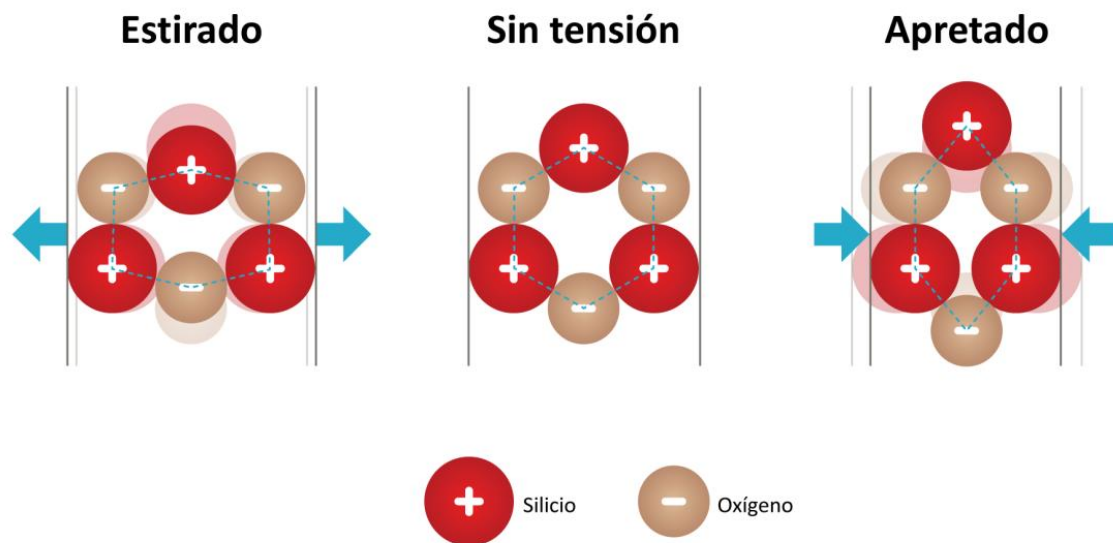
El análisis industrial de vibraciones se usa para identificar, predecir y prevenir fallas en las máquinas rotativas. La implementación de esta tecnología mejorará la fiabilidad de las máquinas, consiguiendo una mejor eficiencia de la máquina y una reducción del tiempo de inactividad, eliminando las fallas mecánicas o eléctricas. El mantenimiento predictivo tiene la función de

monitorear el rendimiento y la condición del equipo cuando trabaja normalmente a diario en un proceso productivo para reducir la probabilidad de fallas.

La práctica del análisis de vibraciones requiere de la medición y el análisis de la rotación. Para ello se utilizan una serie de diferentes sensores de vibración. Existen diversos tipos de herramientas para medir vibraciones que se pueden seleccionar de acuerdo con ciertos criterios como, por ejemplo, el tipo de análisis, campos de aplicación, rango de frecuencias y velocidad. El sensor más común y utilizado en la industria es el acelerómetro [14].

Antes de hablar sobre los diferentes instrumentos o técnicas para medir vibraciones, es conveniente hacer una pequeña introducción sobre el concepto de un material piezoeléctrico y su uso en los transductores, como los acelerómetros:

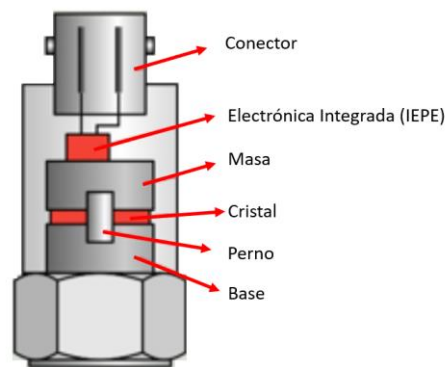
Los materiales piezoeléctricos pueden convertir la tensión mecánica en electricidad, y la electricidad en vibraciones mecánicas. El cuarzo es un ejemplo de un cristal piezoeléctrico natural. Los cristales de cuarzo están hechos de átomos de silicio y oxígeno en un patrón repetitivo. En el cuarzo, los átomos de silicio tienen una carga positiva y los átomos de oxígeno tienen una carga negativa. Normalmente, cuando el cristal no está bajo ningún tipo de estrés externo, las cargas se dispersan uniformemente en las moléculas a través del cristal. Pero cuando el cuarzo se estira o exprime, el orden de los átomos cambia ligeramente (Figura 11). Este cambio causa que las cargas negativas se acumulen en un lado y las cargas positivas se acumulen en el lado opuesto. Cuando haces un circuito que conecta un extremo del cristal con el otro, puedes utilizar esta diferencia potencial para producir corriente. Entre más aprietas el cristal más fuerte será la corriente eléctrica. Por el contrario, enviar una corriente eléctrica a través del cristal cambia su forma [15].



**Figura 11. Efecto piezoeléctrico [15].**

Después de conocer brevemente en qué consiste el efecto piezoeléctrico, su uso en los transductores piezoeléctricos es el siguiente, el funcionamiento consiste en generar una tensión eléctrica al recibir una presión sobre el cristal de su interior (Figura 12). Esa tensión es proporcional a la aceleración. Estos transductores son muy usados porque son capaces de captar señales con mucha precisión, señales entre 1 y 15.000 Hz. Existen transductores especializados en captar vibraciones más altas o bajas del rango general.

Al comprimir el material piezoeléctrico este genera una carga, esta carga eléctrica se transfiere al sensor electrónico donde la carga se convierte en voltaje y el voltaje es transferido al equipo analizador de vibraciones a través del sensor y un cable. En resumen, la vibración del equipo estira y comprime el sensor piezoeléctrico creando así la señal de voltaje en la salida del sensor [15].



**Figura 12. Componentes de un transductor piezoeléctrico. Imagen adaptada de [16].**

La vibración es un simple movimiento armónico que puede ser medida por los siguientes instrumentos de uso común en la industria [17]:

### 2.3.1. Instrumentos de medida de vibraciones

#### 2.3.1.1 Acelerómetros

Son pequeños y fáciles de instalar (Figura 13), tienen una gran frecuencia (1-10.000 Hz), pero requieren la integración de herramientas de medición de velocidad para medir la aceleración y son susceptibles a los golpes y a los requisitos de potencia. Los acelerómetros están montados en una carcasa con un perno permanente o imán portátil para sujetarnos en su lugar.

Estos miden la vibración de la rotación y emiten un voltaje o una corriente proporcional a la vibración y relativa a una “g” (Unidad de atracción gravitacional). Esta señal también puede ser integrada para proporcionar una medición de salida en base a la velocidad (mm/s), que son los sensores de velocidad piezoeléctricos que se verán más adelante.

Es muy importante elegir la opción correcta de acelerómetro, cable, conector y montaje para cada aplicación. Esto proporcionará mediciones de calidad y datos de vibración precisos para la identificación de fallos en máquinas rotativas.

Un acelerómetro piezoeléctrico es aquel que se basa en el efecto piezoeléctrico, que se explicará más adelante, de ciertos materiales para medir cambios dinámicos en variables mecánicas (aceleración, vibración, etc.) [17].

Al igual que con todos los transductores, los piezoeléctricos convierten una forma de energía en otra y proporcionan una señal eléctrica en respuesta a una cantidad, propiedad o condición que se está midiendo. Usando el método de detección general en el que se basan todos los acelerómetros, la aceleración actúa sobre una masa sísmica que está restringida por un resorte o suspendida en una viga en voladizo, y convierte una fuerza física en una señal eléctrica. Antes de que la aceleración se pueda convertir en una cantidad eléctrica, primero debe convertirse en una fuerza o en un desplazamiento [18].



**Figura 13. Acelerómetro piezoeléctrico [16].**

### **2.3.1.2. Sensores de proximidad o proxímetros**

Los sensores de proximidad o proxímetros se utilizan en la monitorización de vibraciones de máquinas para medir la variación de la distancia entre un eje y su cojinete de apoyo. Esto es común en grandes turbinas de vapor, compresores y motores que utilizan cojinetes tipo manguito[17]. El sensor de proximidad, también llamado transductor de desplazamiento está basado en un principio magnético. Es necesario saber que el transductor mide el desplazamiento relativo entre el rodamiento y el gorrón, y no el nivel de vibración total. Por lo general, se suele instalar en grandes máquinas con rodamientos con gorriones, donde su función es la de detectar fallas en los rodamientos y prevenir una falla catastrófica [8].

### **2.3.1.3. Sensores de desplazamiento sin contacto**

Este transductor está compuesto por un sensor, un cable de extensión, un oscilador demodulador y una fuente de poder. Hay que destacar que el demodulador es un aparato que transforma una señal analógica en eléctrica.

El sensor es una bobina eléctrica cubierta por un material estable como la fibra de vidrio. El oscilador demodulador proporciona al sensor un voltaje de alta frecuencia. Al pasar por la bobina, produce un campo magnético variable que induce corrientes parásitas en la superficie a medir. Lo anterior se cumple siempre y cuando sea un metal conductor. En términos más sencillos, la superficie se comporta como el secundario de un transformador al absorber energía del campo magnético de la bobina. Como resultado, se genera una modulación del voltaje, entonces el demodulador, demodula el voltaje y entrega como salida una señal.

Estas corrientes parásitas de las que se habla, se llaman corrientes de Foucault, que también son llamadas en la literatura científica anglosajona Eddy Currents, son corrientes inducidas en un medio conductor en presencia de un flujo de campo magnético variable con el tiempo.

Los sensores de desplazamiento son dispositivos que tienen un rango de frecuencia limitado (0-1000 Hz) y son susceptibles a descargas eléctricas o mecánicas [17,19,21].

### **2.3.1.4. Sensor de desplazamiento relativo con contacto**

Estos sensores se consideran una forma de medición antigua y son incapaces de medir vibraciones por encima de los 200 Hz. Sin embargo, son útiles para casos específicos tales como [20]:

- Mediciones sobre ejes con superficies no conductoras
- Mediciones de vibraciones de un eje cuando la máquina carece de sensores de desplazamiento sin contacto.

### 2.3.1.5. Sensores de velocidad o velocímetros

Los sensores de velocidad o velocímetros son más fáciles de instalar que los sensores de desplazamiento, pero son grandes, susceptibles a problemas de calibración y también tienen un rango de frecuencia limitado. El sensor de velocidad se utiliza principalmente para medir las operaciones de equilibrado y movimiento en máquinas rotativas. Estos sensores son ideales para detectar vibraciones de baja y media frecuencia [17].

Existen dos tipos principales de sensores de velocidad:

- Sensor de velocidad sísmico

El transductor sísmico de velocidad (Figura 14) se aplica a máquinas donde el eje transmite la vibración a la carcasa con poca amortiguación, es decir, las amplitudes de vibración en la carcasa son grandes. Se compone de un imán permanente ubicado en el centro de una bobina de hilo de cobre como se puede ver en la Figura 15. Cuando la carcasa vibra, se crea un movimiento relativo entre el imán y el bobinado, induciéndose por la ley de Faraday una tensión proporcional a la velocidad del movimiento [21].



Figura 14. Transductor sísmico de velocidad [21].

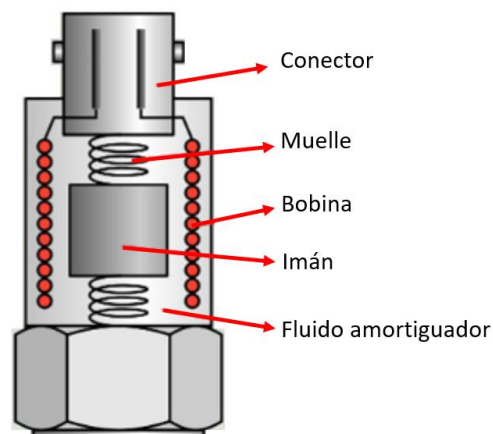


Figura 15. Componentes de un transductor sísmico de velocidad. Adaptada de [21].

- Sensor de velocidad piezoeléctrico

Un velómetro piezoeléctrico se construye igual que un acelerómetro, pero con un amplificador de señal que realiza una integración de la señal. Como esta etapa de integración se hace dentro del velómetro, la salida de señal viene dada directamente en unidades de velocidad. El velómetro aprovecha las buenas características de respuesta en frecuencia de un acelerómetro, de modo que genera una salida lineal en un rango de frecuencia mucho mayor que las sondas sísmicas de velocidad [16].

### 2.3.1.6. Vibrómetros

Los vibrómetros son instrumentos que reciben la señal eléctrica de un transductor y la procesan, aplicando filtración e integración, para obtener el valor total del nivel de vibración en velocidad (Figura 16). La mayoría de ellos están diseñados para tomar medidas de acuerdo con ciertos estándares de severidad de vibración [17].



**Figura 16. Vibrómetro [22].**

Un vibrómetro es un instrumento de medición para captar y cuantificar la magnitud de una vibración. Estos instrumentos son muy comunes en el mercado, especialmente los basados en el uso de acelerómetros. Sin embargo, los más nuevos aplican láseres para medir las vibraciones.

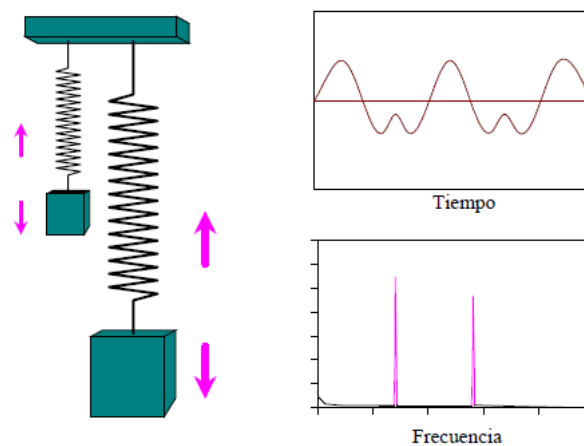
Los vibrómetros que usan acelerómetros miden el desplazamiento, aceleración o velocidad del objeto a estudiar. Estas herramientas se aplican directamente sobre la máquina, colocando la punta del sensor en ella por unos instantes. Luego, la vibración estimula una masa  $M$  interna del acelerómetro, lo que estimula al material piezoeléctrico. En consecuencia, cuando el acelerómetro es sometido a una vibración, la masa  $M$  produce fuerzas de inercia sobre el material piezoeléctrico. Como reacción, el instrumento piezoeléctrico genera cargas eléctricas proporcionales a la fuerza.

Aparte de los vibrómetros de acelerómetro, existe otro tipo más avanzado y potente, el VLD (Vibrómetro láser Doppler), del cual se hablará en profundidad más adelante.

Los VLD aprovechan el efecto Doppler para hacer mediciones en maquinaria industrial. El VLD enfoca un haz de luz en el objeto a medir. La superficie del objeto refleja la luz y esta última es recogida de nuevo por un vibrómetro. Posteriormente, un interferómetro demodula la diferencia de frecuencia entre el haz de luz enviado (incidente) respecto al reflejado. Estos datos se transforman en una señal de voltaje y posteriormente procesado en un computador [14].

### 2.3.2. Análisis de vibraciones

La información que nos da el análisis de vibraciones en una máquina tiene mucho valor, por lo que es muy importante analizarla. En la práctica, lo más común es realizar un análisis de frecuencias, también llamado análisis de espectro de la señal. El análisis del espectro es el resultado de transformar la información obtenida en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia (Figura 17) como se explicó en el apartado de la Transformada Rápida de Fourier en el 2.1. Concepto de vibración. Esta transformación se hace porque extraer información en el dominio de la frecuencia es mucho más sencillo que hacerlo en el dominio del tiempo, como podemos ver en el ejemplo de la Figura 17 [8].



**Figura 17. Dominio del tiempo - Dominio de la frecuencia [8].**

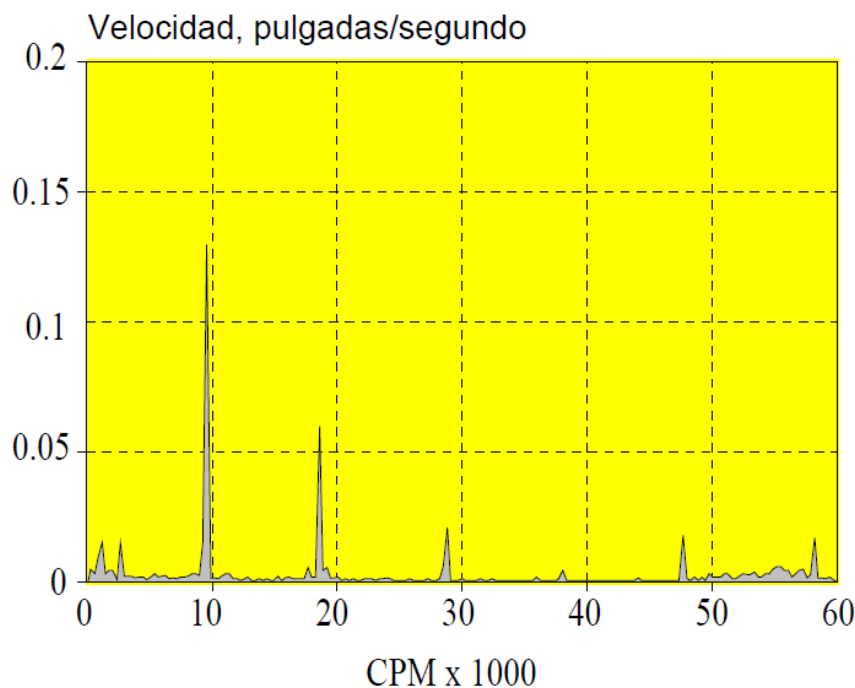
A la hora de realizar un análisis de espectro, existen diferentes tipos de señales con las que se pueden trabajar. Las señales en el dominio del tiempo se pueden dividir en varios grupos, por lo que, antes de realizar un análisis de frecuencias es necesario conocer algunas características de estos tipos de señales.

La primera división de las señales es en las categorías estacionarias y no estacionarias [8].

- Señales estacionarias: son constantes en sus parámetros estadísticos sobre el tiempo. Se podría decir que, si se observa una señal estacionaria durante unos instantes y después de una hora se vuelve a observar, se vería prácticamente igual. Generalmente, la maquinaria rotativa produce señales de vibración de este tipo. Este tipo de señales se divide a su vez en señales deterministas y aleatorias:
  - Señales deterministas: tienen una frecuencia relativamente constante durante un largo periodo de tiempo. Se pueden dividir en señales periódicas o casi periódicas. Las periódicas tienen formas de ondas con un patrón que se repite a igual distancia en el tiempo. Las casi periódicas tienen una forma de onda con una repetición variable en el tiempo, pero a simple vista del observador puede parecer periódica. La mayoría de las máquinas producen una combinación de estos tipos.
  - Señales aleatorias: son impredecibles en cuanto a su contenido de frecuencia y a su nivel de amplitud, pero aun así mantienen características estadísticas aparentemente uniformes sobre el tiempo.

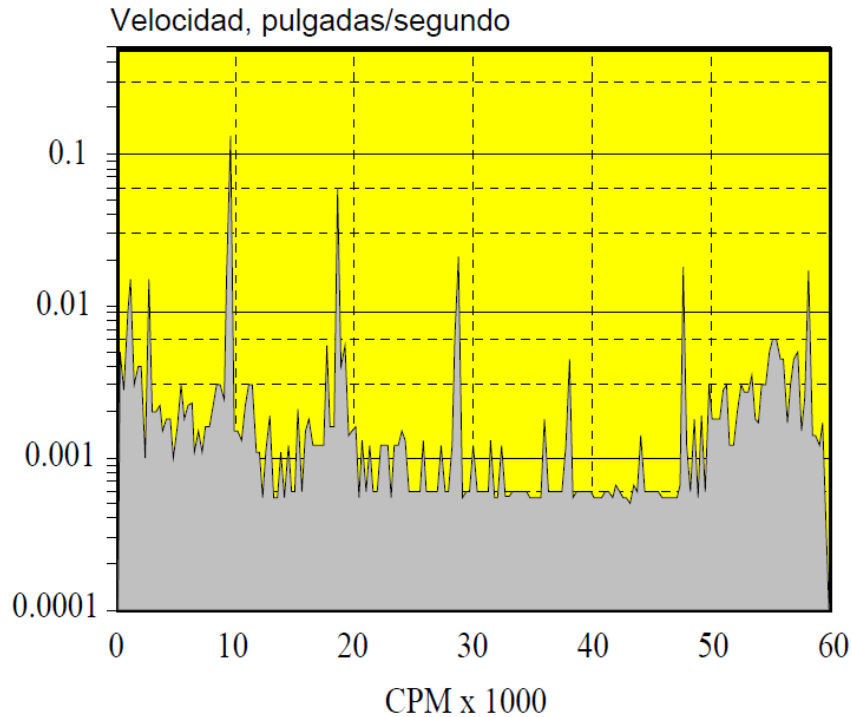
- Señales no estacionarias: estas se dividen en continuas y transientes. Las transientes son señales que empiezan y acaban al nivel cero y duran un tiempo finito. Un ejemplo de una señal no estacionaria continua sería el sonido de fuegos artificiales.

Al estudiar los espectros de vibración, puede parecer mejor hacerlo con una escala lineal de amplitud, ya que así sería la verdadera representación de la amplitud de la vibración medida en la realidad. Una escala lineal hace que se vean y se evalúen muy fácilmente los componentes más largos en un espectro, sin embargo, los más pequeños pueden pasar desapercibidos, incluso llegando a ser difícil asignarles una magnitud. Por este motivo, en el caso de vibración de maquinaria las señales se generan con amplitudes muy pequeñas, es mejor trazar el logaritmo de la amplitud en vez de la propia amplitud en sí. Como podemos observar en las siguientes figuras, se muestra la misma vibración en una escala lineal y dos tipos diferentes de escala logarítmica de amplitud [8].



**Figura 18. Escala lineal de amplitud [8].**

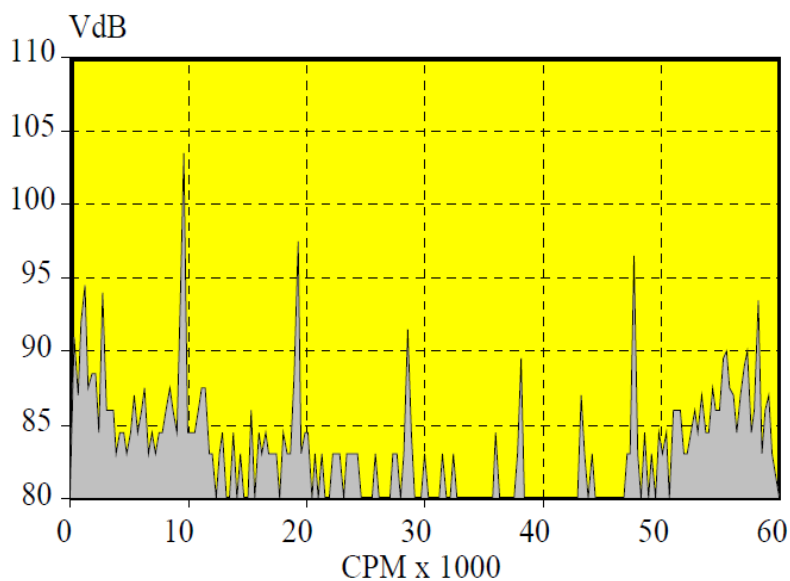
En este espectro lineal mostrado en la Figura 18, se puede observar que se ven muy bien los picos largos, pero la información en los niveles más bajos no es perceptible por lo que no se podría estudiar. Este mismo espectro, pero trazado con el logaritmo del nivel de vibración quedaría [8]:



**Figura 19. Escala de amplitud logarítmica [8].**

En esta Figura 19, el espectro está en una escala logarítmica de amplitud, que consiste básicamente es una multiplicación con un valor constante que eleva el espectro hacia arriba en la pantalla, sin cambiar su forma. En una escala logarítmica, si se cambia la cantidad de amplificación de una señal de vibración, no afectará a la forma del espectro. Con una escala lineal, la forma del espectro cambia de manera radical cuando se usan varios grados de amplificación.

Un tipo especial de escala logarítmica y que es muy importante en el análisis de vibraciones es el espectro en decibelios (Figura 20).



**Figura 20. Escala de amplitud en Decibelios [8].**

Este tipo de escala logarítmica es la escala decibel o escala dB, es una escala de proporción que relaciona el nivel medido de amplitud a un nivel de referencia.

Se define el decibel (dB) por la siguiente expresión [8]:

$$L_{dB} = 20 \cdot \log_{10} \frac{L_1}{L_{ref}} \quad (12)$$

Siendo:

- $L_{dB}$  el nivel de la señal en dB.
- $L_1$  el nivel de vibración en aceleración, velocidad o desplazamiento.
- $L_{ref}$  el nivel de referencia equivalente 0 dB.

El nivel de velocidad de vibración en dB abreviado VdB está definido como:

$$V_{dB} = 20 \cdot \log_{10} \frac{V}{V_{ref}} \quad (13)$$

La referencia o el nivel “0 dB” de  $10^{-9}$  m/s, es lo suficientemente pequeño como para que todas las mediciones en maquinaria den resultados positivos de dB. El VdB trata de poner la magnitud de vibración en una escala logarítmica que permite la realización fácil de mediciones [8].

El análisis de vibraciones se trata de un proceso de medición de niveles y frecuencias de vibración, en este caso, de la maquinaria industrial, y usar esa información para determinar, identificar, predecir y prevenir fallas en máquinas rotativas. Cuando una máquina industrial está operativa, genera vibración. Esta vibración puede ser medida usando un dispositivo, en este caso el vibrómetro láser, que registra la señal ya sea como una forma de onda de tiempo (amplitud – tiempo), como una Transformada Rápida de Fourier (amplitud – frecuencia), o como ambas.

Se entiende por vibración a un movimiento armónico de muy pequeña amplitud que se suele detectar en la carcasa o en un eje de la máquina. El uso del análisis de vibración puede detectar problemas mucho antes de que pueda ser visto por el técnico y mucho antes de que dañe otros componentes de la máquina. La aplicación del análisis de vibración, monitoreo de las condiciones o mantenimiento predictivo ha hecho grandes avances, aumentando la vida útil de la maquinaria.

En este caso, como se ha dicho, el instrumento que se usará para el análisis de vibraciones será un vibrómetro láser, cuyo funcionamiento se explicará de forma más detallada en el apartado siguiente, es un instrumento que recibe la señal eléctrica de un transductor y la procesa, aplicando filtración e integración, para obtener el valor total del nivel de vibración en velocidad.

El monitoreo de vibraciones proporciona menores costes de operación, es decir, la adquisición automática de los datos elimina los costes de mano de obra asociados a la recogida de los datos de vibración de la máquina y mayor calidad de recolección de estos. Siendo la precisión de medición de datos mayor y además se puede condicionar la recogida de datos en distintas y determinadas condiciones de funcionamiento, como puede ser modificando la velocidad y la carga.

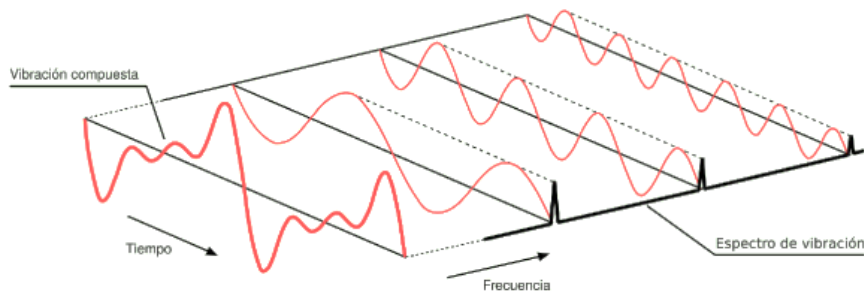
### 2.3.2.1. Proceso de análisis de vibraciones

Aunque para el análisis de vibraciones se pueden usar varias técnicas, los métodos más usados para presentar los datos de vibración son en el dominio del tiempo o de la frecuencia. Los datos de vibración son captados por acelerómetros (u otro instrumento para captar señales de vibración

como el vibrómetros láser), cuya velocidad de muestreo debe ser lo suficientemente rápida para obtener el comportamiento de interés [17].

Tras esto, la señal tiene que digitalizarse a una frecuencia de muestreo adecuada para que pueda reconstruirse digitalmente cuyo resultado será una onda cuya amplitud estará en función del tiempo, es decir, una señal en el dominio del tiempo [17].

A continuación, esta señal obtenida se convierte al dominio de la frecuencia donde será más fácil visualmente detectar sus características ya que, gran parte de la información proporcionada por el análisis de vibraciones se basa en la correlación de los picos de frecuencia con las características físicas del sistema. Esta técnica consiste en realizar proceso matemático, la Transformada Rápida de Fourier (FFT de sus siglas en inglés) para convertir la onda de dominio del tiempo en un espectro de vibración en el dominio de la frecuencia. El alcance del espectro de frecuencias depende del instrumento usado y del convertidor analógico-digital (ADC) utilizado [17]. Entonces lo que hace un analizador de espectros que trabaja con la Transformada Rápida de Fourier es capturar una señal de una máquina, calcular todas las series de señales sinusoidales que contiene la señal compleja y por último mostrarlas de forma individual en una gráfica de espectro (Figura 21) [23].

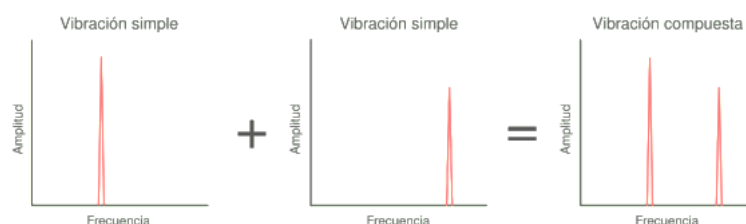


**Figura 21. FFT de una onda compleja [23].**

A la gráfica en el dominio del tiempo se le llama onda y a la gráfica en el dominio de la frecuencia se le llama espectro[23].

Como se ha dicho, en primer lugar, sería la representación en el dominio del tiempo y lo segundo, la representación en el dominio de la frecuencia. La información en ambas representaciones es la misma, pero en el dominio de la frecuencia está representada de una forma más compacta y práctica [23] .

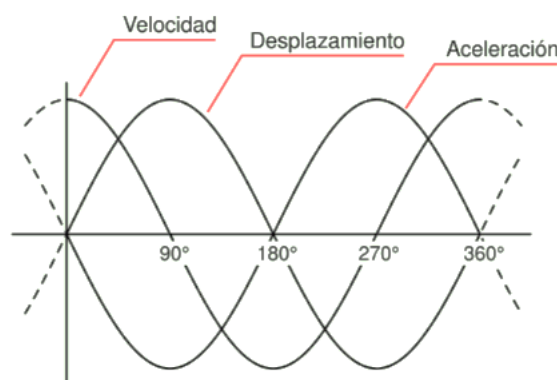
Usando la FFT se puede hacer la suma de las vibraciones simples extraídas de la vibración compleja, representándolas en el dominio de la frecuencia, como se muestra en la Figura 22.



**Figura 22. Suma de vibraciones simples en el dominio de la frecuencia [23].**

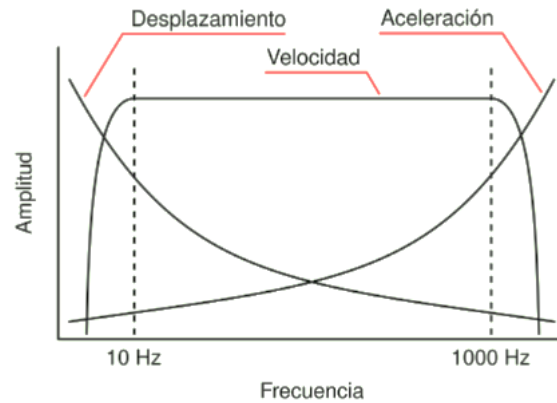
Normalmente y lo más natural cuando alguien se inicia en el análisis de vibraciones, es tomar como medida de la amplitud de la vibración de un objeto el desplazamiento. El desplazamiento es la distancia al objeto desde una posición de referencia o punto de equilibrio, pero, aparte de un desplazamiento variable, un objeto que vibra presenta una velocidad y aceleración variable. Como ya se explicó en el apartado 2, la velocidad se define como la variación en el desplazamiento y se mide en pulgadas por segundo o mm/s. La aceleración se define como la variación en la velocidad y se mide en g (aceleración debida a la gravedad en la superficie de la Tierra) o en  $mm/s^2$ . El desplazamiento de un cuerpo que está sometido a un movimiento armónico simple es una onda sinusoidal, al igual que la velocidad y la aceleración [23].

Cuando el desplazamiento alcanza su valor máximo, la velocidad vale cero, porque esa es la posición en la que la dirección del movimiento se invierte. Cuando el desplazamiento vale cero (en el punto de equilibrio), la velocidad estará en su valor máximo. Esto quiere decir que la fase de la onda de velocidad se encontrará desplazada hacia la izquierda 90 grados, comparada con la forma de onda del desplazamiento. En otras palabras, la velocidad está adelantada 90 grados con respecto al desplazamiento. La aceleración es del nivel de variación en la velocidad. Cuando la velocidad alcanza su valor máximo, la aceleración vale cero ya que la velocidad no cambia en ese momento. Cuando la velocidad vale cero, la aceleración está en su valor máximo en ese momento dado que es cuando más rápido cambia la velocidad. La curva sinusoidal de la aceleración en función del tiempo se puede ver de esta manera como desplazada en fase hacia la izquierda respecto a la curva de velocidad y por eso la aceleración tiene un avance de 90 grados respecto a la velocidad y de 180 grados respecto al desplazamiento (Figura 23) [23].



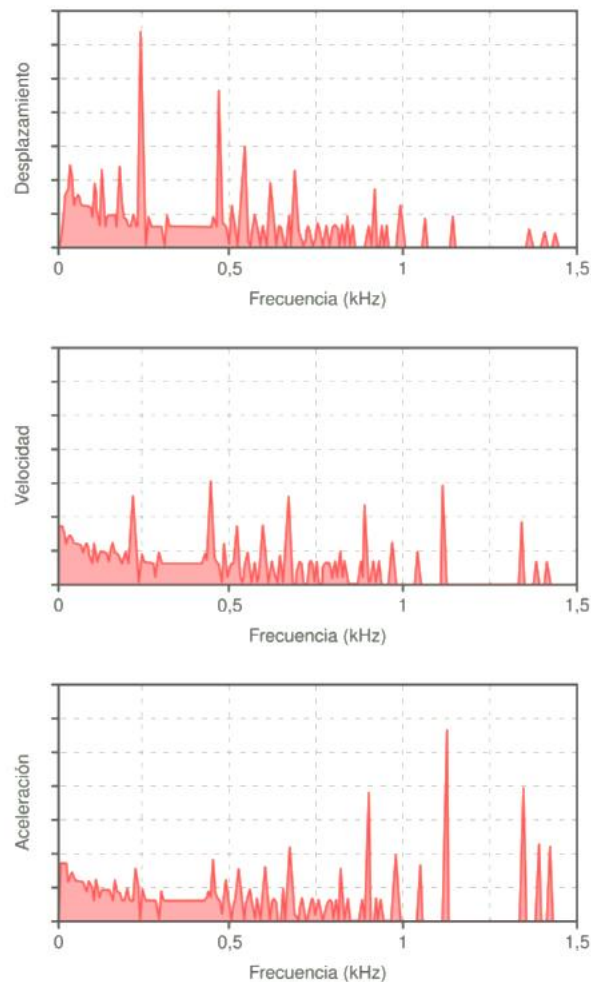
**Figura 23. Desfase entre desplazamiento, velocidad y aceleración [23].**

Las unidades de amplitud de vibración empleadas para expresar cada medida tienen gran influencia en la claridad con la cual se manifiestan los fenómenos vibratorios. El desplazamiento muestra sus mayores amplitudes en bajas frecuencias (normalmente por debajo de 10 Hz), la velocidad lo hace en un rango intermedio de frecuencias (entre 10 y 1.000 Hz), y la aceleración se manifiesta mejor a altas frecuencias (por encima de 1.000 Hz), aunque todo esto también depende del caso y de las circunstancias en las que se esté estudiando un cuerpo (Figura 24).



**Figura 24. Magnitud que usar según la frecuencia [23].**

Aquí se muestra un ejemplo donde los tres espectros muestran proporcionan la misma información, sin embargo, la curva de desplazamiento es más difícil de leer en frecuencias más altas y la curva de velocidad es la más uniforme en todo el rango de frecuencias (Figura 25).



**Figura 25. Comportamiento del espectro según la magnitud de vibración utilizada[23].**

Este es el comportamiento que suele tener la mayoría de la maquinaria rotativa, pero, en algunos casos, las curvas de desplazamiento y aceleración serán las más uniformes. La idea es seleccionar

las unidades de forma que se obtenga la curva más plana, ya que, eso proporcionará al observador más información visual. Por norma general, el parámetro de vibración más usado en trabajos de diagnóstico de maquinaria es la velocidad.

Una vez se tenga el espectro, se comienza a examinar los denominados picos síncronos, picos que son armónicos de la frecuencia de vibración síncrona, es decir, picos fundamentales [17].

El análisis de la forma de onda en el dominio del tiempo puede ser útil para aplicaciones de baja velocidad.

Otra técnica que se complementa con el análisis de la señal tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo es el análisis de fase, que permite determinar dónde se produce la vibración[17].

Las características de los espectros de vibración pueden separarse en señales de estado estacionario, que repiten señales continuas y transitorias, que ocurren como resultado de eventos específicos. Las características de la señal pueden subdividirse en síncronas, asíncronas y subsíncronas [17]:

- Picos de vibración síncrona: En los equipos rotativos, el espectro tendrá un pico en la frecuencia de rotación fundamental del eje,  $1X$ . El sistema, normalmente, también mostrará picos en múltiplos de la frecuencia fundamental, conocidos como  $2X, 3X...$  Estos se conocen como picos sincrónicos, que están relacionados a las características físicas del sistema.
- Picos subsincrónicos: Estos son básicamente armónicos de la frecuencia fundamental. Son causadas por cualquier elemento físico del sistema que opera a una frecuencia inferior a la del eje principal.

En el caso de las máquinas rotativas, una vez identificados los picos de vibración del espectro, se procede al diagnóstico de la máquina, es decir, determinar la gravedad (en caso de falla) del problema basándose en las amplitudes y la relación entre los picos de vibración.

## 2.4. Vibrómetro láser

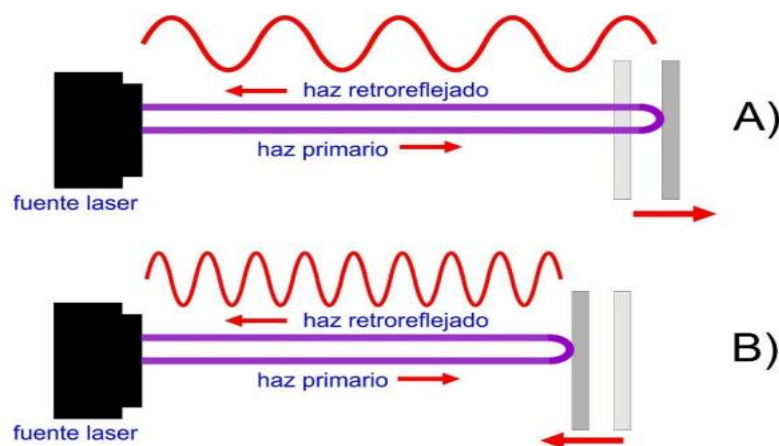
Un vibrómetro es un instrumento de medición para captar y cuantificar la magnitud de una vibración. Estos instrumentos son muy comunes en el mercado, especialmente los basados en el uso de acelerómetros. Sin embargo, los más nuevos aplican láseres para medir las vibraciones.

Este equipo es muy útil para el mantenimiento predictivo. La versión más moderna y potente de los vibrómetros es conocida como Vibrómetro láser Doppler (VLD) (Figura 26).



**Figura 26. Vibrómetro láser. Modelo: IVS-500 Industrial Vibration Sensor [24].**

Antes de hablar de él, se explicará en qué consiste el efecto Doppler. Este efecto es el cambio aparente de la frecuencia de una onda producida por el movimiento de la fuente de emisión respecto al observador o viceversa (Figura 27) [14].



**Figura 27. Ilustración del efecto Doppler. A) Cuerpo alejándose de la fuente. B) Cuerpo acercándose a la fuente [25].**

#### 2.4.1. Funcionamiento del VLD

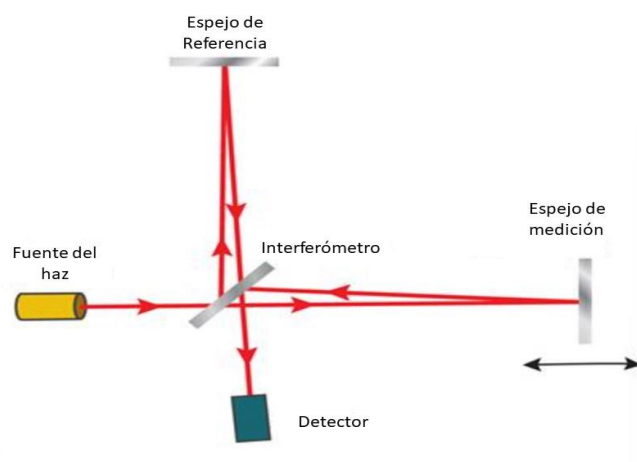
El Vibrómetro Láser emite un láser de onda continua sobre la superficie que se desea medir. La frecuencia de la luz reflejada por la superficie varía si la superficie enfocada se desplaza. Esta variación de frecuencia se conoce como corrimiento Doppler. Después, con la ayuda de un interferómetro, se demodula la diferencia de frecuencia obtenida y transforma ese corrimiento en una señal del voltaje o en datos digitales.

Para comprender bien este efecto, es necesario conocer qué es el interferómetro de Michelson y, por consiguiente, la interferometría.

### 2.4.1.1. Interferometría. Interferómetro de Michelson.

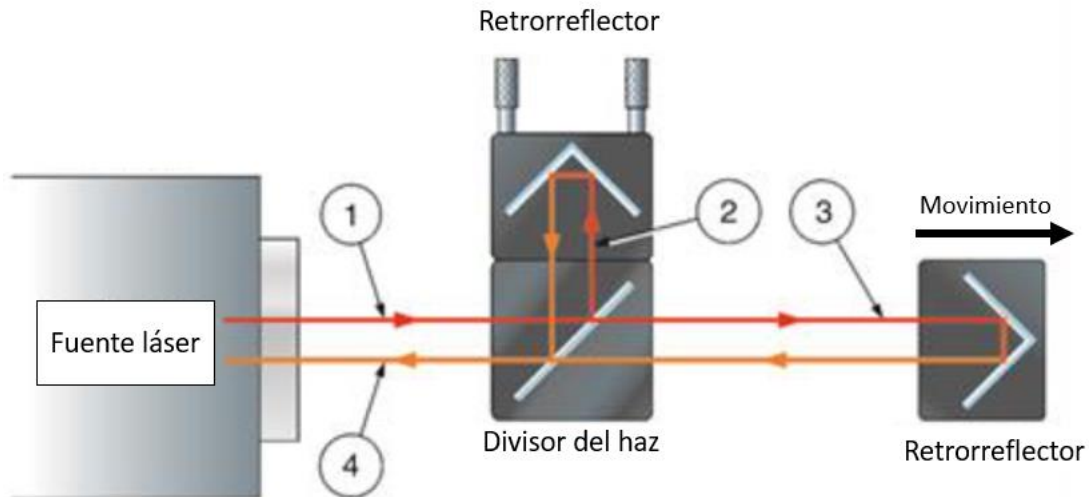
La herramienta más utilizada en interferometría, el interferómetro de Michelson es un sistema de espejos y espejos semitransparentes (desdobladores del haz) para combinar haces de luz separados que provienen de una misma fuente. La interferometría láser es un método muy reconocido de medición de distancias con la máxima precisión.

El funcionamiento es simple (Figura 28), un único haz luminoso de entrada constante se bifurca en dos haces idénticos mediante un interferómetro de Michelson, uno de referencia y otro que se usará para la medición. Los dos haces viajan en direcciones distintas, llamadas trayectorias, y se recombinan antes de llegar a un detector. La diferencia de la distancia recorrida por cada haz crea una diferencia de fases entre ellos. Con esta diferencia de fase, que se detecta en el detector, se diagnostica cualquier cambio producido a lo largo de las trayectorias, como un cambio físico en la longitud de la trayectoria [26].



**Figura 28. Esquema del funcionamiento básico de la interferometría láser. Imagen adaptada de [26].**

Se puede ver mejor el sistema de la Interferometría de Michelson en la Figura 29, donde el haz (1) sale de la fuente láser y se divide en dos haces (referencia 2 y medición 3) en el interferómetro. Los haces se reflejan de vuelta desde los dos retroreflectores y se vuelven a combinar en el interferómetro antes de llegar al detector. El uso de retroreflectores asegura que los rayos que vuelven desde los brazos de referencia y medición son paralelos cuando se combinan en el interferómetro. Los haces combinados llegan al detector, donde interfieren entre ellos [26].



**Figura 29. Interferometría Michelson. Imagen adaptada de [26].**

## 2.4.2. Tipos de vibrómetros VLD

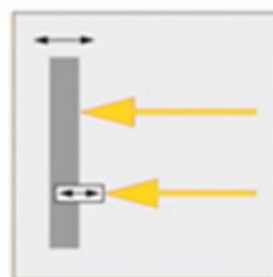
### 2.4.2.1. Vibrómetro de un solo punto

Estos miden las funciones de transferencia, las amplitudes y las frecuencias de resonancia sin contacto. Además, lo hacen de forma no intrusiva. En términos más sencillos, son sensores de vibración láser que miden las vibraciones de los objetos en la dirección del rayo láser. Son los vibrómetros más simples y económicos del mercado para aplicaciones donde solo es necesario medir la vibración en un solo punto [15,28].

### 2.4.2.2. Vibrómetro diferencial

La vibrometría diferencial describe la medición de las vibraciones en dos puntos que vibran uno respecto al otro (Figura 30). En general, se usan 2 métodos [14]:

- Uno, en el que la diferencia se genera directamente en el recorrido óptico. Este método es ideal para las altas frecuencias.
- Otro, donde la diferencia se calcula electrónicamente con dos interferómetros independientes, por esto, este método permite una mayor flexibilidad de configuración.

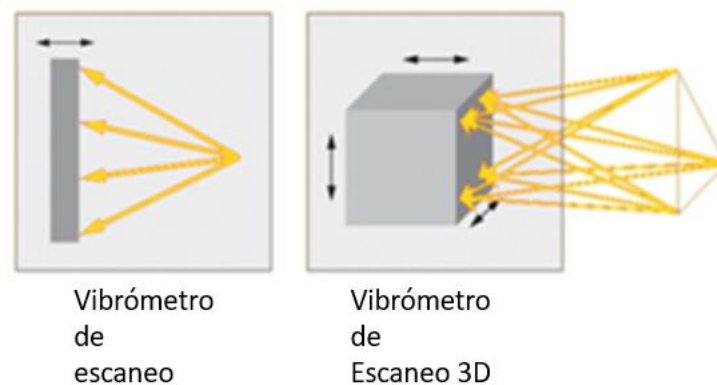


Vibrómetro  
diferencial

**Figura 30. Esquema de los haces de láser del vibrómetro láser diferencial. Imagen adaptada de [26].**

### 2.4.2.3. Vibrómetro Doppler de barrido SLDV o de escaneo

La vibrometría Doppler de barrido (SLDV) describe la medición de las vibraciones. El rayo láser explora secuencialmente toda la superficie del objeto utilizando una serie de mediciones de un solo punto. Con esta medición se generan funciones de transferencia para todos los puntos de medición. Permite la exploración de campo completo 1D de estructuras enteras, al igual que permite el escaneo 3D, usando tres haces de láser con diferentes ángulos (Figura 31). Permite medir vibraciones estructurales para resolver problemas relacionados con dinámica estructural y acústica. Estos vibrómetros son de los más avanzados en el mercado. Los equipos más avanzados permiten escanear la superficie seleccionando los puntos donde se requiere hacer la medición y mediante un software, a partir de un archivo CAD, se pueden obtener las formas de deflexión [15,28].



**Figura 31. Esquema de los haces de láser del vibrómetro de barrido o escaneo. Imagen adaptada de [26].**

### 2.4.2.4. Vibrómetros rotacionales

Los vibrómetros rotacionales describen la medición de la velocidad y desplazamiento angulares de las vibraciones de una estructura giratoria (Figura 32). Por ejemplo, nos permite analizar detalladamente la dinámica rotacional de transmisiones, turbinas de gas, generadores eléctricos [14]...



**Figura 32. Esquema de los haces de láser del vibrómetro rotacional. Imagen adaptada de [26].**

### 2.4.2.5. Vibrómetros de plano

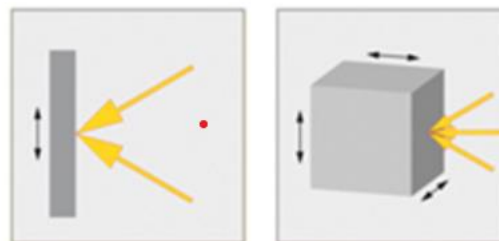
La vibrometría en el plano describe las mediciones de vibración y movimiento perpendiculares al eje de medición (Figura 33). Por ejemplo, la vibrometría en el plano detecta sin contacto los movimientos de los pistones, los ejes de las válvulas o las herramientas. Además, se utiliza para mediciones de deformación muy dinámicas[14].



**Figura 33. Esquema del haz de láser del vibrómetro de plano. Imagen adaptada de [26].**

#### 2.4.2.6. Vibrómetros multipunto

La medición sincronizada de varios sensores es esencial para detectar las formas de reflexión de eventos dinámicos o transitorios. En contraste con la vibrometría de barrido, todos los canales ópticos miden en el mismo momento de tiempo (Figura 34). Este enfoque multisensor permite analizar las vibraciones de todo el campo en el dominio del tiempo y de la frecuencia. En algunos vibrómetros su interfaz permite crear figuras en 3D y visualizar la vibración a partir de la lectura del vibrómetro [15,28].



**Figura 34. Esquema de los haces de láser de un vibrómetro multipunto. Imagen adaptada de [26].**

#### 2.4.3. Aplicaciones del vibrómetro láser

Los vibrómetros láser se usan en una gran cantidad de aplicaciones en las que se necesitan una alta fiabilidad ya que estos abarcan prácticamente todos los rangos de medición exigidos en áreas de investigación y, sobre todo, industriales como, por ejemplo, en la calibración de dispositivos más simples de medición de vibraciones, en la industria automotriz, en análisis modales para aeronáutica, salud y seguridad ...

El vibrómetro se usa principalmente para el mantenimiento preventivo de instalaciones y maquinarias y mide los parámetros velocidad, aceleración y desplazamiento. A esto se le llama mantenimiento predictivo y diagnóstico de fallas, que es una técnica basada en datos clave para anticipar errores.

El mantenimiento predictivo pretende estudiar el funcionamiento de los equipos y procesos con el fin de identificar posibles fallas y repararlas, y cambiar el componente averiado o sustituir el equipo completo antes de que ocurra cualquier tipo de falla. Para detectar averías, se debe estudiar el comportamiento de la máquina y para eso, se pueden usar equipos como los vibrómetros o sensores térmicos [14].

Todo equipo, estructura o proceso son propensos a presentar fallas durante su vida útil. La industria es un sector encargado de convertir materias primas en productos finales o intermedios. Entonces, la industria es un sector muy importante para la sociedad moderna. Por este motivo,

cualquier fallo causaría desde retrasos en la producción hasta averías mayores que puedan afectar, incluso, a la integridad de los trabajadores. Por esto, mantener vigilados esos equipos para evitar cualquier mal función es vital. Es aquí donde entra el mantenimiento predictivo [14].

Algunos campos donde es necesario analizar y medir vibraciones con una alta fiabilidad y precisión son, por ejemplo:

#### **2.4.3.1. Industria automotriz**

En este campo, la correcta medición de las vibraciones es muy importante para detectar, eliminar o prevenir sonidos no deseados a consecuencia de balanceo de componentes, ejes desalineados, rodamientos en mal estado... En este ámbito se pueden dividir las vibraciones en dos ramas, una, donde existe una vibración normal por el simple hecho del funcionamiento del motor y otra, donde se encuentran las vibraciones no deseadas por fallas en el funcionamiento de los mecanismos como oscilaciones en el cigüeñal o en sistemas de ejes [25].

#### **2.4.3.2. Calibración de instrumentos**

Otra de las principales aplicaciones de la calibración de instrumentos como dinamómetros, acelerómetros e instrumentos de excitación (instrumentos que generan vibraciones en objetos donde se requiere analizar su comportamiento, como “shakers” electrodinámicos), como por ejemplo sensores de baja frecuencia de vibración que son usados para mediciones de sismos y grandes estructuras donde se trabajan a frecuencias menores de 50 Hz [25].

#### **2.4.3.3. Salud**

Este aspecto tiene que ver con las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo. Consiste en establecer límites máximos de exposición y las condiciones de seguridad e higiene necesarias en centros de trabajo donde se generen vibraciones que, por el tiempo de exposición o las características de estas, puedan afectar o alterar de alguna manera a la salud de los trabajadores. Los tiempos límites máximos de exposición se adaptan según la frecuencia, aceleración de la vibración y la dirección de transmisión [25].

### **2.5. Vibraciones (chattering) en el mecanizado**

#### **2.5.1. Análisis predictivo**

La protección, consistencia y efectividad en la maquinaria rotativa son de una importancia clave en las industrias. La monitorización de la maquinaria ayuda a mantener la eficiencia de la máquina en su nivel óptimo. La monitorización es eficiente, pero a menudo es una labor difícil para el personal de mantenimiento resolver los problemas de la máquina. El análisis de vibraciones es un método usado para la monitorización de las máquinas. Las técnicas de captación de señales de vibración tienen un carácter fundamental en el estudio de una máquina rotativa. Las máquinas rotativas son muy usadas en las industrias hoy en día, por eso, una monitorización efectiva y eficiente y un buen sistema de detección de fallas es algo envidiable en el mundo de la industria. El análisis de vibraciones es lo más usado para la detección de fallas en las máquinas rotativas [27].

Las técnicas más usadas para la recogida de datos para conocer el estado de una máquina son [28]:

- Análisis de vibraciones
- Termografía infrarroja
- Ultrasonido
- Emisiones acústicas

Como se ha explicado, con el uso del análisis de vibraciones se puede llegar a prever la falla incluso con meses de antelación. Por ejemplo, el análisis de aceite diario se usa para verificar el

estado del lubricante de la máquina, las fugas de aceite y el desgaste de la máquina. Los métodos de análisis de aceite incluyen el uso de un espectrómetro infrarrojo de transformada de Fourier (FTIR) para hacer un análisis de humedad, medir el coeficiente de partículas, mediciones de viscosidad y otros parámetros. Las pruebas de análisis espectral de aceite, por ejemplo, descomponen la estructura química del aceite para predecir posibles fallas. Silicona y niveles de aluminio en el aceite sugieren que existe una contaminación (silicato de aluminio), mientras que el contenido de hierro indica la resistencia al desgaste que están teniendo los componentes. Existen 3 etapas que son usadas para categorizar el proceso del mantenimiento [28]:

- Mantenimiento de averías: consiste en reemplazar partes defectuosas de los aparatos. Es una solución simple y reducirá los costes iniciales del entrenamiento del personal y otros gastos asociados.
- Mantenimiento preventivo: es aquel que se realiza independientemente del estado de la máquina, y se programa en un calendario o por horas de trabajo de esta.
- Mantenimiento predictivo: mediante la medición de algunos parámetros de la maquinaria, se pueden identificar problemas emergentes en épocas tempranas, pudiendo así realizar las reparaciones oportunas antes de que la máquina se averíe.

En este artículo se mencionan algunas técnicas más para el mantenimiento predictivo, que sumándolas a las anteriormente comentadas serían [28]:

1. Análisis de vibraciones
2. Emisiones acústicas
3. Termografía infrarroja
4. Monitoreo de la corrosión
5. Análisis de lubricantes
6. Equipos de control del proceso
7. Control y tendencia de los parámetros del proceso
8. Inspección visual
9. Análisis del motor

La mayoría de las empresas se benefician financieramente del uso del seguimiento y mantenimiento predictivo, ya que es muy costoso reparar equipos dañados, mantener grandes existencias de repuestos o maquinaria, retrasar la producción debido a retrasos en las reparaciones... Las estrategias de mantenimiento bien diseñadas se han traducido en un importante ahorro de costes. El análisis de las señales de vibración permite evaluar el tipo de falla existente y hacer un cálculo preciso de la vida útil restante de la máquina, disponibilidad de repuestos, personal de mantenimiento necesario y tiempo requerido para reparar la maquinaria [28].

Varias técnicas de análisis de vibraciones se han aplicado en el diagnóstico de fallas en máquinas rotativas. En décadas anteriores, se hicieron algunos estudios sobre técnicas de vibraciones desde diferentes puntos de vista. En 1980, Mathew y Alfredo presentaron un análisis de técnicas de monitorización con vibraciones en el dominio del tiempo y de la frecuencia para rodamientos de máquinas rotativas. Esto es esencial para la salud de la máquina, hasta en las mejores condiciones de operación, las máquinas tendrán alguna vibración por algún mínimo defecto. Cada máquina tiene un nivel de vibración el cual puede considerarse normal. Sin embargo, algunas veces el nivel de las vibraciones aumenta e incluso pueden llegar a ser excesivas, cuya razón probablemente sea algún fallo mecánico. Las razones por las que se puede dar este exceso de vibraciones pueden ser por desalineación, desbalanceo, engranajes o cojinetes desgastados, holguras... El nivel de vibraciones de una máquina es medido con sensores. Hay sensores de proximidad, transductores de velocidad y acelerómetros. Los acelerómetros son los más usados para el análisis de vibraciones. El diagnóstico de fallas en una máquina rotativa tiene los siguientes pasos:

adquisición de datos, analizar las características y detectar las fallas. El problema es que las señales a menudo están contaminadas por señales de ruido, por lo que pueden ser inadecuadas para el diagnóstico de fallas. Sin la ayuda de ciertas técnicas, algunas características de las vibraciones pueden pasar desapercibidas [27].

En este review que se está mencionando, se habla de que las técnicas de análisis de vibraciones se pueden dividir en tres categorías, que son, en el dominio del tiempo, en el dominio de la frecuencia y en el dominio de tiempo-frecuencia. Con respecto al análisis de vibraciones en el dominio del tiempo, el valor de la raíz cuadrática media (RMS) de la señal es muy significativo, ya que representa la potencia de la vibración. Este valor es muy útil para detectar desbalanceo en máquinas rotativas. En el dominio del tiempo, el valor de RMS es el más usado para la detección de fallas en la maquinaria rotativa pero no es capaz de detectar fallas en etapas tempranas [27].

El factor “cresta” es otra medida en el dominio del tiempo en el análisis de vibraciones. Este factor se define como la relación entre el valor máximo de entrada y el valor RMS. En máquinas rotativas, la rotura de un diente de engranaje puede generar señales de vibración de impulsos, por lo que aquí el factor “cresta” será alto. Puede ser muy útil para detectar fallas en engranajes y cojinetes [27].

El análisis estadístico es muy útil para la detección de fallas en la maquinaria industrial. En el review de N. Tandon, se muestra una función de probabilidad que está relacionada con los defectos en cojinetes. Según su estudio, demuestra que un rodamiento que está en buen estado tiene una alta densidad de probabilidad de aceleración mostrando una distribución Gaussiana, pero un rodamiento defectuoso tiene una densidad de probabilidad cuya distribución no es Gaussiana y con cola dominante [29].

Otros métodos basados en el filtrado, estos incluyen la demodulación. Los filtrados son usados para apartar los ruidos contaminantes y aislar las señales procesadas. La demodulación, la cual incluye la demodulación de fase y amplitud es muy usada en las técnicas de procesamiento de señales. La demodulación de amplitud es también llamada técnica de demodulación de resonancia o técnica de demodulación de alta frecuencia [27].

Con respecto al dominio de la frecuencia y al dominio de tiempo-frecuencia, se dice que son, actualmente, los más usados a la hora del análisis de vibraciones en máquinas rotativas. Como se ha explicado en otros apartados, en este review se comenta de nuevo la ventaja que tiene el uso del análisis de las vibraciones en el dominio de la frecuencia con respecto al dominio del tiempo. Esto se debe a que la frecuencia de resonancia o el fallo en la frecuencia puede ser detectada más fácilmente en el dominio de la frecuencia comparada con el dominio del tiempo. Aquí se incluye, la ya mencionada en muchas ocasiones en otros apartados, la Transformada Rápida de Fourier (FFT), que es la técnica de diagnóstico más usada para identificar las características de la frecuencia de las señales vibratorias [27].

### **2.5.2. Chattering**

La vibración producida por la propia excitación de la máquina es lo que se conoce con el término inglés como “chattering”.

El chattering ha sido investigado desde hace más de un siglo y aún sigue siendo un obstáculo para conseguir la automatización en los procesos de mecanizado como el fresado, torneado o taladrado. Este fenómeno crea muchos problemas como pobres acabados superficiales, ruido excesivo, rotura de componentes de la máquina herramienta, reduce la vida de la herramienta y la productividad. El torneado es uno de los procesos de mecanizado más usados para producir una gran variedad de productos, principalmente cortando metales. A menudo, estos procesos van

acompañados de un movimiento relativo bastante violento entre la herramienta y la pieza de trabajo, que es lo que llamamos “chattering” [30].

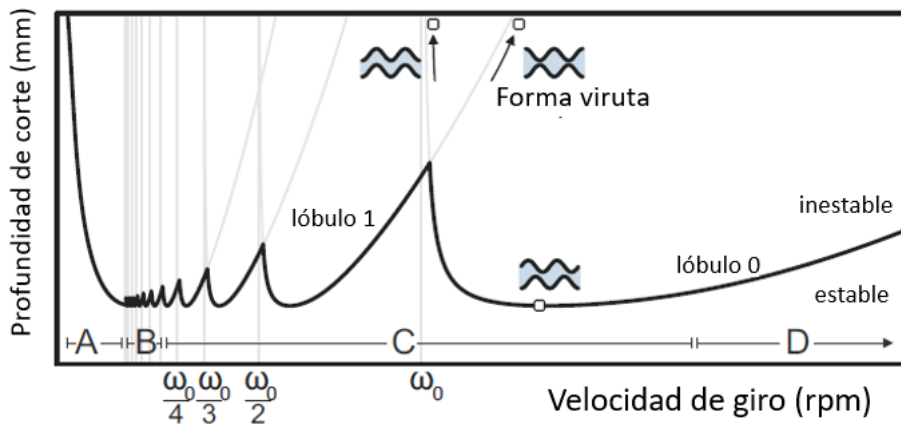
Las vibraciones autoexcitadas son clasificadas en chattering primario y secundario. El chattering primario es causado por la fricción entre la herramienta y la pieza, por efectos termo-mecánicos o por acoplamientos. El chattering secundario es causada por la regeneración de la superficie ondulada en la pieza de trabajo, es la más destructiva de entre todas las demás vibraciones. Se han llevado a cabo investigaciones con el fin de evitar esta vibración regenerativa, ya sea prediciendo su ocurrencia o detectándola tan pronto como ocurra. El proceso de análisis del chattering, su predicción o su detección temprana son muy complejas, por lo que necesita ser investigado independientemente para cada uno de los diferentes procesos de corte como el fresado, torneado y taladrado [30].

La rotación de la máquina herramienta ha sido un tema de interés en la comunidad del mecanizado debido al papel tan importante que tiene en el tema de la estabilidad y resultado de los procesos. Este giro tiene un gran impacto en el chattering y, por lo tanto, en la estabilidad del proceso. La investigación más temprana se realizó antes de 1990 y se centró en los parámetros del proceso de corte como la velocidad, el avance y la profundidad de corte en procesos de torneado. Pero en las últimas décadas, se han incorporado nuevos parámetros al estudio dinámico de las máquinas herramienta como la amortiguación del proceso, el desgaste de la herramienta, la geometría de la herramienta, la rigidez de los componentes de la herramienta... Estos nuevos modelos dinámicos están muy cerca de la naturaleza dinámica real del sistema máquina-herramienta y se ha demostrado que estos modelos son más precisos en la predicción de la estabilidad/inestabilidad del giro del proceso de corte [30].

Uno de los principales objetivos es definir la mejor técnica de supresión del chattering para cada caso. La técnica más adecuada debe seleccionarse teniendo en cuenta diferentes aspectos del chattering, que se pueden clasificar según los siguientes criterios [31]:

- Maquinabilidad: Muchos métodos de supresión del chattering se basan en variar las condiciones de corte, sobre todo la velocidad de corte. La maquinabilidad es importante a la hora de elegir una técnica de supresión del chattering, un material con buena maquinabilidad permite cambios en la velocidad del husillo para evitar vibraciones, sin embargo, un material con baja maquinabilidad, el rango de velocidad del husillo es limitado por lo que el objetivo es mover la zona más estable del Stability Lobe Diagram (SLD) a las mejores condiciones [31].
- Ubicación relativa en el diagrama de estabilidad: el diagrama es un factor clave para seleccionar la técnica óptima de supresiones de vibraciones. La posición relativa del proceso se define por la relación  $k$  que es el cociente de la frecuencia de vibración ( $f_c$ ) y la frecuencia del paso de dientes ( $f_z$ ), que depende de la velocidad del cabezal ( $N$ ) y del número de dientes de la herramienta ( $Z$ ). Se pueden identificar 4 zonas relativas de acuerdo con esta relación [31].
  - Zona A: Zona de amortiguación del proceso
  - Zona B: Zona intermedia
  - Zona C: Zona de alta velocidad
  - Zona D: Zona de muy alta velocidad

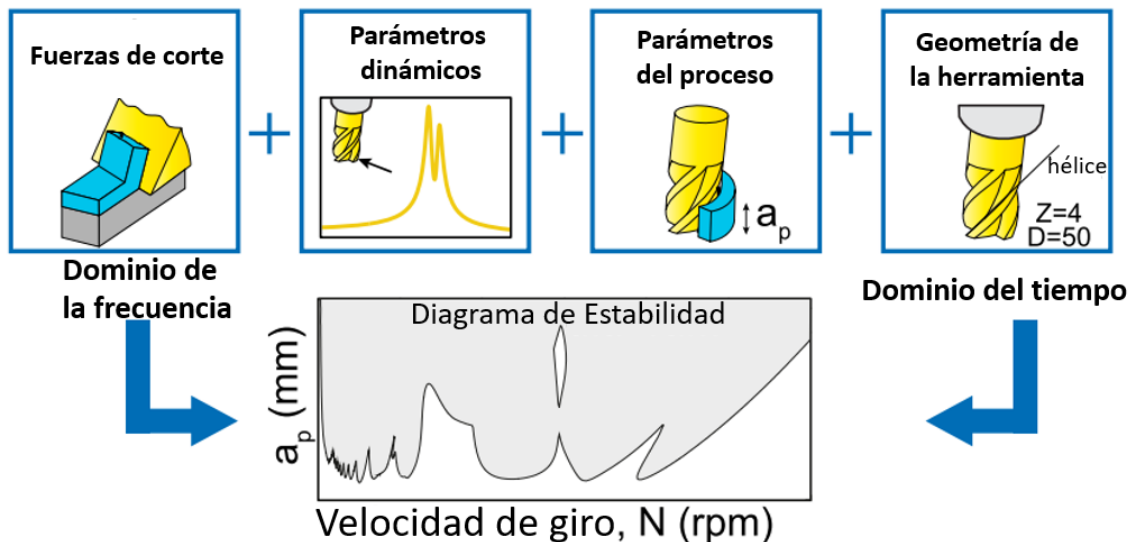
Podemos observar las diferentes zonas mencionadas en la Figura 35.



**Figura 35. Ubicación relativa en el SLD. Imagen adaptada de [31].**

- **Elemento crítico:** La flexibilidad dinámica de cualquier parte del sistema que incluye la estructura de la máquina herramienta, el husillo, la herramienta/portaherramientas, el sistema de fijación o la pieza a mecanizar pueden producir el chatter. Las propiedades pueden variar dependiendo de la posición de la máquina y la orientación de la herramienta.

Antes se ha mencionado el SLD, por lo que es importante tener un concepto general, este diagrama se construye usando un modelo de estabilidad alimentado con 4 entradas diferentes que son como se puede ver en la Figura 36: los coeficientes de corte o fuerza específicas, los parámetros dinámicos del sistema, los parámetros del proceso y la geometría de la herramienta [31].



**Figura 36. Proceso de obtención del Diagrama de lóbulos de estabilidad (SLD). Imagen adaptada de [31].**

Las señales de fuerza y vibración son preferidas por la mayoría de los investigadores porque proporcionan una visión completa de la dinámica del proceso de corte y son muy útiles en el control de estado de los procesos de mecanizado. Por esto, la técnica del análisis de vibraciones es muy usada para la detección del chatter, debido a la relación compleja entre las fuerzas de corte, vibraciones y mecanismos que causan las vibraciones [30].

### 2.5.3. Vibración en el mecanizado de aleaciones ligeras.

Se le denominan ligeras por su excelente relación densidad/resistencia. Dentro de las aleaciones ligeras hay muchas. Entre las más utilizadas en aplicaciones aeronáuticas se encuentran las de aluminio (series 2000 Al-Cu y 7000 Al-Zn), así como las de Titanio, principalmente la Ti6Al4V. Estas aleaciones son producto de la unión con otros elementos como el cobre, níquel, silicio, magnesio, cinc, hierro, cromo, cobalto y titanio. La unión de dichos elementos tiene como características principales la ligereza, maleabilidad, bajo peso y alta ductilidad [34,35].

Se va a hablar, en especial, del mecanizado del aluminio y el titanio, por lo que es necesario saber algunas de las características y propiedades que hacen que estos materiales sean tan usados en el mundo de la ingeniería y la industria.

El aluminio y sus aleaciones tienen un bajo punto de fusión. También son altamente resistentes a la corrosión y tienen alto coeficiente de fricción, excelente maquinabilidad y alta neutralidad magnética [34].

El titanio se considera una buena alternativa para reemplazar las aleaciones de aluminio y el acero debido a sus excepcionales propiedades como la resistencia a la corrosión, resistencia a la fatiga, una buena relación fuerza-peso y que también se mantienen bien a alta temperatura. Las propiedades mecánicas juegan un papel muy importante en la maquinabilidad de la aleación. Para las aleaciones de titanio, la composición química y la microestructura son factores determinantes en su comportamiento mecánico. Como ya se sabe, las propiedades térmicas también tienen una gran influencia en el proceso de mecanizado [34].

Es un material difícil de mecanizar debido a su alta reactividad química, sobre todo a altas temperaturas, con los materiales de la herramienta, debido a esto, se produce una soldadura entre el material y la herramienta que provoca una alta rugosidad superficial y desgaste rápido de la herramienta. Además, su baja conductividad térmica es uno de los factores que hacen difícil su mecanizado. Por eso, la mejora del mecanizado de aleaciones de titanio depende de la minimización de los problemas asociados a él, como la alta temperatura de corte, alta tensión de corte, vibración y morfología de la viruta [35,36].

En este caso, se va a hablar en concreto sobre el efecto de la vibración, o como se ha mencionado anteriormente, el “chatter” en el mecanizado de las aleaciones de titanio. Durante el mecanizado de este tipo de aleaciones, la vibración es uno de los problemas principales que se deben abordar. Esta vibración es a consecuencia del bajo módulo de elasticidad de las aleaciones de titanio, que provoca una recuperación elástica detrás del filo de corte, dando como resultado un desgaste prematuro de la herramienta, alta temperatura de corte y el chatter durante el mecanizado. Las fuerzas de corte durante el mecanizado de aleaciones de titanio también son una causa de la vibración. Además, unos inadecuados parámetros de mecanizado conducen a vibraciones y disminuyen considerablemente el rendimiento de toda la operación [34].

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Como se dijo al comienzo, el auge de la industria aeronáutica y la gran competitividad que existe a nivel internacional ha hecho que se desarrollen nuevas estrategias para reforzar y mejorar la productividad. Desde el punto de vista de los materiales empleados, las aleaciones ligeras presentan una serie de propiedades que las hacen, como ya se ha dicho, idóneas para su uso en la industria aeroespacial. Dentro de este tipo de aleaciones se encuentran las aleaciones de aluminio. En concreto, su baja densidad y su excelente resistencia mecánica hacen que sean muy utilizadas en la fabricación de componentes estructurales para aeronaves.

Dentro del marco expuesto se encuentran investigando de forma conjunta distintos miembros de las Universidades de Málaga (UMA) y Cádiz (UCA), pertenecientes a los grupos de investigación TEP933 (Ingeniería de Fabricación, UMA) y TEP027 (Ingeniería y Tecnologías de Materiales y Fabricación, UCA). Una de las líneas de investigación, común a ambos grupos, se centra en el mecanizado de aleaciones ligeras de uso en la industria aeroespacial, así como en el análisis y evaluación del rendimiento de procesos de mecanizado [1].

El Grupo TEP-933 “Ingeniería de Fabricación de la Universidad de Málaga” entre sus diversas líneas de investigación, incluye una actividad investigadora que se centra en la optimización de parámetros de procesos de fabricación especialmente aplicados a aleaciones ligeras de uso aeronáutico. Actualmente, motivaciones económicas y medioambientales hacen del mecanizado en seco, realizado en ausencia de fluidos de corte, uno de los procesos con mayor interés, a pesar de que sus agresivas condiciones de corte pueden afectar a la integridad estructural de las piezas mecanizadas [1].

Con el fin de mejorar la productividad en los procesos de mecanizados, se estudian las vibraciones que se generan durante el proceso, buscando una mayor eficiencia detectando fallos en el proceso de corte antes de que pudiesen ocurrir, y así, evitarlos. Para ello, se ha usado el vibrómetro láser Modelo IVS-500 de la marca POLYTEC, que se empleará para la captación de estas señales oscilatorias que se producen durante el proceso, lo que puede resultar factible dado que este equipo realiza el proceso de medición sin contacto. Este equipo se complementará a una máquina-herramienta de control numérico junto con otros sistemas de captación de señales de diversa índole y se integrará en un sistema amplio de monitorización de procesos de mecanizado por arranque de viruta. Para comprender mejor la estructura de todo el equipo que forma parte de la captura y análisis de las vibraciones, se va a detallar la configuración del equipo completo.

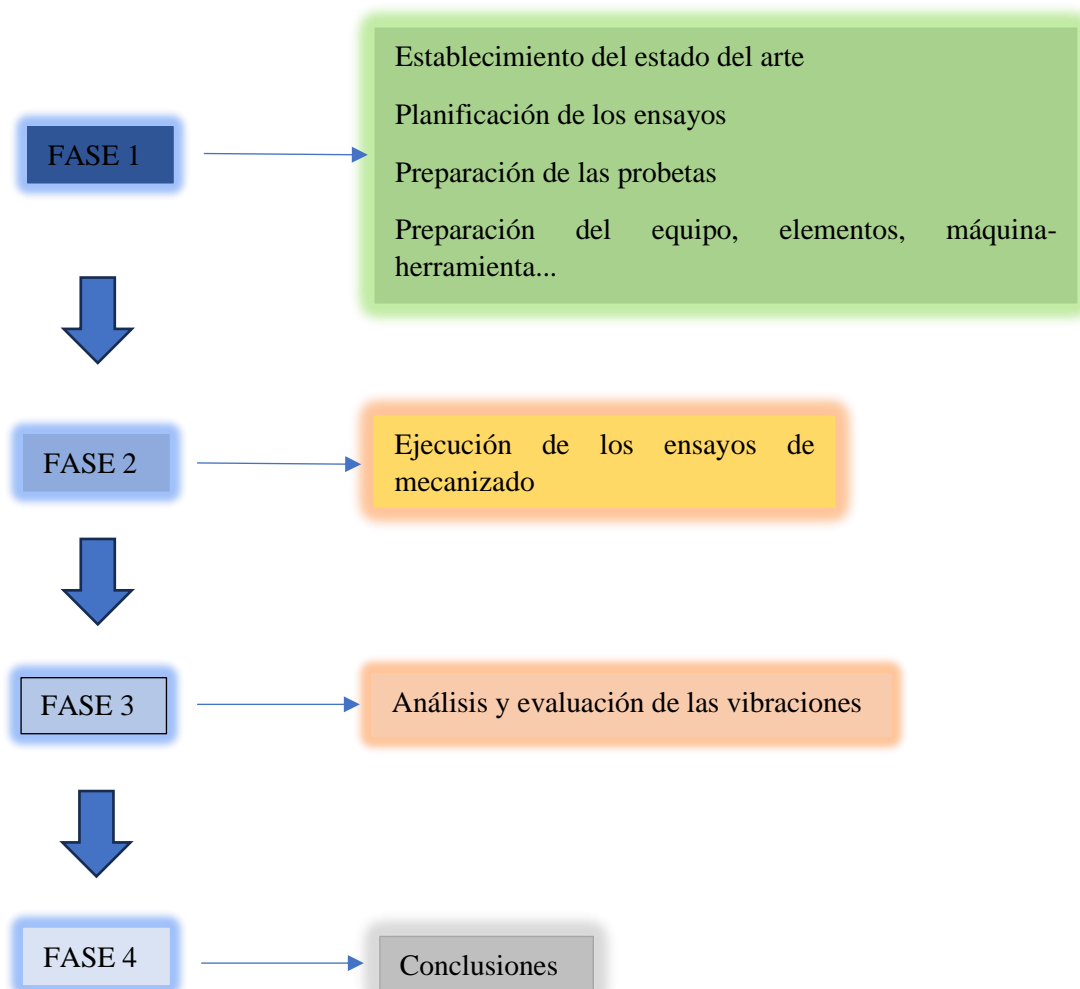
En la Figura 37. Esquema general de la metodología experimental., se muestra el esquema general de la metodología experimental usada. Dicha metodología se ha organizado de la siguiente forma:

- Fase 1 o Fase preliminar. Consiste en una fase anterior a la realización de los ensayos. Se pueden distinguir varias etapas:
  - Establecimiento del estado del arte de las vibraciones en el proceso de mecanizado, que se corresponde con lo expuesto en el capítulo 2.
  - Planificación para la realización de los ensayos. Esta etapa incluye la identificación y búsqueda de los materiales e instrumentos necesarios, valores de los parámetros de corte que se van a usar, dimensión y forma de las probetas...
  - Preparación de los ensayos. Consiste en la preparación de las probetas, las herramientas, las máquinas-herramientas, elementos auxiliares necesarios, elementos captadores de vibraciones (Vibrómetro láser), preparación del sistema de análisis de estas vibraciones (Dewesoft)...
  
- Fase 2. Ejecución de los ensayos de mecanizado:

- Creación del programa de CNC. Permitirá la realización de los diferentes ensayos modificando el valor de las variables de entrada al proceso.
- Montaje y configuración del Vibrómetro láser. Permitirá captar las vibraciones producidas en el proceso de corte para su posterior análisis.
- Configuración del sistema/software. Permitirá mostrar las señales obtenidas por el vibrómetro para su análisis.

- Fase 3. Análisis y evaluación de las vibraciones.
- Fase 4. Conclusiones.

Es necesario añadir que esta metodología experimental se ha basado en la metodología utilizada por otros investigadores, pertenecientes a la Universidad de Málaga, que están investigando los procesos de mecanizado en seco de diversas aleaciones ligeras de interés aeroespacial [1].



**Figura 37. Esquema general de la metodología experimental.**

### 3.1. Características técnicas del equipo

A continuación, se muestran el conjunto de elementos que forman el equipo, desde el propio vibrómetro hasta todas las conexiones necesarias entre los distintos dispositivos para el correcto funcionamiento (Figura 38).

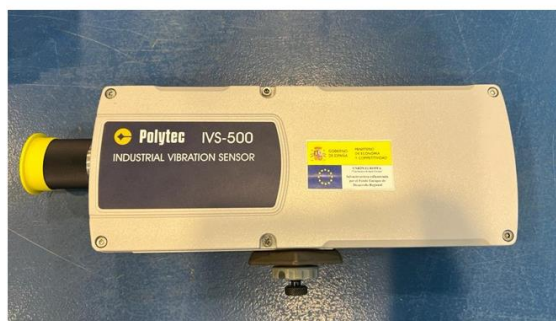


Figura 38. Elementos del equipo completo.

#### 3.1.1. Vibrómetro láser IVS-500

Vibrómetro láser monopunto de hasta 25 kHz en medidas sin contacto, de alta precisión y robusto, para ambientes industriales (Figura 39) [35].

Es el elemento emisor del láser, encargado de captar las vibraciones que se produzcan en el elemento en el que incide el haz. El funcionamiento de este dispositivo se explica en profundidad y con detalle en el apartado 2.4.



(a)



(b)

Figura 39. Vista lateral (a) y posterior (b) del Vibrómetro láser IVS-500.

**Tabla 1. Conexiones principales**

<b>Tensión de funcionamiento</b>	<b>11 V CC... 14,5 V CC</b>
<b>Corriente de funcionamiento</b>	<b>Máx. 1,4 A</b>
<b>Entrada de potencia</b>	<b>Máx. 15 W</b>

**Tabla 2. Condiciones ambientales**

<b>Temperatura de funcionamiento</b>	<b>+5... +40 °C</b>
<b>Temperatura de almacenamiento</b>	<b>-10... +65 °C</b>
<b>Altura de funcionamiento</b>	<b>Máx. 3048 m</b>
<b>Humedad del aire</b>	<b>Máx. 80% sin condensación</b>

**Tabla 3. Calibración**

<b>Intervalo de calibración recomendado</b>	<b>2 años</b>
<b>Frecuencia máxima</b>	<b>25 kHz</b>

**Tabla 4. Carcasa**

<b>Dimensiones</b>	<b>Ver Figura 40</b>
<b>Modelo</b>	<b>Basic</b>
<b>Versión</b>	<b>BM</b>
<b>Tipo de protección</b>	<b>IP64 (según EN 60529)</b>
<b>Peso</b>	<b>3.1 kg</b>

Dimensiones sin especificación en mm

A : Visibilidad a máxima a  $53 + n * 138$  mm ( $n=0; 1; 2; \dots$ )  
 B : Haz  
 C : Distancia de trabajo

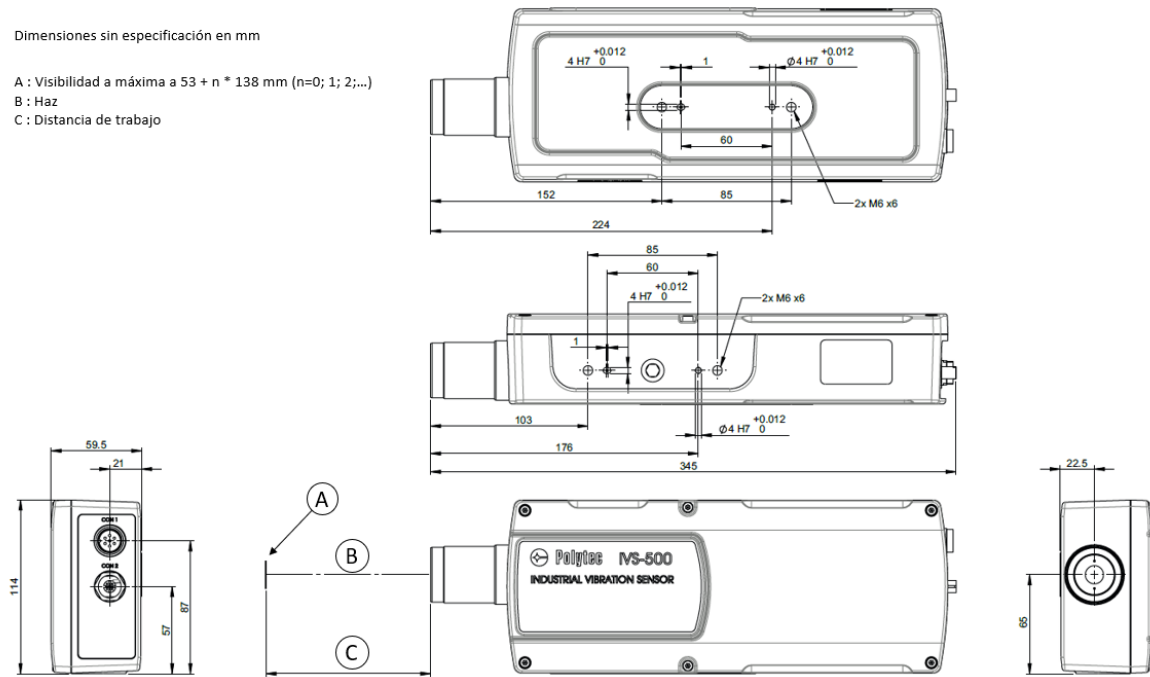


Figura 40. Dimensiones Vibrómetro Láser IVS-500. Imagen adaptada de [35].

### 3.1.2. Caja de conexiones IVS-E-500 (JUNCTION BOX)

Elemento de unión de conexiones de diferentes elementos como el propio vibrómetro láser y el indicador de nivel de señal. Además, debe estar conectada a la corriente (Figura 41).



(a)



(b)

Figura 41. Vista frontal y posterior (a) y vista superior (b) de la caja de conexiones.

**Tabla 5. Conexiones principales de la caja de conexiones**

<b>Tensión de red</b>	<b>100... 200 VCA <math>\pm</math>10%, 50/60 Hz</b>
<b>Entrada de potencia</b>	<b>Máx. 20 W</b>
<b>Fusible de red (interno)</b>	<b>2,0 A/lento</b>

**Tabla 6. Condiciones ambientales**

<b>Temperatura de funcionamiento</b>	<b>+5... +40 °C</b>
<b>Temperatura de almacenamiento</b>	<b>-10... +65 °C</b>
<b>Humedad del aire</b>	<b>Máx. 80% sin condensación</b>

**Tabla 7. Carcasa de la caja de conexiones**

<b>Dimensiones</b>	<b>Ver figura XX</b>
<b>Tipo de protección</b>	<b>IP40 (según EN 60529)</b>
<b>Peso</b>	<b>1 kg</b>

### 3.1.3. Indicador de nivel de señal

Como su propio nombre indica, se encarga de marcar el nivel de señal que capta el vibrómetro en el momento. Como se puede observar en la Figura 42 la franja central es la que se ilumina con luz verde según, como se ha dicho, del nivel de señal captado. A mayor altura de iluminación de esta franja de leds, mejor nivel de señal.



**Figura 42. Indicador de nivel de señal.**

**Tabla 8. Indicador**

<b>Barras LED</b>	<b>20 puntos, logarítmico aprox. 2dB/punto</b>
-------------------	--

**Tabla 9. Condiciones ambientales**

<b>Temperatura de funcionamiento</b>	<b>+5... +40 °C</b>
<b>Temperatura de almacenamiento</b>	<b>-10... +65 °C</b>
<b>Humedad del aire</b>	<b>Máx. 80% sin condensación</b>

**Tabla 10. Carcasa del indicador de señal**

<b>Dimensiones</b>	<b>60 mm x 100 mm x 40 mm</b>
<b>Tipo de protección</b>	<b>IP64 (según EN 60529)</b>
<b>Peso</b>	<b>0,3 kg</b>

**Tabla 11. Cable del indicador de señal**

<b>Longitud de cable</b>	<b>2 m</b>
<b>Conector para cables</b>	<b>Conector redonde de 4 pines (M12)</b>

#### **3.1.4. SIRIUS HS 8xACC**

Amplificador de señal con 8 puertos de conexión ACC (Figura 43). Es un sistema de adquisición de datos (DAQ) USB y EtherCAT (Ethernet para el Control de Tecnología de Automatización). Cuenta con un rango dinámico de 160 dB, es decir, aumenta los ADC en cada canal analógico consiguiendo este rango de 160 dB en el dominio de tiempo y frecuencia con una frecuencia de muestreo de 200 kHz por canal [36]. Para aclarar lo anterior comentado, el ADC (Analog-Digital Converter en inglés) es un dispositivo que sirve para convertir una señal analógica, ya sea de corriente o de tensión, en una señal digital, con el fin de facilitar su estudio y hacer que esta señal digital sea resistente a otras interferencias como el ruido, a las que las señales analógicas son más sensibles [37].



(a)



(b)

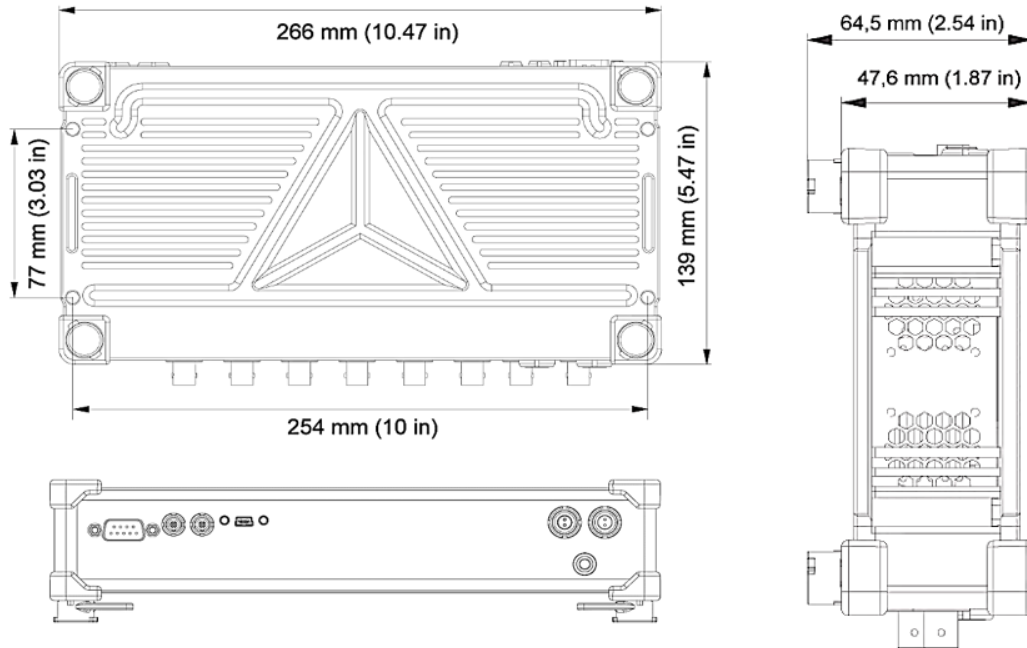
**Figura 43. Vista frontal y posterior (a) y vista superior (b) del amplificador de señal SIRIUS HS 8xACC.**

**Tabla 12. Alimentación del amplificador**

<b>Fuente de alimentación</b>	<b>9-36 V DC</b>
-------------------------------	------------------

**Tabla 13. Condiciones ambientales**

<b>Temperatura de funcionamiento</b>	<b>-10... +50 °C</b>
<b>Temperatura de almacenamiento</b>	<b>-40... +85 °C</b>
<b>Humedad del aire</b>	<b>5%...95% sin condensación</b>



**Figura 44. Dimensiones del amplificador SIRIUS. Imagen adaptada de [38].**

### 3.1.5. Conexiones entre dispositivos. Cableado.

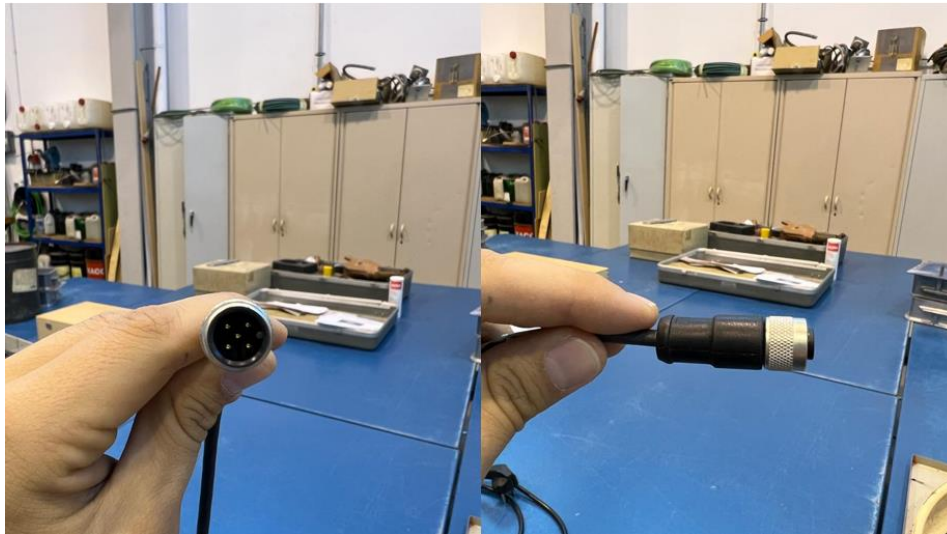
#### 3.1.5.1. Cable de conexión principal IVS-C-500



**Figura 45. Cable de conexión principal IVS-C-500.**

Cable con conector redondo de 7 pines, conectado al puerto “CON 1” en la parte posterior del vibrómetro láser y al “CON “en la parte posterior de la caja de conexiones (Figura 45).

### 3.1.5.2. Cable de conexión de serie IVS-C-520



**Figura 46. Cable de conexión de serie IVS-C-520.**

Cable con clavija redonda de 5 pines, conectado al puerto CON 2 en la parte posterior del vibrómetro láser y al CON 2 en la parte posterior de la caja de conexiones (Figura 46).

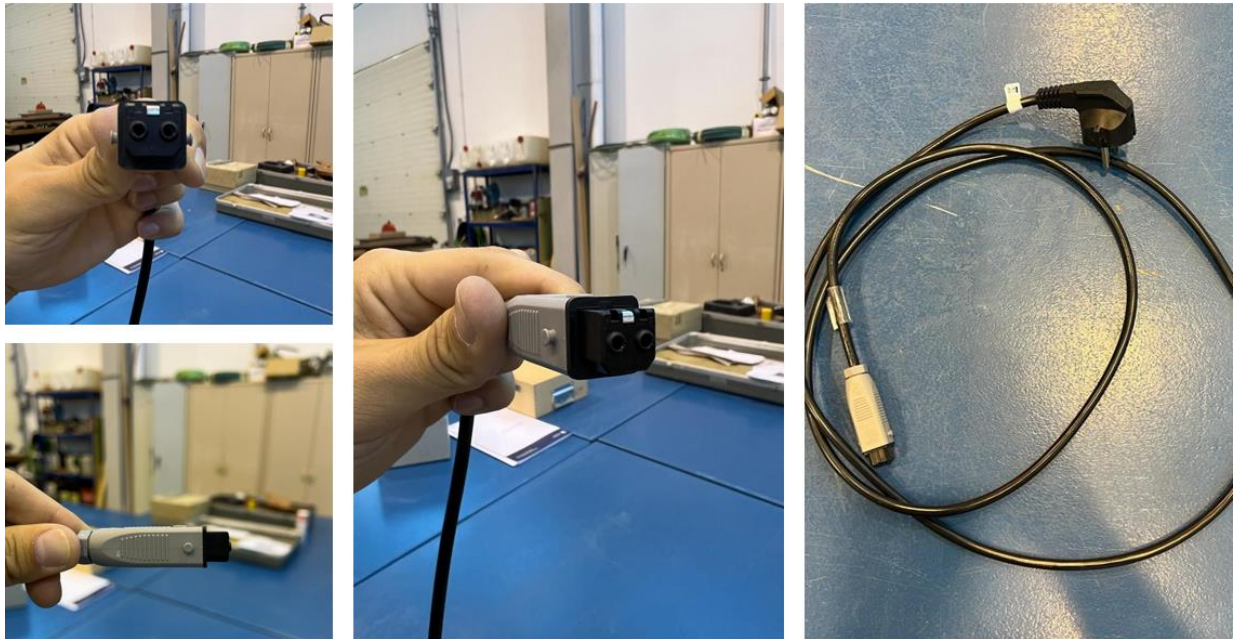
### 3.1.5.3. Cable de conexión del indicador de señal IVS-A-510



**Figura 47. Cable de conexión del indicador de señal IVS-A-510.**

Cable con clavija redonda de 4 pines, conectado al puerto “SIGNAL DISPLAY” de la parte posterior de la caja de conexiones (Figura 47).

### 3.1.5.4. Cable de entrada de tensión de red de la caja de conexiones



**Figura 48. Cable de entrada de tensión de red de la caja de conexiones.**

Cable con conector de montaje de 3 pines, conexión principal “POWER” de la caja de conexiones a la entrada de tensión de red diseñada como entrada de rango amplio (Figura 48).

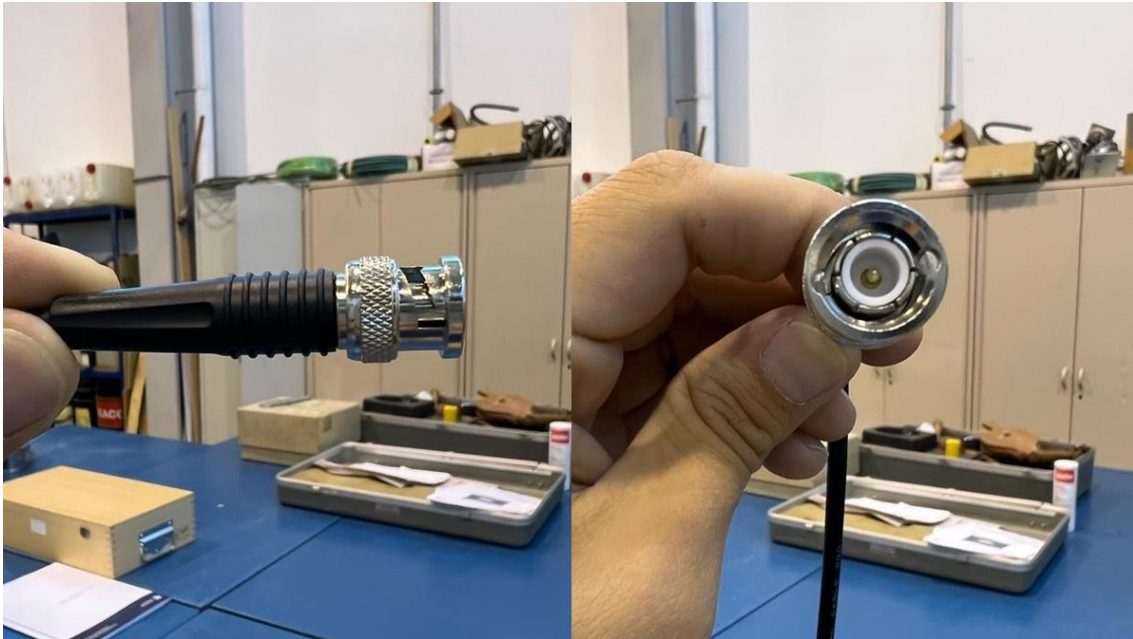
### 3.1.5.5. Interfaz USB (Universal Serial Bus, tipo B)



**Figura 49. Interfaz USB (Universal Serial Bus, tipo B) y USB a PC.**

Cable de conexión entre la caja de conexiones (USB tipo B) a PC (USB tipo A) (Figura 49).

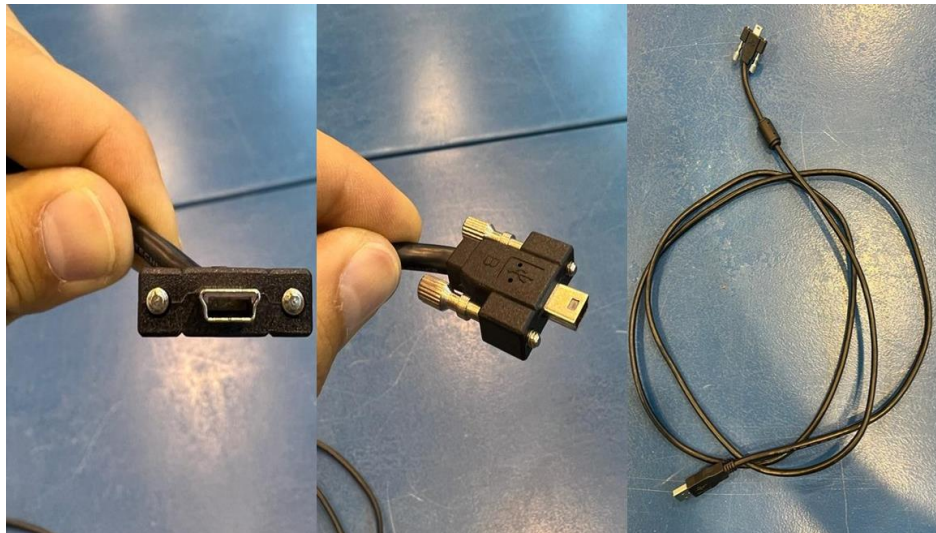
### 3.1.5.6. Cable de conexión entre la caja de conexiones y el amplificador



**Figura 50. Cable de conexión entre la caja de conexiones y el amplificador de señal SIRIUS HS.**

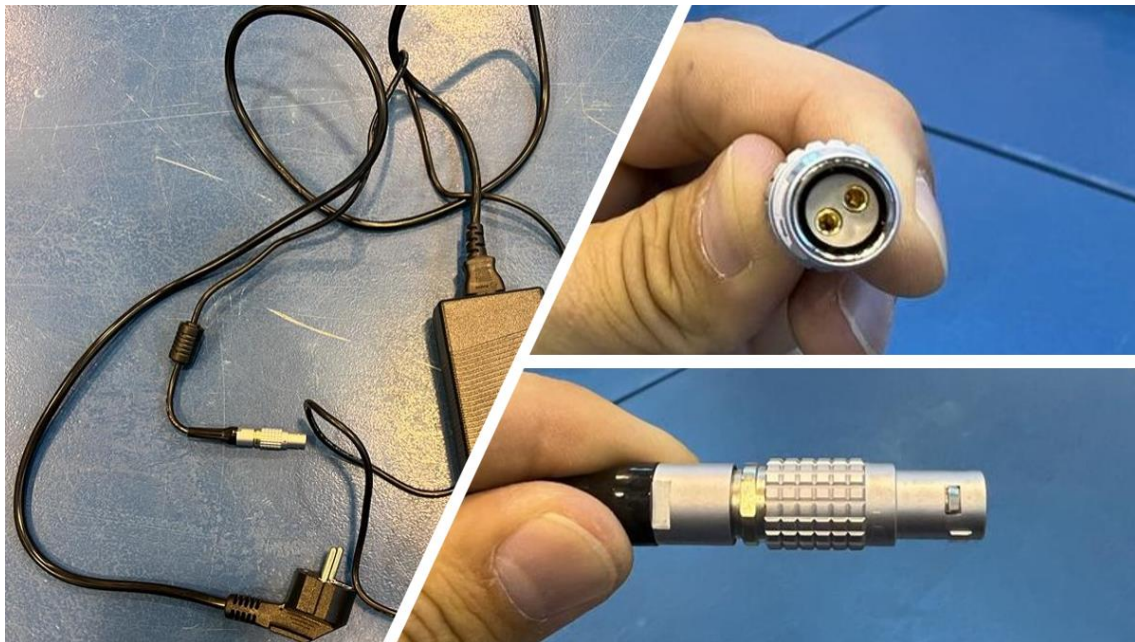
Cable con clavija BNC, entre la salida “VELOCITY” de la caja de conexiones al amplificador SIRIUS HS a la entrada 1 ACC (Figura 50).

### 3.1.5.7. Interfaz USB (tipo B-mini)



**Figura 51. Cable de conexión entre el amplificador SIRIUS (USB tipo B-mini) al PC (USB tipo A).**

### 3.1.5.8. Cable de entrada de tensión de red al amplificador SIRIUS



**Figura 52. Cable de toma de corriente del amplificador de señal.**

## 3.2. Configuración del equipo

Una vez comentadas las características técnicas y su función de los diferentes elementos que componen el equipo completo, ahora se explicará el montaje de dicho equipo para el correcto funcionamiento.

En primer lugar, se recomienda colocar los dispositivos cerca de la zona de trabajo, es decir, junto al PC y la toma de corriente a la que serán conectados los elementos. Una vez estén colocados, se comenzará con la conexión de los dispositivos con sus respectivos cables como se ha explicado anteriormente. Para mayor comodidad a la hora de conectar el vibrómetro con el resto de los dispositivos es aconsejable colocarlo en el trípode antes de realizar las conexiones ( Figura 53).



**Figura 53. Trípode y soporte del Vibrómetro**

El soporte donde va anclado el vibrómetro tiene dos pestañas de seguridad que se deberán accionar para que la fijación al trípode sea correcta. A continuación, se explica de forma sencilla cómo se debe proceder siguiendo los pasos de la Figura 54:

1. Se identifican las dos pestañas de anclaje.
2. Como se puede observar, la pestaña superior se gira hacia abajo a la vez que se debe presionar la pestaña inferior.
3. Al realizar el paso anterior, “saltará” una pequeña pestaña de color dorado que será el “clic” de anclaje que hará saltar la pestaña superior en cuanto se coloque el vibrómetro, fijando este al soporte.
4. Así deben quedar posicionadas las pestañas antes de la colocación del vibrómetro.
5. Finalmente, el vibrómetro debe quedar colocado como se muestra en la Figura 55.



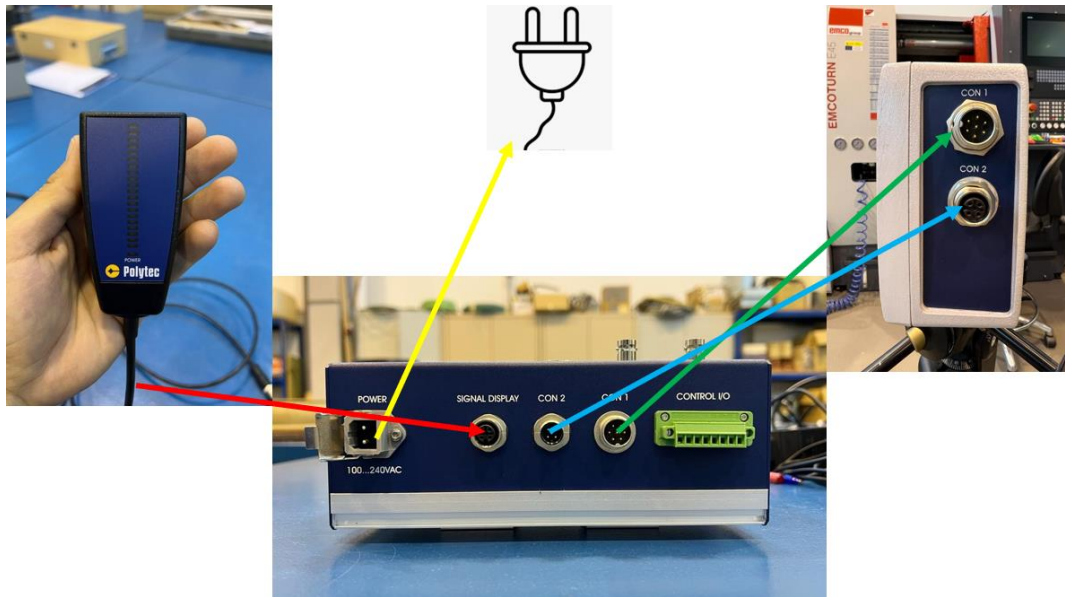
**Figura 54. Preparación del soporte del trípode para la correcta fijación del vibrómetro.**



**Figura 55. Vibrómetro fijado en el soporte del trípode.**

Como se observa en la Figura 56, con el cableado que se ha mostrado en el apartado anterior, se conectan los siguientes elementos del equipo.

1. El indicador de nivel de señal se conecta a la caja de conexiones al puerto “SIGNAL DISPLAY”.
2. En la parte posterior del vibrómetro se encuentran dos puertos de conexión, “CON1” y “CON 2”, que se deberán conectar, con sus respectivos puertos, en la parte posterior de la caja de conexiones.
3. Por último, la toma de corriente de la caja de conexiones se conectará al puerto “POWER” de esta.



**Figura 56. Conexiones Vibrómetro - Caja de conexiones - Indicador de nivel de señal.**

Una vez conectados estos elementos, se procederá a conectar, como podemos ver en la Figura 57 la caja de conexiones al amplificador, éste a la corriente, y ambos al PC:

1. Se conecta el puerto USB de la caja de conexiones a un puerto USB tipo A del PC.
2. La salida de la caja de conexiones “VELOCITY” se conecta al puerto “1 ACC” del amplificador que se encuentra en la parte frontal de este.
3. Al igual que se ha realizado con la caja de conexiones, se conecta el puerto USB del amplificador, que se encuentra en su parte posterior, al puerto USB del PC.
4. Finalmente, se conecta el amplificador en el puerto “IN”, en su parte posterior, a la corriente.

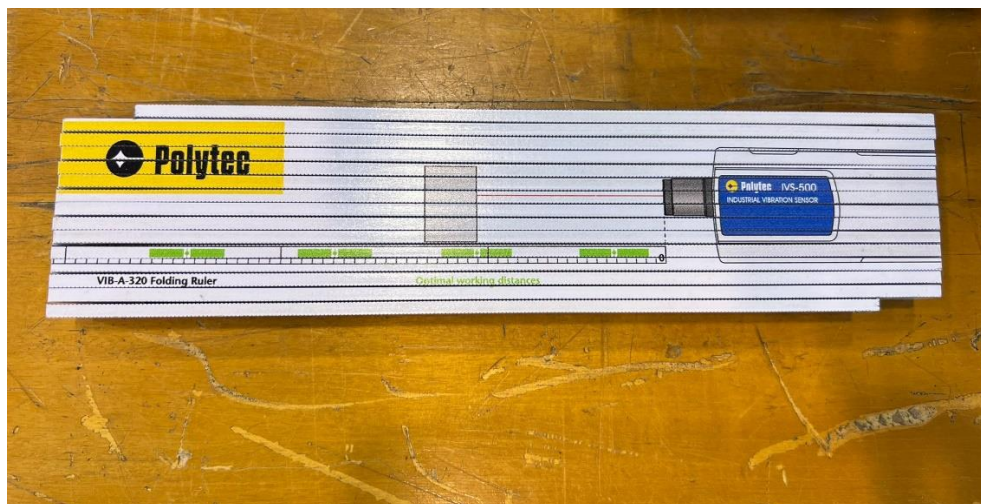


**Figura 57. Conexiones PC – Amplificador - Caja de conexiones - corriente.**

Una vez se haya hecho el montaje del equipo y el cableado entre los elementos como se ha indicado, se procede al encendido y comprobación de que funciona correctamente. Por lo que un resumen general del proceso sería:

- 1) Montaje: Preparación y conexión de todos los elementos con el cableado especificado.
- 2) Encendido: Se conecta la caja de conexiones pulsando el interruptor “POWER ON/OFF” que se encuentra en la parte superior. Una vez pulsado, en la parte frontal, se debe iluminar el indicador de estado “POWER”, que indica que la caja de conexiones se encuentra operativa. También, en el indicador de señal se ilumina el indicador de estado “POWER”, que indica que tanto el indicador de nivel de señal como el IVS están operativos. Además, en la parte delantera de la caja de conexiones, se ilumina el indicador de estado “LASER ON” que indica que el rayo láser sale del vibrómetro láser.
- 3) Comprobación: Se dirige la abertura del IVS hacia una superficie de prueba de color blanco mate, por ejemplo, una hoja de papel, colocando la superficie de prueba a unos 2 cm del objetivo del vibrómetro. Se enfoca el rayo láser girando (a izquierda o a derecha) el enfoque del IVS hasta conseguir que el punto de incidencia del láser sea lo más nítido posible y que el indicador de nivel de señal se ilumine. Si este se ilumina, indica que la óptica y la sección de entrada electrónica funcionan perfectamente.

Tras tener el equipo completo preparado, es muy importante la distancia de colocación del vibrómetro láser con respecto al lugar de incidencia (objeto a estudiar). Para ello se tiene un metro desplegable proporcionado por Polytec donde se indica la distancia correcta a colocar el sensor para obtener el mayor nivel de señal y de mayor calidad. Como se muestra en la Figura 58, la distancia entre la apertura del sensor (salida del láser) y la del objeto a estudiar, debe coincidir con las zonas verdes del metro, tanto la salida del láser como el lugar de incidencia (Figura 59).



**Figura 58. Metro para la colocación correcta del vibrómetro.**

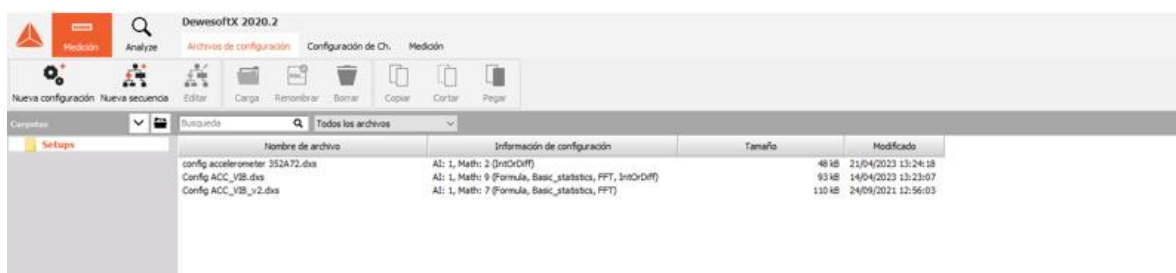


**Figura 59. Distancia correcta de colocación de acuerdo con las marcas verdes.**

### 3.3. Monitorización del proceso

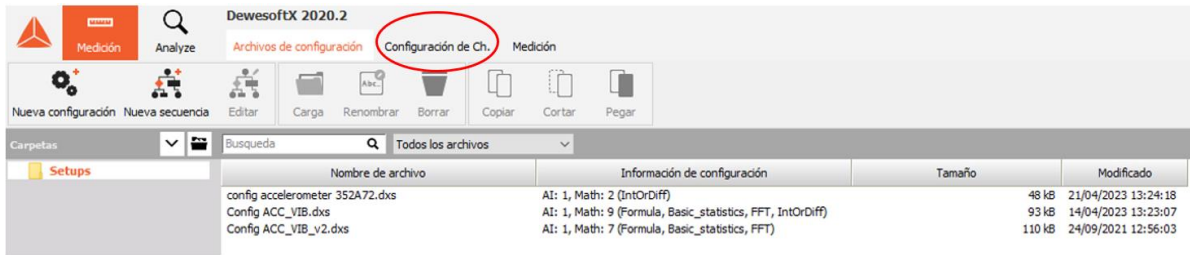
Una vez se tenga el montaje del equipo y se haya hecho la comprobación como se ha indicado anteriormente, se puede proceder con la puesta a punto del software que se va a utilizar para la toma y análisis de datos. A continuación, se va a explicar la forma de hacer la configuración del software (DewesoftX) enfocada, en este caso, a lo que se va a necesitar más adelante para el análisis de vibraciones en un proceso de mecanizado con un torno.

Al iniciar el programa Dewesoft, aparecerá la siguiente pantalla (Figura 60):



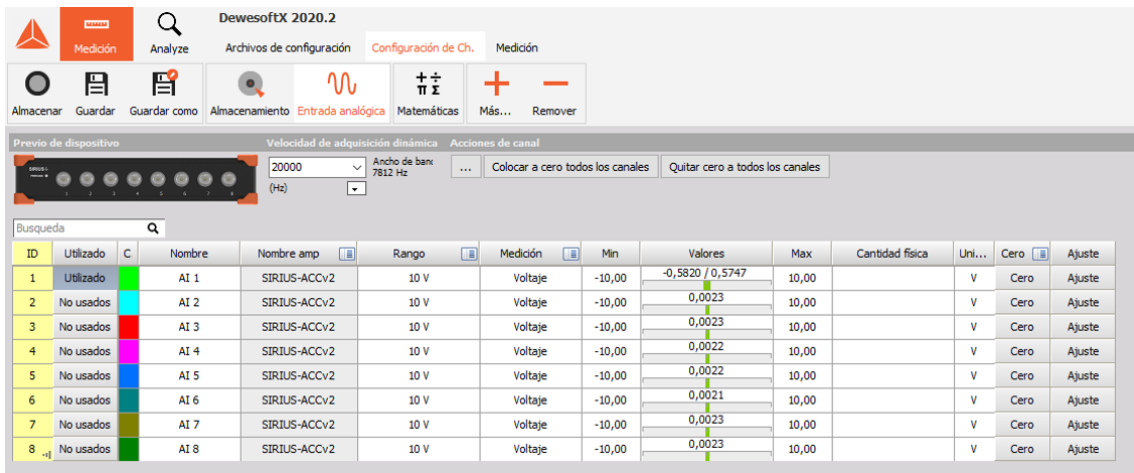
**Figura 60. Pantalla al iniciar el programa.**

Esta es la pantalla de inicio, donde comenzaremos configurando el canal que se va a usar, que en este caso se trata del vibrómetro láser IVS 500, por lo que se clicca en “Configuración de canal” como se puede ver en la Figura 61:



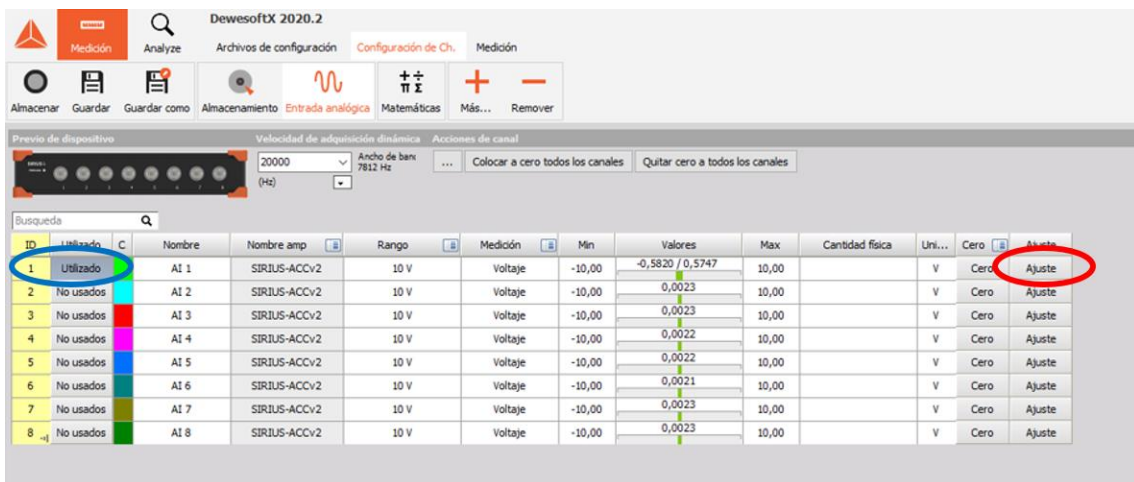
**Figura 61. Acceso a configuración del canal.**

Apareciendo todos los canales que estarían disponibles según el amplificador del que se disponga. Como se puede ver en la Figura 62 aparecen 8 canales disponibles, pero solo se usará en este caso uno de ellos.



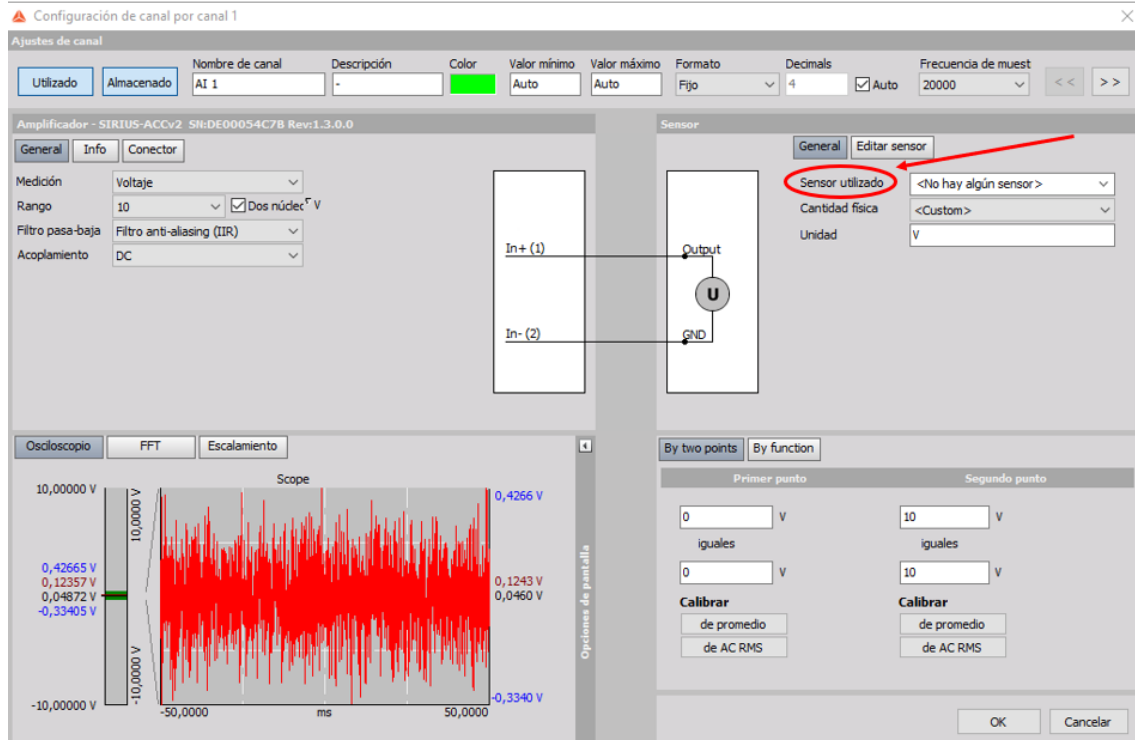
**Figura 62. Opciones de selección de canal.**

Una vez aquí, configuramos el canal “Utilizado” para poner las unidades de medición deseadas que serán las que se muestren en el momento de analizar los datos. Se clic en “Ajuste” del canal 1, que es el que se está utilizando en este caso, como se observa en la Figura 63:



**Figura 63. Acceso al canal seleccionado.**

Al clicar en “Ajuste” aparecerá la siguiente ventana emergente (Figura 64):



**Figura 64. Pantalla de configuración del canal seleccionado.**

Aquí se seleccionará el vibrómetro IVS 500 en el apartado de “Sensor utilizado”, ya que, seleccionándolo aparecerá la configuración que ha sido previamente modificada por un técnico cualificado. En caso de que no se haya hecho previamente, se deberá clicar en “Editar sensor” donde se pondrán los datos requeridos en los apartados de dicha sección como son: el número de serie del instrumento, modelo, fabricante... Como podemos ver en la Figura 65.

También, en la esquina inferior derecha, en el apartado “By two points” se debe establecer la relación entre la velocidad y el voltaje, es decir, la velocidad a la que equivale la señal de voltaje recibida. En este caso, la señal mínima sería 0 V que serían 500 mm/s y, la señal máxima, 10 V, lo que indicaría una velocidad de vibración del objeto a estudiar de 1750 mm/s (Figura 65).

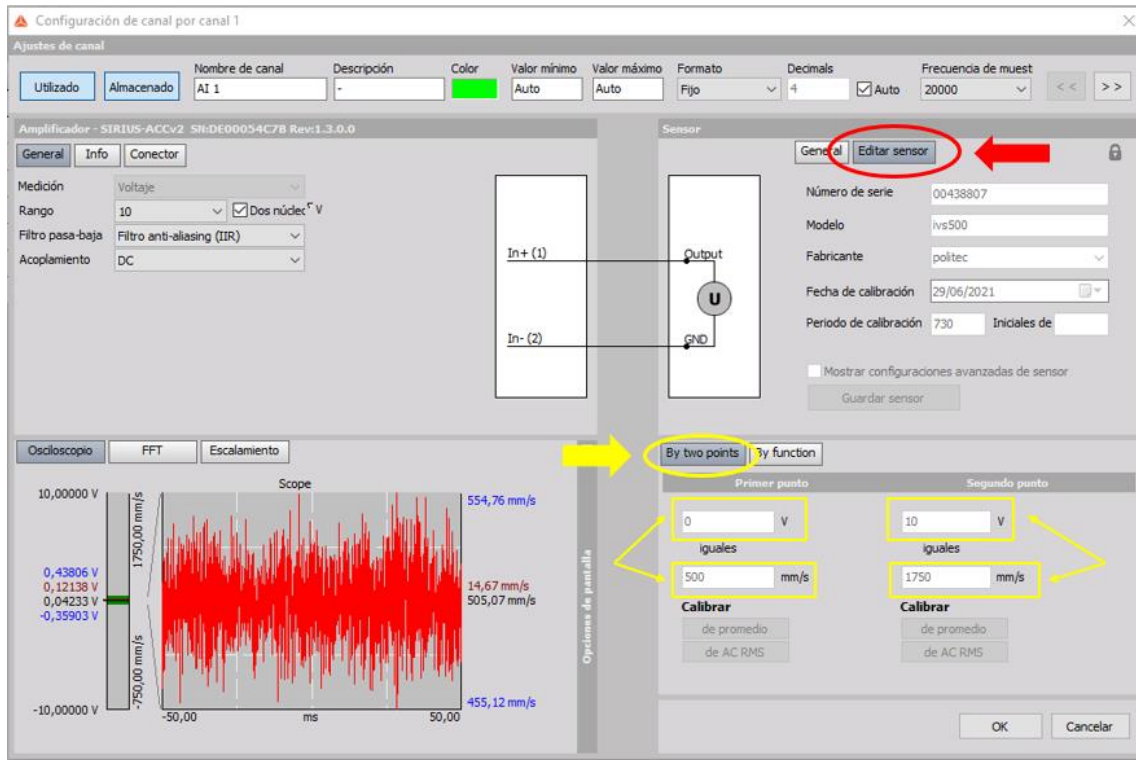


Figura 65. Edición del sensor y configuración.

Debiendo quedar, la ventana emergente, con la siguiente configuración, sin olvidar seleccionar como unidad de velocidad el mm/s como se muestra en la Figura 66:

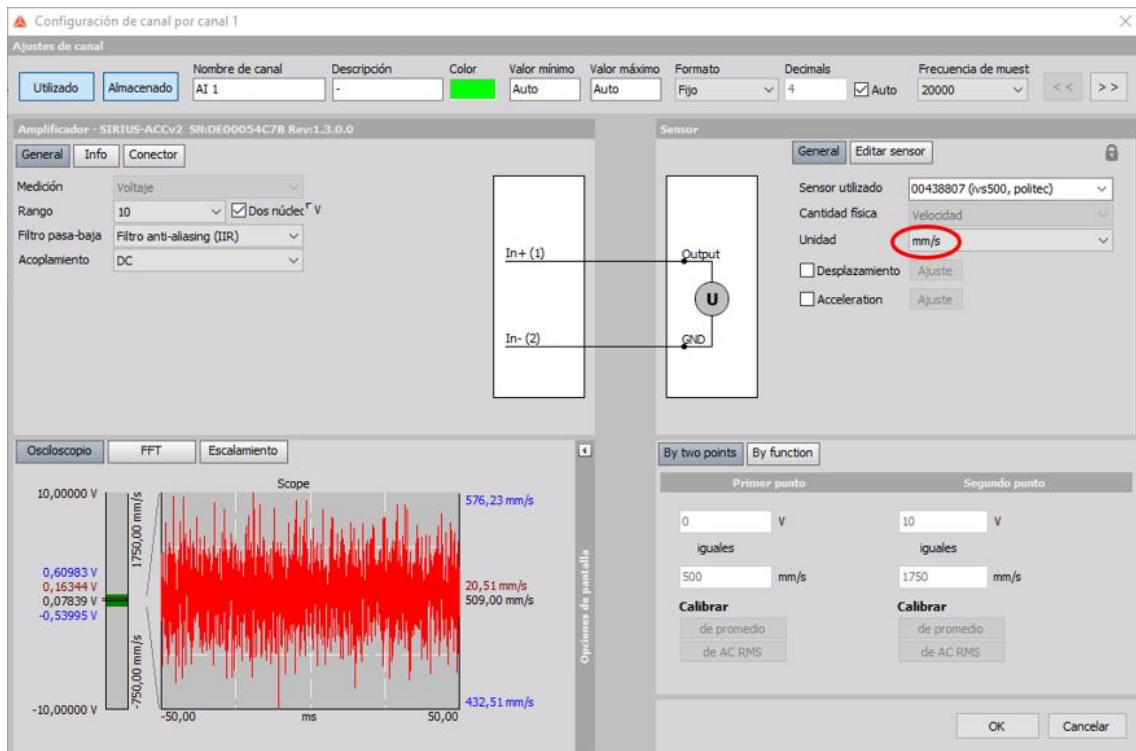
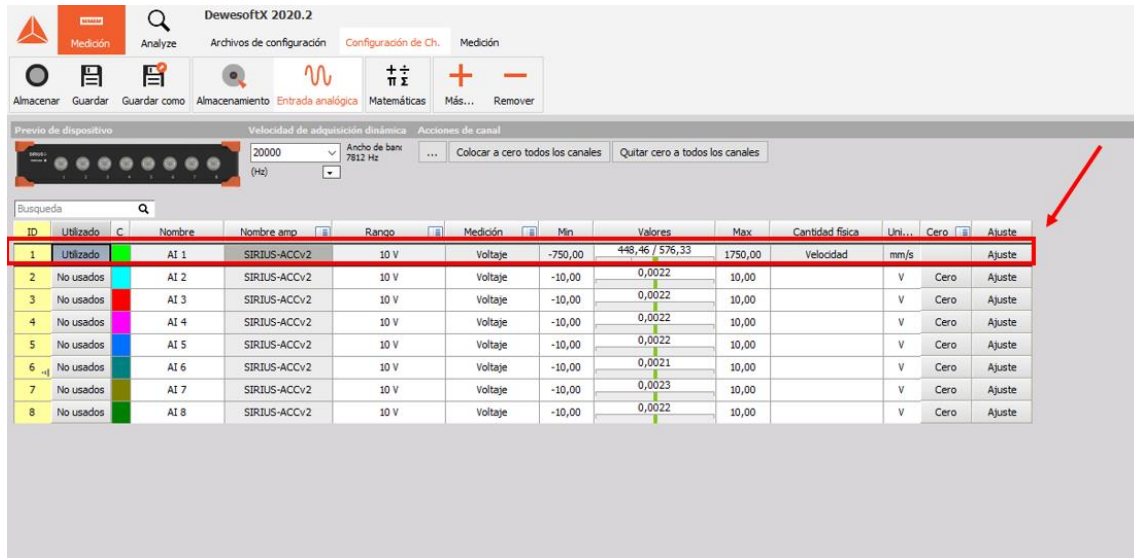


Figura 66. Continuación del proceso de configuración del canal.

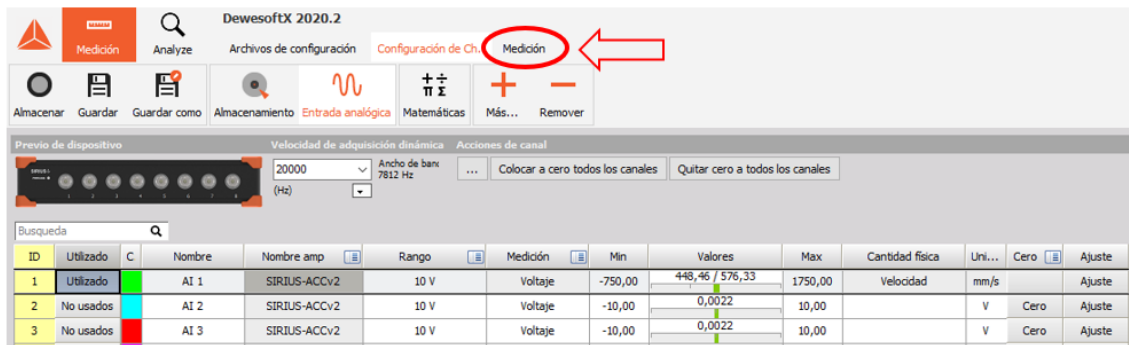
Tras esto, se clicla “OK” confirmando la configuración y volviendo a la ventana donde aparecen todos los canales disponibles. Debe aparecer el canal que se haya configurado de la siguiente manera, como se muestra en la siguiente imagen (Figura 67):



**Figura 67. Pantalla final de la configuración del canal.**

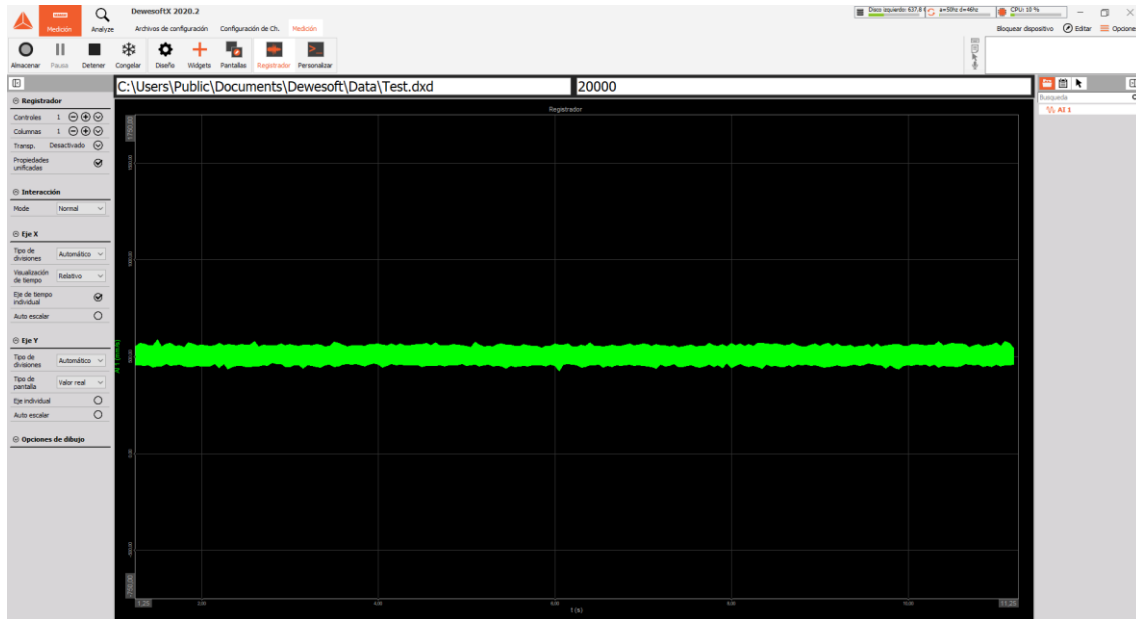
Una vez finalizados estos pasos iniciales y la puesta a punto del equipo completo, se podría comenzar con la medición, pero antes, se va a mostrar como configurar la ventana de análisis de la señal en función de lo que se vaya a necesitar. En este caso, para el análisis de las vibraciones en un proceso de mecanizado en torno, se hará de la siguiente forma:

- Se clicla en “Medición”, como si se fuese a comenzar el análisis (Figura 68).



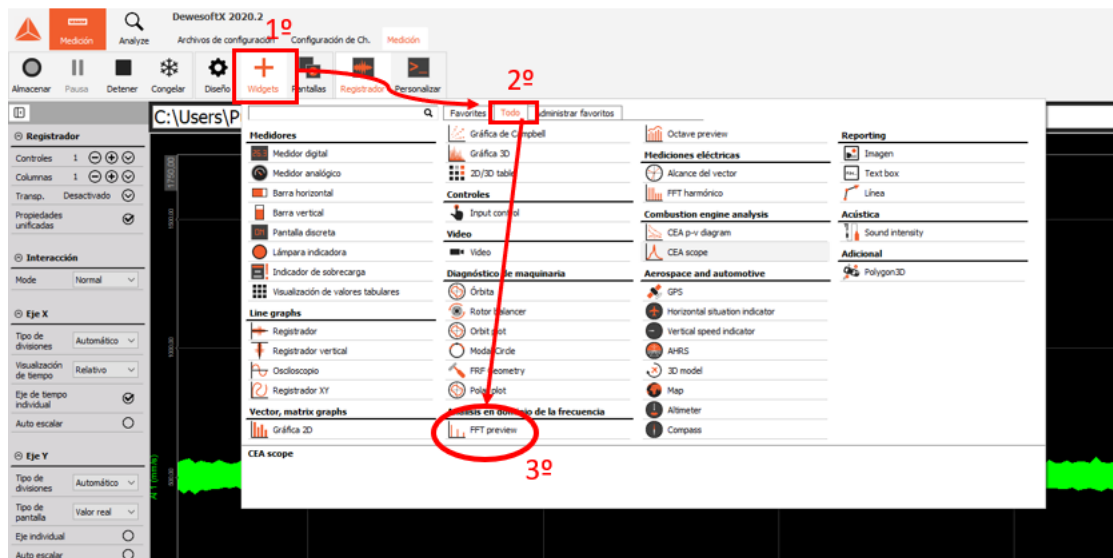
**Figura 68. Inicio de un análisis cualquiera.**

- Se mostrará la ventana de gráficas de la señal recibida, la cual se va a configurar en función de la necesidad (Figura 69).



**Figura 69. Pantalla inicial de gráficas de señal.**

- A continuación, se va a organizar y personalizar, como se ha dicho anteriormente, en función de los requerimientos del análisis futuro. En este caso, además de la ventana gráfica inicial denominada Registrador, donde se muestra la señal en función de la velocidad (mm/s) y el tiempo en milisegundos (ms) o segundos (s), será esencial tener la gráfica FFT que mostrará la señal en el dominio de la frecuencia. Se clic en “Widgets” y en la ventana que emerge, se clic en “Todo”, donde aparecerán todas las ventanas y opciones disponibles. Como se ha dicho, será necesario tener la ventana de la gráfica FFT, por lo que se selecciona “FFT preview”, como se muestra en la Figura 70.



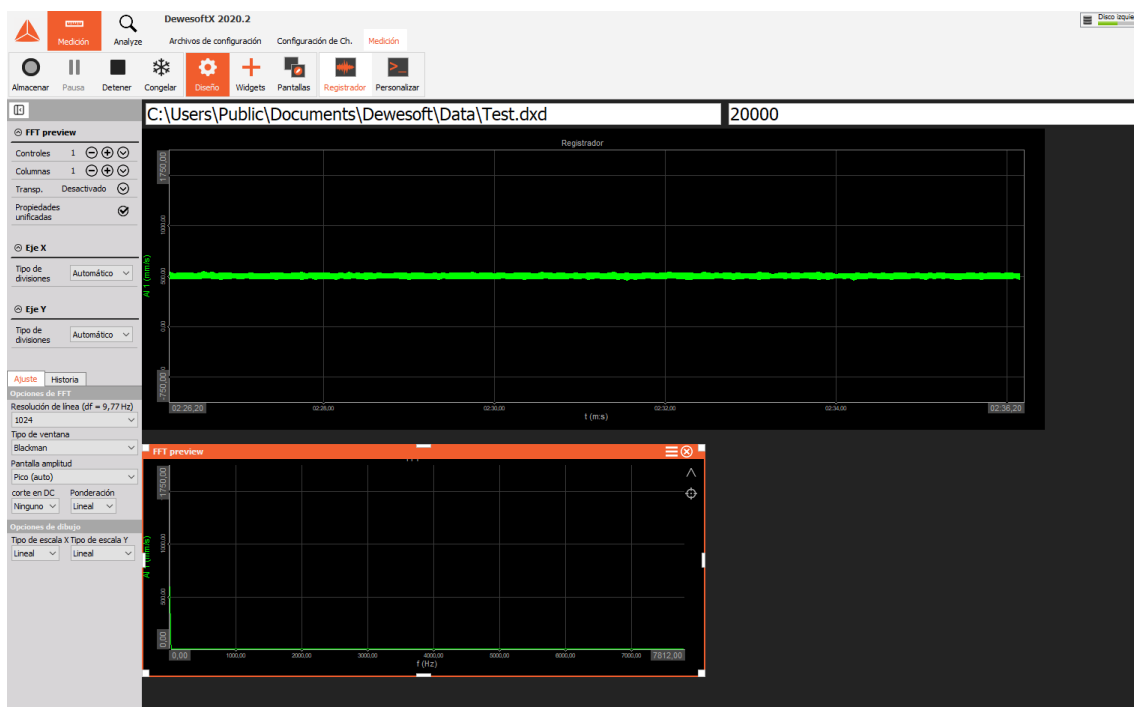
**Figura 70. Proceso de acceso a una gráfica FFT.**

- Tras esto, aparecerán 2 ventanas gráficas, las cuales se pueden desplazar y, ampliar o reducir su tamaño a gusto del técnico. Quedando en este caso, por ejemplo, como se muestra en la Figura 71.

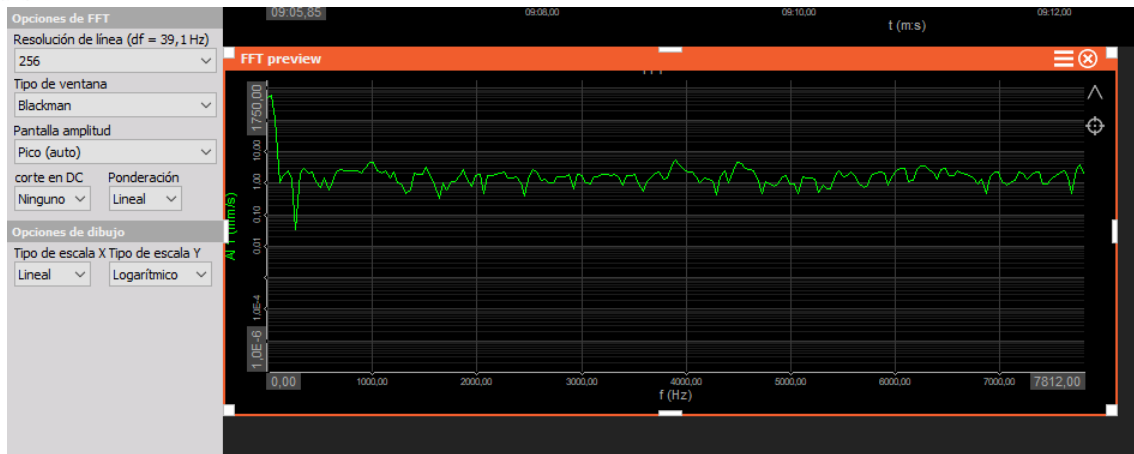


**Figura 71. Pantalla tras añadir la gráfica FFT.**

- Se configura la ventana gráfica FFT para obtener los datos en las unidades deseadas. Para ello, se clicca encima de dicha ventana debiéndose poner de color naranja (Figura 72), lo que indica que se ha accedido correctamente a ella y aparecerá a su izquierda, una ventana de configuración como se muestra en la Figura 73:



**Figura 72. Correcta selección de la ventana gráfica FFT mostrando el color naranja.**

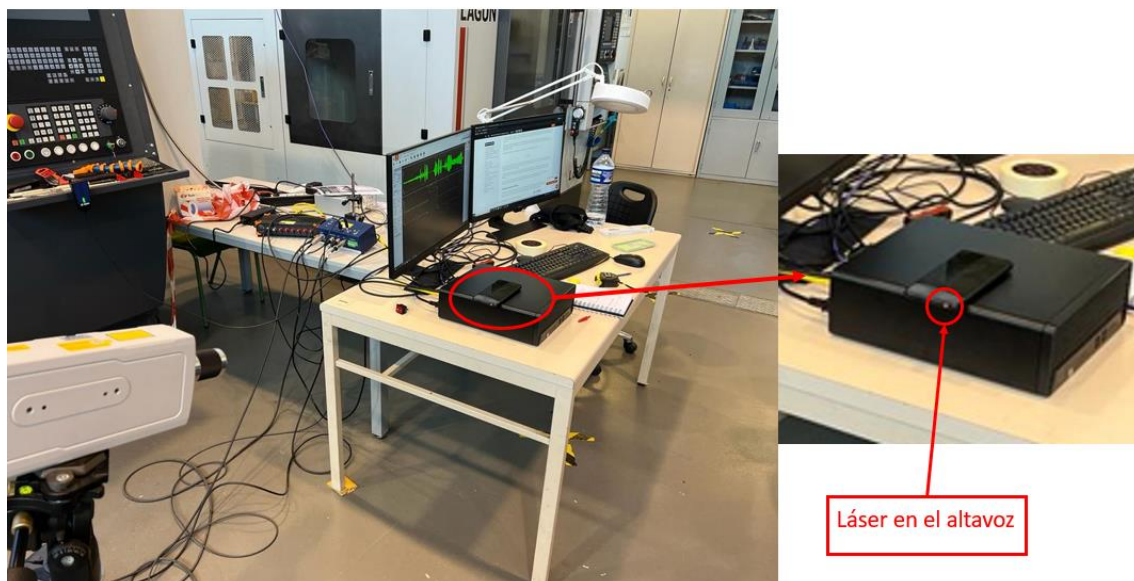


**Figura 73. Columna de configuración de la gráfica seleccionada.**

- Siendo esta configuración mostrada, en la Figura 73, una posible. Es necesario aclarar, que lo más común a la hora de analizar vibraciones es usar en “pantalla amplitud”, RMS. Es importante que los valores límite de los ejes sean coherentes con el rango de los resultados que se desean o que se esperan obtener. Si se desean cambiar estos límites, basta con clicar sobre ellos y escribir el deseado.

Ya se podría comenzar con el análisis, pero antes de hacer un ensayo real, se va a comprobar que los datos recogidos por el vibrómetro y el funcionamiento del equipo completo, tanto el hardware como el software, son correctos. Para ello, usando un dispositivo móvil con una aplicación la cual emite la frecuencia deseada por el altavoz, se ha podido comprobar que los datos obtenidos con el equipo son coherentes. A continuación, se explica de forma más detallada.

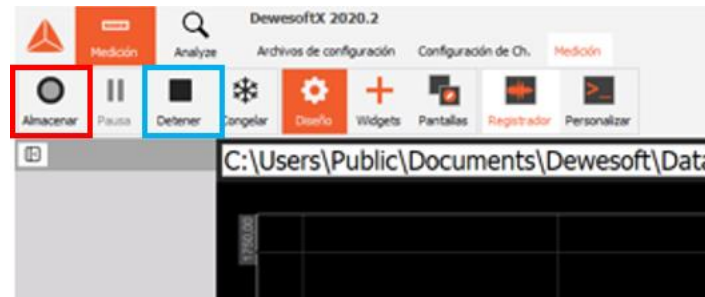
Con el equipo montado y listo para la medición, se colocó un teléfono móvil sobre una mesa y se dirigió el láser del vibrómetro hacia el altavoz del dispositivo móvil, con el fin de que, cuando con la aplicación se le indicara al dispositivo que emitiese una determinada frecuencia, se pudiese medir la vibración de la membrana del altavoz, la cual vibraría a dicha frecuencia, como se muestra en la Figura 74.



**Figura 74. Montaje para la comprobación de que la toma de datos es correcta.**

Una vez que se tuvo la disposición mencionada, se comenzó con la medición de la siguiente forma:

- Al igual que si fuese un ensayo real, en la ventana donde se encuentran las gráficas mostrando la señal, se clic en “Almacenar” como se muestra en la Figura 75, para comenzar a grabar el proceso en el tiempo de la señal captada por el vibrómetro, para posteriormente poder analizar detenidamente cada fracción deseada de la señal. Y se clic en “Detener” para finalizar la grabación.



**Figura 75. Procedimiento para grabar la señal captada.**

- Tras este paso, aparecerá la ventana donde se podrá analizar cada parte que se desee (y se haya grabado) de la señal captada, como se muestra en la Figura 76 por ejemplo.



**Figura 76. Ventana general de las gráficas de la señal captada.**

- Con los botones de la esquina superior izquierda y arrastrando la línea de color amarillo de la gráfica completa (que es la que muestra la señal grabada en su totalidad), se puede concretar la zona que se desea analizar y, avanzar, detener o cambiar la velocidad a la que el cursor (línea amarilla mencionada) recorre la grabación (Figura 77).

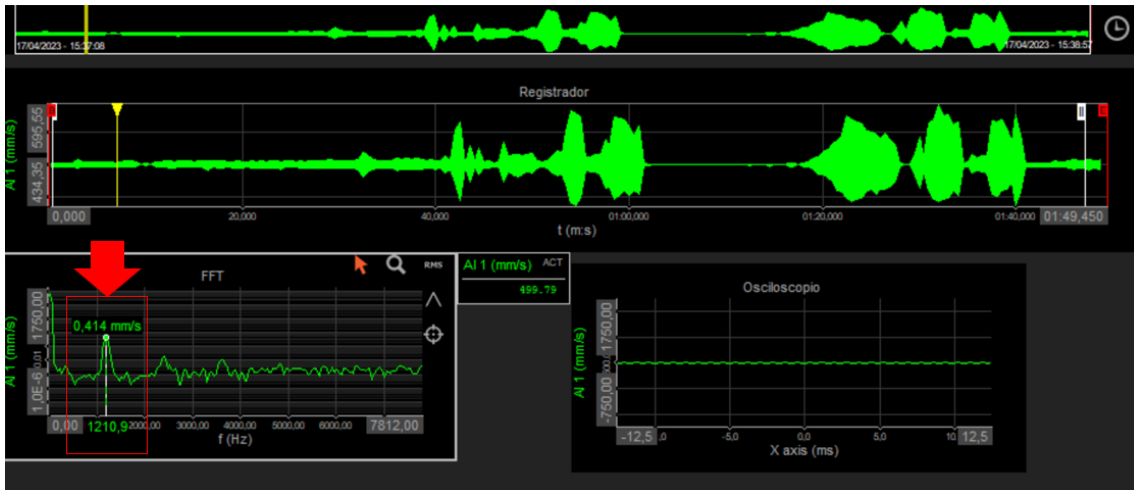


**Figura 77. Botones que usar para el análisis de una zona más específica de la señal.**

- Llegado a este punto, se comenzó a indicarle al teléfono móvil, a través de la aplicación, la frecuencia en Hercios que debía emitir y se comprobaba que, efectivamente, la gráfica FFT mostraba la frecuencia emitida por el altavoz, confirmando que el equipo funcionaba correctamente y era fiable para medir los ensayos futuros.

A continuación, se muestran algunos ejemplos, donde se puede ver según la frecuencia que se le pedía a la aplicación, lo que mostraba el programa en la ventana gráfica FFT.

- Frecuencia exigida en la aplicación: 1200 Hz (Figura 78).



**Figura 78. Señal y frecuencia captada por el vibrómetro láser.**

Se puede ver claramente en la gráfica FFT que, el pico máximo de la gráfica se encuentra en 1210,9 Hz, indicando la frecuencia dominante en el instante, coincidiendo casi de forma exacta con la frecuencia indicada en la aplicación. Para conocer, como se muestra en la Figura 78, la frecuencia de cada pico basta con clicar donde se desee y se mostrará tanto la frecuencia en Hz como la velocidad de vibración.

- Frecuencia exigida en la aplicación: 1700 Hz (Figura 79).

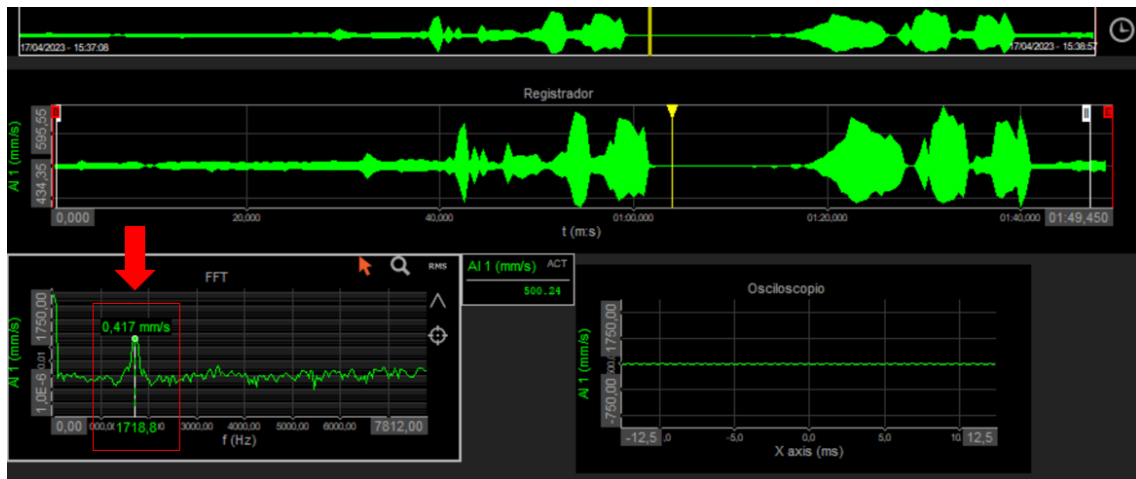


Figura 79. Señal y frecuencia captada por el vibrómetro láser.

Al igual que en el ejemplo anterior, coincide, de forma prácticamente exacta, la frecuencia exigida con la captada por el vibrómetro láser. Es de entender que no se podía exigir demasiada precisión porque podía haber algún tipo de diferencia entre la frecuencia que se le marcaba a la aplicación y lo que emitía, ya sea por mínimos errores de la propia aplicación (no era una aplicación profesional), vibraciones del ambiente que influyesen...

- Frecuencia exigida en la aplicación: 3000 Hz (Figura 80)

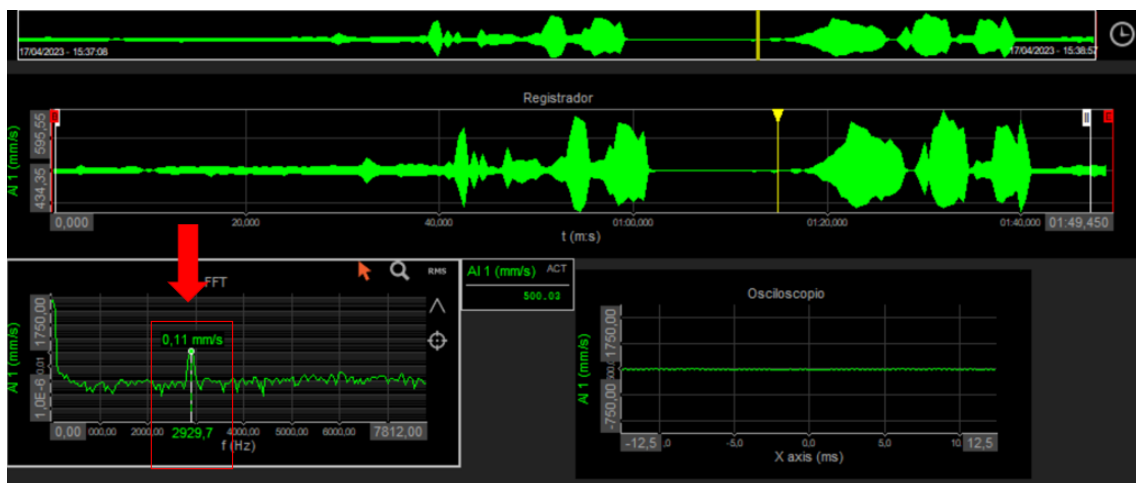


Figura 80. Señal y frecuencia captada por el vibrómetro láser.

- Frecuencia exigida en la aplicación: 5500 Hz (Figura 81).

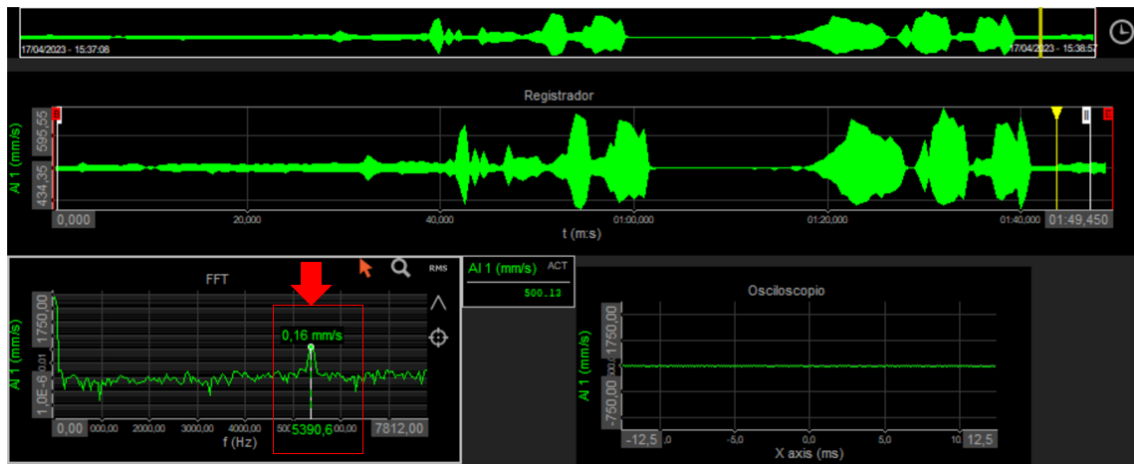


Figura 81. Señal y frecuencia captada por el vibrómetro láser.

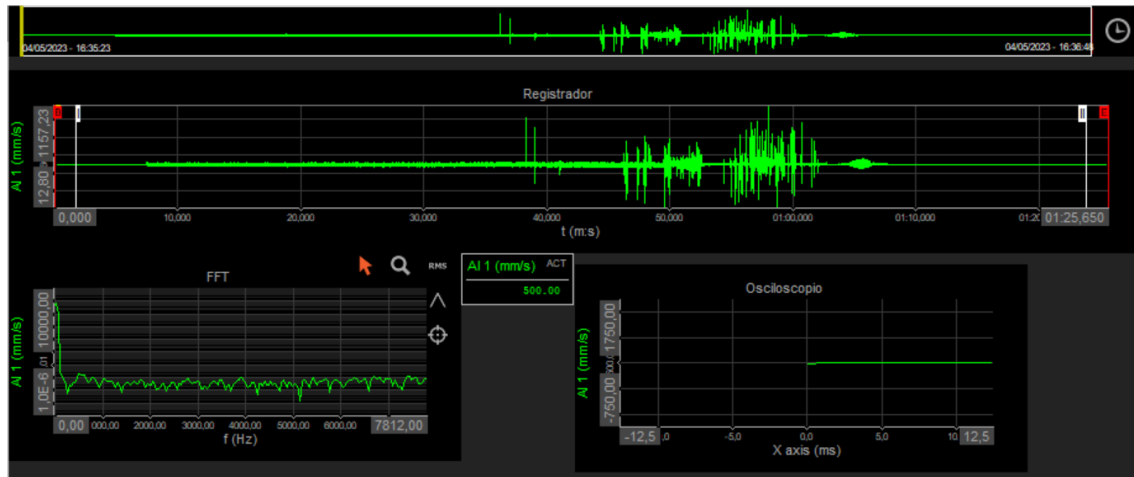
### 3.4. Interpretación de datos con el software

Para mayor comprensión del funcionamiento e interpretación del software, se han realizado una serie de ensayos con distintos materiales cuyos datos recogidos serán analizados en apartados posteriores, pero para conseguir ese análisis es necesario saber qué indican las curvas de vibración que se muestran en el analizador. Se tratan de ensayos realizados en un torno CNC cuyo código numérico ha sido introducido por una persona cualificada para ello (Figura 82).



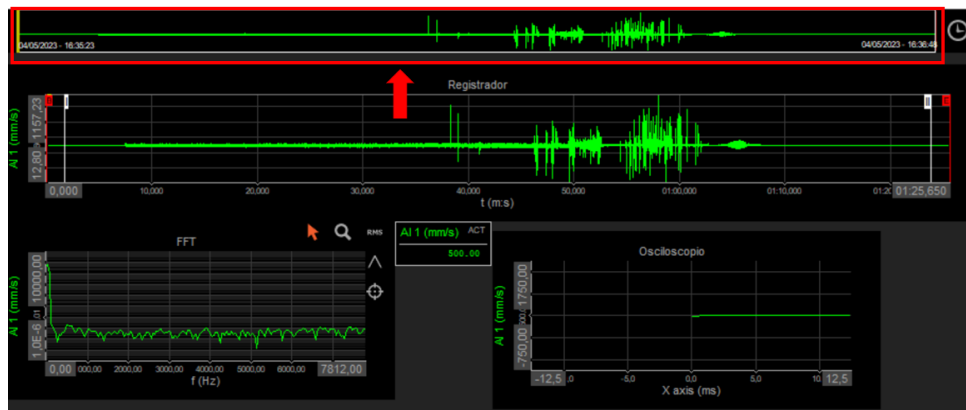
Figura 82. Introducción del código CNC en el centro de torneado.

A continuación, se va a explicar el significado general de las curvas de vibración y las alteraciones que se perciben en ellas.



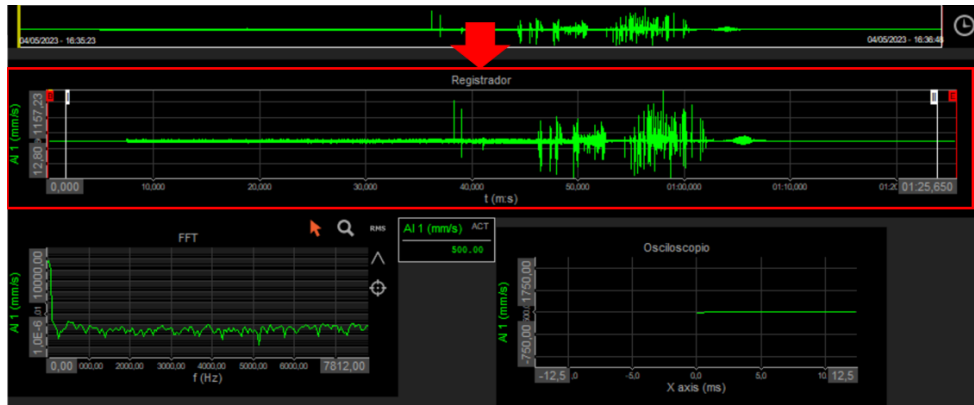
**Figura 83. Imagen general de la señal captada en diferentes gráficas.**

Esta sería la vista general de la pantalla tras haber almacenado la señal captada en el ensayo (Figura 83). Tras esto, se va a indicar qué podemos ver en cada una de las ventanas gráficas que aparecen en pantalla. En la siguiente imagen se muestra la ventana donde se ve, como se ha dicho anteriormente, la señal en su totalidad en el dominio del tiempo, donde se podrá observar la señal completa o aislar solo una parte de ella que se desee estudiar en concreto (Figura 84).



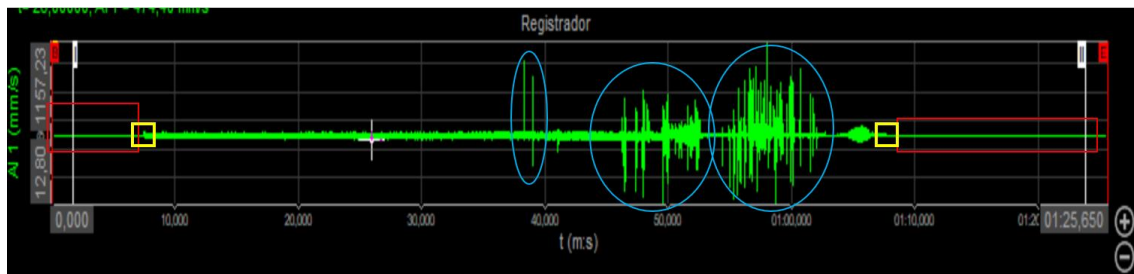
**Figura 84. Señal completa en el dominio del tiempo (Amplitud-Tiempo).**

En la ventana gráfica “Registrador” (misma gráfica que la general pero ampliada) es donde se puede ampliar o aislar una parte de la señal para estudiarla. Dicha señal está representada en el dominio del tiempo (amplitud – tiempo) cuya magnitud de amplitud es la velocidad (Figura 85).



**Figura 85. Ventana gráfica "Registrador".**

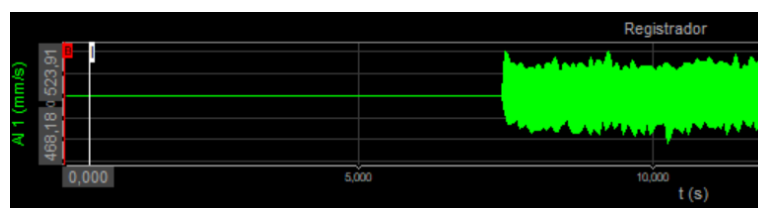
En uno de los ensayos hechos, como se ha mencionado, con un torno CNC, se ha mecanizado una pieza de Aluminio 7075. En la señal almacenada se pueden distinguir diferentes fases o eventos de dicho mecanizado en la ventana gráfica del Registrador.



**Figura 86. Fases de la señal captada en el proceso de mecanizado.**

Como se muestra en la imagen anterior (Figura 86), se pueden apreciar distintas formas en la onda que nos indican lo siguiente:

- Zonas de color rojo: Son los instantes previos y finales al corte de la herramienta en el mecanizado, donde solo se aprecia la vibración captada del propio funcionamiento del torno y demás vibraciones del entorno que puedan influir. En la siguiente imagen, donde se ha ampliado la zona previa al corte de la herramienta en la pieza, se aprecia perfectamente el instante del comienzo del corte y la variación de la amplitud de la onda de vibración con respecto al momento antes del corte (Figura 87).



**Figura 87. Ampliación de la zona de la señal previa al comienzo del mecanizado.**

- Zonas de color amarillo: Son aquellas donde empieza y acaba el proceso de mecanizado de la pieza, justo el instante de penetración y, fin de la herramienta de corte en la probeta. Se puede apreciar igualmente en la imagen anterior (Figura 87), el momento exacto del comienzo del corte y el aumento de la amplitud de vibración por ello.

- Zonas azules: Estos aumentos de amplitud repentinos y anormales que pueden llamar la atención, es simplemente viruta y nidos de viruta que se crean durante el corte y se interponen en el láser como se muestra en la Figura 88, generando estos picos de amplitud anormales.

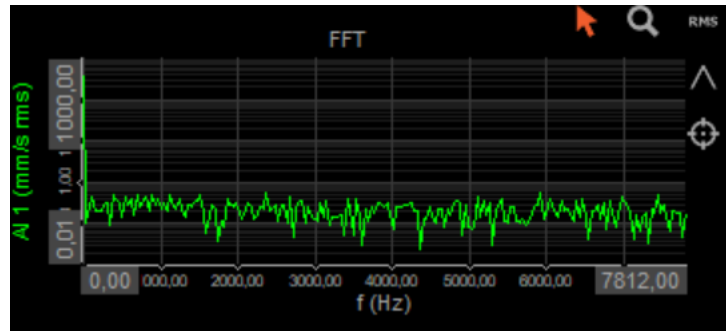


**Figura 88. Interferencia de un nido de viruta en el láser.**

El resto de la onda es parte de todo el proceso de corte, donde quitando alguna excepción, es de amplitud “constante” a simple vista.

En la ventana gráfica FFT, se muestra el espectro de la señal, es decir, señal en el dominio de la frecuencia (amplitud – frecuencia). Es en esta ventana donde se debe buscar el pico o los picos más destacados de la señal, es decir, como se ha explicado en el apartado de análisis de vibraciones, los picos síncronos. Al igual que en la ventana “Registrador”, la magnitud de la amplitud es la velocidad, pero es aquí donde se debe hacer hincapié en lo que más conviene para que se muestren dichos picos. Como se ha dicho en otros apartados, lo más normal a la hora de realizar un análisis de vibraciones en el dominio de la frecuencia es hacerlo usando la velocidad como magnitud de amplitud debido a que es capaz de mostrar la señal en un rango de frecuencias más estable. En desplazamiento puede que pasen desapercibidas las señales de mayor frecuencia y en aceleración las de menor.

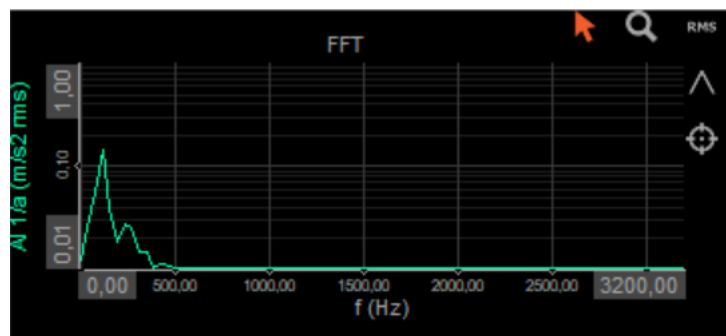
Si tomamos una imagen de la señal FFT de un momento cualquiera durante el proceso de corte (Figura 90 FFT en velocidad):



**Figura 90. FFT con magnitud de amplitud la velocidad (mm/s).**

Si se trata de identificar algún pico significativo de la señal es realmente confuso porque no hay ninguno que destaque de forma llamativa, que es aquello que va a dar información de gran valor. Es por esto por lo que hay que investigar si es necesario realizar una integración de la señal para obtener la amplitud en la magnitud de aceleración o derivarla para tenerla como desplazamiento.

En este caso, lo óptimo ha sido integrar la señal para obtener la magnitud de la amplitud en aceleración donde, como se puede observar en la Figura 91 existen picos significativos que se aprecian fácilmente y que serían objetivo de estudio.

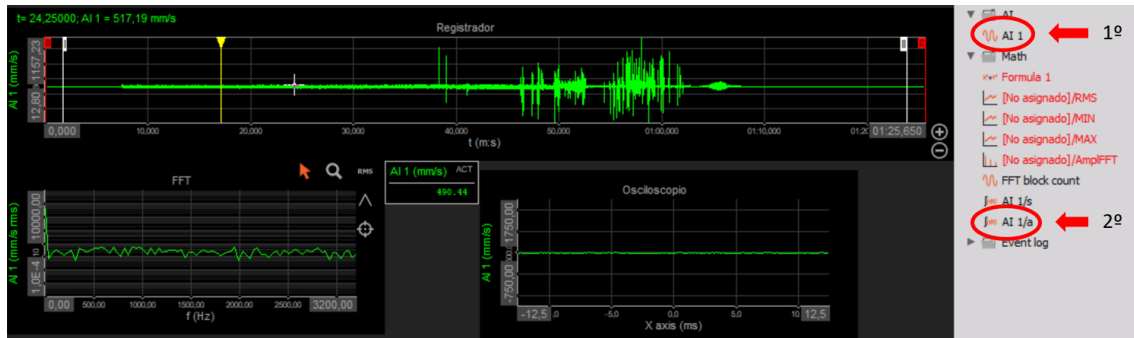


**Figura 91. FFT con magnitud de amplitud la aceleración.**

Para obtener esta señal partiendo de la original cuya magnitud de amplitud era la velocidad se deben seguir los siguientes pasos:

Primero clicamos en la gráfica a la que queremos acceder, que será la FFT. Tras esto, seguimos los pasos indicados en la Figura 92:

- 1º. Clicando en “AI 1”, en el menú derecho, quitaremos de forma momentánea la señal en velocidad para poder ver con claridad la de aceleración que se introducirá en el siguiente paso (Este paso no es necesario si se desean ver ambas señales a la vez).
- 2º. Para añadir la integración de la señal, es decir, la señal en aceleración, solo se debe clicar en “AI 1/a”.

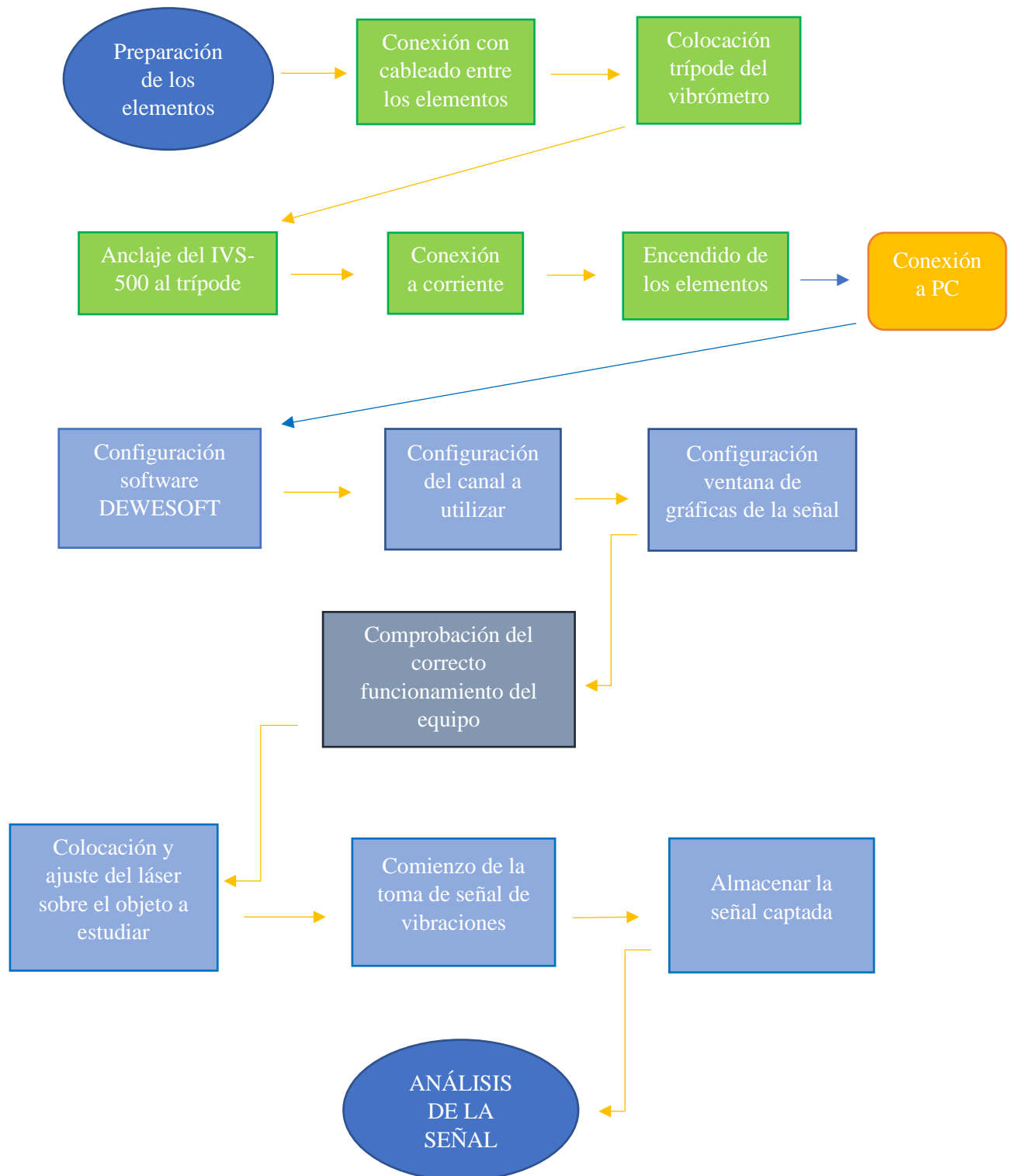


**Figura 92. Pasos para obtener la integración de la señal.**

Es muy importante modificar los límites de las gráficas según los resultados que se esperan encontrar. Por ejemplo, en este caso, la amplitud en aceleración no iba a ser superior a  $1 \text{ m/s}^2$  y la frecuencia no sobrepasaría los 1000 Hercios, por lo que se deben reducir estos valores para que la señal se perciba con mayor claridad y nitidez.

### 3.5. Guía rápida de uso

A continuación, se muestra en un diagrama de flujo, una guía rápida del proceso de montaje y puesta a punto del equipo. Para más detalle del proceso, se debe consultar los apartados anteriores.



**Figura 93. Diagrama de flujo como guía rápida de la puesta a punto del equipo.**



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Se han realizado una serie de ensayos con probetas en el torno con 3 materiales distintos, con el fin de detectar alguna anomalía en el proceso de mecanizado, si todo se producía con normalidad y analizar las vibraciones dependiendo del material y de las condiciones de corte, como por ejemplo variando, en algunos casos, la velocidad de corte y la velocidad de avance, como se muestra en las siguientes tablas, donde se recogen los parámetros de corte usados y los materiales. En todos los ensayos se han usado probetas cilíndricas con el fin de aumentar la simplicidad del análisis posterior de los resultados, evitando incluir más parámetros que pudiesen variar e intervenir en el estudio. Sólo se ha variado el diámetro de un ensayo a otro como se indica en las tablas siguientes donde se recogen los parámetros usados en cada uno.

- **Aluminio 7075**

**Tabla 14. Composición en % en masa de la aleación ensayada.**

Composición	Al	Zn	Mg	Cu
% Composición	88	6	2.5	2

Como características principales de este metal se tienen, la alta resistencia a fatiga en comparación con otras aleaciones, fácil mecanización, alta durabilidad. Sin embargo, es un material que necesita protección si se coloca en ambientes húmedos. En definitiva, es un material con buena resistencia mecánica [39].

**Tabla 15. Parámetros de corte utilizados en los ensayos de Al 7075.**

ENSAYO	1	2	3	4
Velocidad de corte [m/min]	120	120	120	120
Avance [mm/rev]	0.05	0.05	0.05	0.05
Profundidad de corte [mm]	1	1	1	1
Diámetro probeta [mm]	20	18	16	14

- **AISI 14404**

El acero inoxidable es una aleación de hierro y carbono que contiene por definición un mínimo de 10,5 % de cromo. Algunos tipos de aceros inoxidables contienen además otros elementos aleantes. Los principales son el níquel y el molibdeno. El AISI 1.4404 es un acero inoxidable, austenítico al cromo-níquel-molibdeno con un bajo contenido de carbono. Debido al suplemento de molibdeno de 2 – 2,5%, la resistencia a la corrosión del 1.4404 en comparación con las austeníticos estándares 1.4301 y 1.4307 es mucho mejor [40].

**Tabla 16. Parámetros de corte utilizados en los ensayos de AISI 1.4404**

ENSAYO	1	2	3	4
Velocidad de corte [m/min]	120	120	240	240
Avance [mm/rev]	0.05	0.05	0.05	0.05
Profundidad de corte [mm]	1	1	1	1
Diámetro probeta [mm]	18	16	14	12

- Acero al carbono

**Tabla 17. Parámetros de corte utilizados en los ensayos de Acero al carbono**

ENSAYO	1	2	3
Velocidad de corte [m/min]	120	120	240
Velocidad de avance [mm/rev]	0.05	0.05	0.1
Profundidad de corte [mm]	1	1	1
Diámetro probeta [mm]	38	36	34

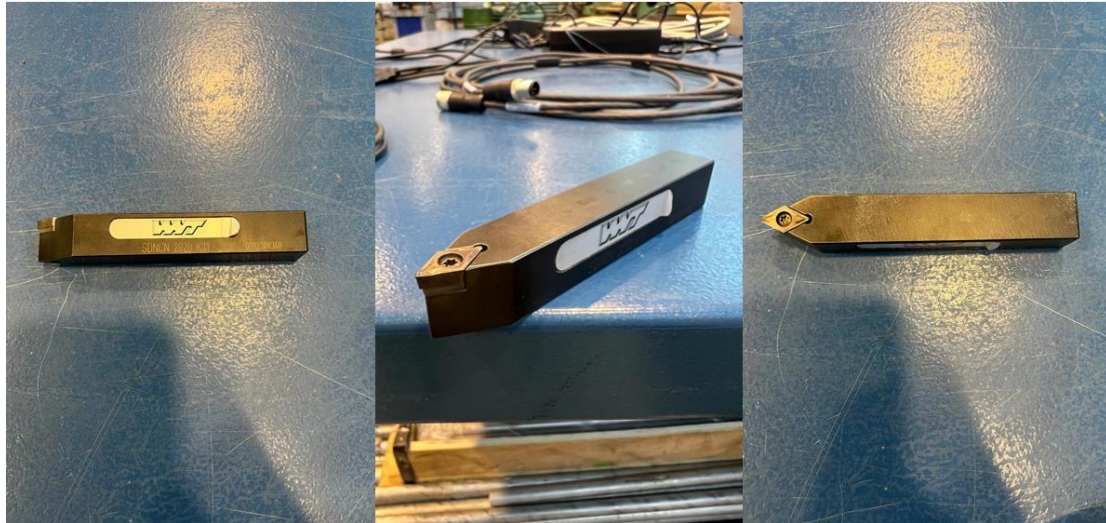
El acero es una aleación de hierro y carbono. La Organización Mundial del Acero define el acero más específicamente como que contiene menos del 2% de carbono y 1% de manganeso y pequeñas cantidades de silicio, fósforo, azufre y oxígeno. Cambiar la cantidad de carbono puede cambiar las propiedades del acero, haciéndolo más o menos fuerte, duro, dúctil o maleable[41]. Los aceros al carbono son aquellos que contienen un porcentaje diverso de carbono que es vital para definir sus propiedades mecánicas, menos de un 1,65% de manganeso, un 0,6% de silicio y un 0,6% de cobre. El 90% de los aceros son aceros al carbono. Un aumento de la cantidad de carbono en su composición representa cambios en su estructura, traduciéndose en sus propiedades mecánicas [42]:

1. Aumenta la dureza y resistencia.
2. Disminuye sus propiedades de ductilidad, soldabilidad y de elongación.

La composición química de los aceros al carbono es compleja, además del hierro y el carbono (generalmente no supera el 1%), hay en la aleación otros elementos necesarios para su producción, tales como silicio y manganeso, y hay otros que se consideran impurezas por la dificultad de excluirlos totalmente –azufre, fósforo, oxígeno, hidrógeno. El aumento del contenido de carbono

en el acero eleva su resistencia a la tracción, incrementa el índice de fragilidad en frío y hace que disminuya la tenacidad y la ductilidad [42].

En cuanto a la herramienta de corte, se ha utilizado la misma para todos los ensayos de los distintos materiales, sin cambiarla, usando insertos de fijación mecánica. (Figura 94).



**Figura 94. Herramienta de corte utilizada en los ensayos.**

Siendo la plaquita de corte, la que se muestra en la Figura 95:



**Figura 95. Plaquita de corte utilizada para los ensayos**

No cualquier plaquita sirve para mecanizar cualquier material ni tampoco a cualquier condición de corte. Existe una clasificación ISO que indica el material que puede mecanizar la plaquita y los parámetros de corte máximos recomendados en su uso. Esta clasificación, como se ve en la figura anterior, se encuentra en una etiqueta en la propia caja, la cual tiene diversos colores y letras (en este caso no están debido al deterioro de la etiqueta, por lo que en la Figura 96, se muestra otra caja de plaquitas para que sirva de ejemplo) que indican lo siguiente:

- El grupo P: para el mecanizado de materiales de viruta larga, como son todos los aceros (color azul).
- El grupo M: para el mecanizado de aceros inoxidables (color amarillo).
- El grupo K: para materiales de viruta corta, aunque sólo la fundición (color rojo).
- El grupo N: para metales no ferrosos (color verde).
- El grupo S: para superaleaciones termorresistentes y titanio (color marrón).
- El grupo H: para aceros templados (color gris) [43].



**Figura 96. Ejemplo de caja de plaquitas con etiqueta de clasificación en buen estado.**

La clasificación ISO incluye una normalización respecto del color, que se asigna para cada uno de los grupos tal como se muestra en la Figura 97. Esta relación grupo-color facilita el proceso de selección de herramientas de corte, cuando se emplean catálogos de los distintos fabricantes de herramientas[43].



**Figura 97. Los seis grupos de la Clasificación ISO de metales duros [43].**

Es importante destacar que esta normalización está realizada solamente en base al uso de las herramientas, ya que no establece regulaciones en lo que se refiere a la composición química de los materiales (de esta forma los fabricantes conservan la confidencialidad de sus desarrollos, y no se limita su capacidad de innovación) [43].

Cabe destacar que el Vibrómetro Láser IVS-500 capta las vibraciones en un solo eje a diferencia de otros acelerómetros que son capaces de captar en los 3 ejes. El enfoque del haz del láser se ha hecho incidir en las probetas a mecanizar de forma directa como se muestra en la Figura 98.



**Figura 98. Incidencia del láser sobre la propia probeta a mecanizar.**

Estos ensayos han sido correctamente realizados, tanto el montaje físico de la instrumentación como la configuración del software. Para concretar, la configuración de la ventana gráfica de la FFT ha sido usando como magnitud de la amplitud la aceleración debido a que en velocidad no se conseguía distinguir ningún pico de frecuencia destacable, existiendo muchas frecuencias mezcladas, no permitiendo detectar picos fundamentales en el proceso, cosa que si se consiguió con la aceleración. En los ensayos se ha comprobado que la amplitud de las vibraciones era pequeña por lo que, los límites de la gráfica FFT han sido modificados (reducidos) a valores del rango que se esperaban, como se muestra en los apartados siguientes de cada material.

#### **4.1. Análisis de vibraciones en mecanizado de Aluminio 7075**

Con este material se han realizado varios ensayos, siendo las condiciones de corte las siguientes:

- Velocidad de corte = 120 m/min
- Avance = 0,05 mm/rev
- 1 mm de profundidad de corte

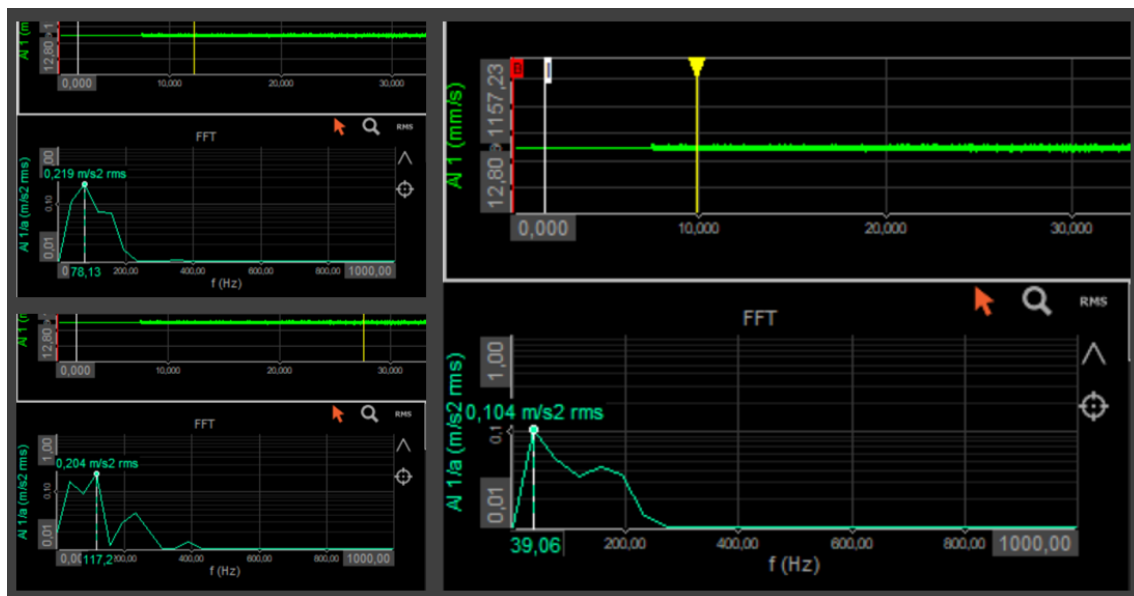
Se puede destacar lo siguiente:

Antes del comienzo del mecanizado, se aprecia una frecuencia de vibración de aproximadamente 40 Hercios que se mantiene constante hasta el comienzo del mecanizado, vibración generada por propio encendido del torno (el motor que lo acciona), además de otras vibraciones del entorno que pudiesen influir en el dato, con una amplitud de vibración (en aceleración y RMS) alrededor de  $1$  y  $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$  (Figura 99).



**Figura 99. Señal captada previa al mecanizado.**

Partiendo de una probeta de Aluminio 7075 con un diámetro inicial antes del corte de 20 mm, se observa como en la mayor parte del proceso de corte se establecen unas frecuencias destacadas, que se diferencian del resto de vibraciones, de 39'06 Hz, 78'13 Hz y 117'2 Hz que se alternan durante este y, existiendo rara vez, vibraciones con una frecuencia de 156'3 Hz (Figura 100).



**Figura 100. Frecuencias dominantes en el proceso.**

Con este mismo material se han realizado 4 ensayos con las mismas condiciones de corte, lo único que ha variado ha sido el diámetro de la probeta a consecuencia de cada mecanizado. Comenzando con un diámetro inicial de 20 mm y acabando, tras 4 ensayos (1 mm de profundidad de corte por ensayo), con un diámetro final de 12 mm. Como la variación del diámetro de la probeta ha sido muy progresiva, no se perciben diferencias destacables entre las señales de cada ensayo. Solo cabría destacar un mínimo aumento de la amplitud si se compara la probeta inicial de 20 mm donde se mecaniza hasta 18 mm y la final (tras 3 ensayos), de 14 mm a 12 mm. Mismas frecuencias, pero mayor amplitud de vibración.

- Ensayo 1º y 4º  
En ambos ensayos existen las mismas frecuencias dominantes de vibración, pudiendo observar en las gráficas, que la amplitud en el último ensayo con Al 7075 es algo mayor que en el primero. En todos estos ensayos, la segmentación de la viruta ha sido continua, creando nidos de viruta que alteraban los datos de frecuencia y amplitud que se registraban.  
Algunos datos a lo largo del proceso que demuestran el leve aumento generalizado de la amplitud ( $m/s^2$ ) en ambos ensayos son los siguientes:

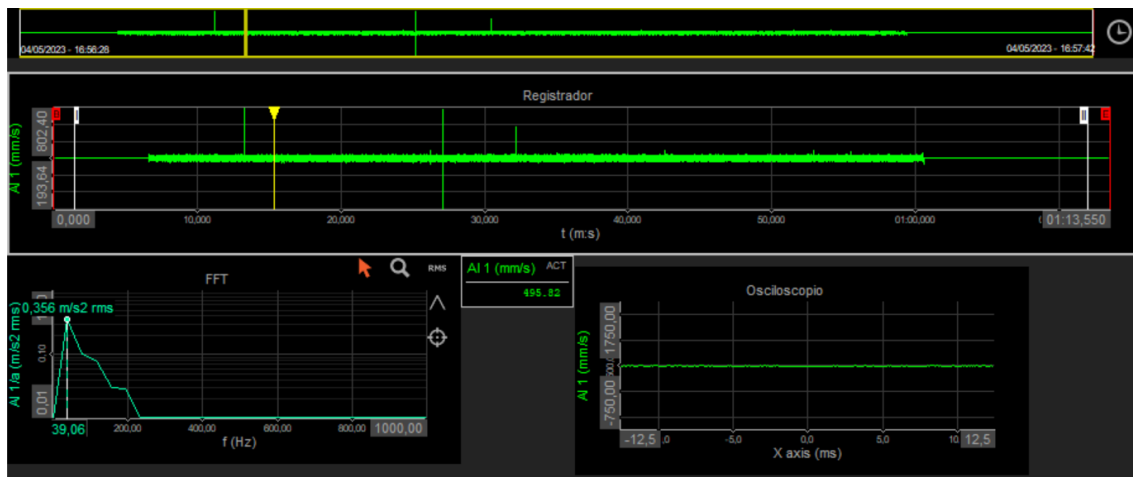
**Tabla 18. Comparación de los datos de amplitud recogidos con Al 7075.**

<b>Ensayo 1 (D=20 mm)</b>	0.109	0.129	0.177	0.226
<b>Ensayo 2 (D=14 mm)</b>	0.133	0.173	0.267	0.368

#### 4.2. Análisis de vibraciones en mecanizado de Acero Inoxidable AISI 14404

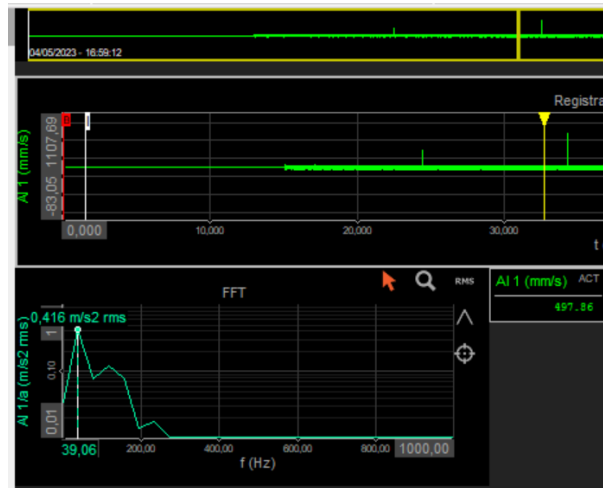
Al igual que con el Aluminio 7075, se han realizado varios ensayos, siendo el primero de ellos en las mismas condiciones de corte que las mencionadas en el subapartado anterior y teniendo la probeta un diámetro inicial de 18 mm.

En este proceso de corte se puede apreciar que prácticamente todo el mecanizado se produce a frecuencia 39'06 Hz, exceptuando algunos instantes en los que, probablemente, la viruta haya interferido en el haz del láser alterando la señal normal de vibración (Figura 101). La amplitud varía alrededor de 0,250 y 0,350  $m/s^2$ , menos en los picos anormales en los instantes mencionados donde la amplitud llega a valores como 0,525 o 0,627  $m/s^2$ .



**Figura 101. Imagen general de la señal captada en el primer ensayo con Acero Inoxidable AISI 14404.**

En el segundo ensayo, donde la probeta era de diámetro 16 mm, se observa un pequeño aumento de la “amplitud media” de vibración, es decir, en este caso, la amplitud de vibración ha aumentado manteniéndose en valores alrededor de los 0,350 y 0,450  $m/s^2$  aproximadamente, pero manteniendo la misma frecuencia que en el ensayo anterior, 39,06 Hz como se muestra en la Figura 102.



**Figura 102. Frecuencia dominante del ensayo.**

En estos dos ensayos realizados con las mismas condiciones de corte, se obtienen valores de amplitud que aumentan a medida que el diámetro de la probeta disminuye. Como se puede comprobar en la siguiente tabla, se han recogido los valores mínimos y máximos aproximados de cada ensayo, observando, como se ha dicho, el aumento de la amplitud ( $m/s^2$ ).

**Tabla 19. Valores máximos y mínimos de amplitud de los dos primeros ensayos realizados con AISI 1.4404.**

Ensayo	Amplitud mínima	Amplitud máxima
<b>1 (D=18 mm)</b>	0.250	0.350
<b>2 (D=16 mm)</b>	0.350	0.450

A continuación, se han realizado dos ensayos más donde se han modificado las condiciones de corte anteriores, aumentando la velocidad de corte, pero manteniendo la de avance. Las nuevas condiciones de corte serían:

- Velocidad de corte = 240 m/min
- Avance = 0,05 mm/rev
- 1 mm de profundidad de corte

Al existir una variación muy progresiva del diámetro, no se aprecian cambios destacables entre estos dos ensayos, pero si con respecto a los dos ensayos anteriores a menor velocidad de corte, por lo que se va a comentar directamente los resultados del penúltimo ensayo al ser muy similares estos dos últimos.

Se trata un ensayo donde, en resumen, se ha duplicado la velocidad de corte y se ha comenzado con un diámetro de 14 mm. Se distinguen 3 zonas que están organizadas por la frecuencia a la que vibran:

- Zona 1: Se trata de la zona inicial y final del corte que, aunque se alternan las 3 frecuencias dominantes del proceso (39'06, 78'13 y 117'2 Hz), la frecuencia dominante y que se mantiene mayoritariamente constante en esta fase es de 39,06 Hz. La amplitud aumenta de forma exponencial desde valores mínimos en torno a 0,01  $m/s^2$  hasta 1,15  $m/s^2$  aproximadamente. De la misma forma, pero en sentido opuesto, en la zona 1 del

final del proceso, la amplitud disminuye de forma progresiva hasta los valores mínimos, estos van desde los  $0,650 \text{ m/s}^2$  hasta los  $0,147 \text{ m/s}^2$ .

- Zona 2: Tras la zona 1 al inicio del corte y antes de ella en la zona final, se encuentra la que se ha denominado zona 2, donde la frecuencia dominante es claramente de  $78,13 \text{ Hz}$  y cuya amplitud, en la zona 2 primera, aumenta de forma progresiva desde valores que rondan los  $1,16 \text{ m/s}^2$  hasta  $2,4 \text{ m/s}^2$  y en la zona 2 previa al final del corte, los valores disminuyen progresivamente desde los  $2,4$  a los  $0,9 \text{ m/s}^2$ .
- Zona 3: Es la zona central del corte, donde predomina una vibración con una frecuencia de  $117,2 \text{ Hz}$ . La amplitud, que aumenta en el tramo inicial (paso de la zona 2 a la zona 3) para mantenerse en un rango de amplitud “constante” al igual que disminuye en su tramo final para dar paso a la zona 2. En este rango “constante” que se acaba de mencionar, los valores rondan entre los  $2,4$  y los  $2,8 \text{ m/s}^2$ .

**Tabla 20. Valores máximos y mínimos del ensayo según la zona de proceso de mecanizado.**

Zona	Amplitud mínima	Amplitud máxima
1	0.15	0.65
2	0.9	2.4
3	2.4	2.8

En la Figura 103 se marcan las diferentes zonas para una mejor comprensión de lo explicado. Es necesario aclarar que la “interferencia externa” se trata de que el operario se interpone entre el láser y la probeta tras finalizar el proceso de corte para la observación o cambio de esta y es lo que aparece como una alteración de la vibración en esa fase final de la señal.



**Figura 103. Diferentes zonas de la señal captada.**

Se puede observar que, al igual que con el Aluminio 7075, la amplitud de vibración aumenta según disminuye el diámetro y, además, también si aumentamos la velocidad de corte. A estas velocidades de corte, los aceros inoxidable, en general, tienen una segmentación de la viruta continua en el mecanizado al igual que los aluminios por lo que es razonable que no se obtengan valores de amplitud grandes en comparación con los ensayos ya realizados, a no ser que se esté produciendo un desgaste de la herramienta de corte o algún otro fenómeno [44].

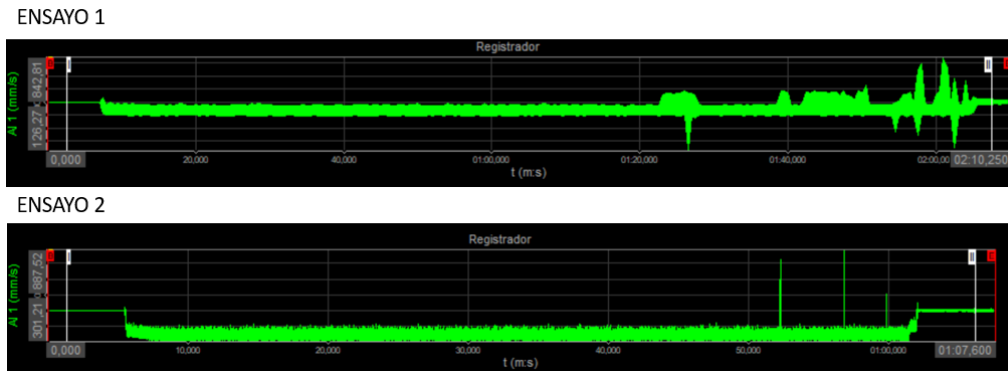
### 4.3. Análisis de vibraciones en mecanizado de Acero al Carbono

Con este material se han realizado tres ensayos, los dos primeros con las mismas condiciones de corte y en el último se han modificado.

En estos dos primeros ensayos, las condiciones de corte han sido las siguientes:

- Velocidad de corte = 120 m/min
- Avance = 0,05 mm/rev
- 1 mm de profundidad de corte

Ambos ensayos son muy similares en cuanto a frecuencias y amplitudes de vibración (Figura 104), las cuales se encuentran en el rango de entre 0,250 y 0,600  $m/s^2$ . A pesar del gran diámetro de las probetas, 38 mm en comienzo del primer ensayo y 36 mm en el segundo, la amplitud de vibración es grande, lo que indica que probablemente el mecanizado no se esté realizando con las mejores condiciones de corte, que la plaquita está deteriorada o se está deteriorando, que no sea la plaquita de corte adecuada, que exista un desajuste en el soporte de la pieza...



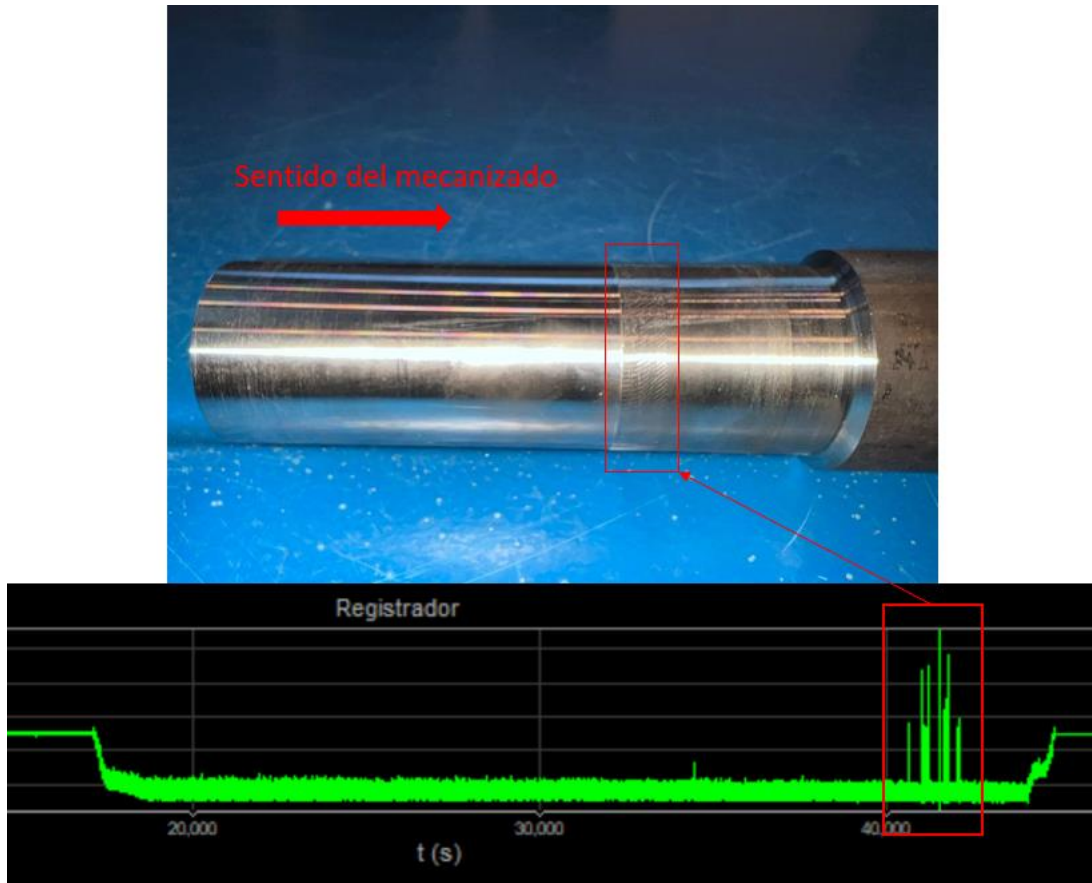
**Figura 104. Similitud de los dos primeros ensayos con Acero al Carbono.**

Es en el último ensayo donde se confirma una de estas suposiciones y que se puede observar claramente en la señal captada, tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, donde se alcanzan amplitudes exageradas. Esta suposición es la rotura inesperada de la plaquita durante el mecanizado. Aún sin saber el motivo real, se han modificado las condiciones de corte, duplicando la velocidad de corte y de avance, lo que ha provocado el fallo prematuro de la herramienta. La probeta comienza el ensayo con un diámetro de 34 mm y las condiciones de corte han sido las siguientes:

- Velocidad de corte = 240 m/min
- Velocidad de avance = 0,1 mm/rev
- 1 mm de profundidad de corte

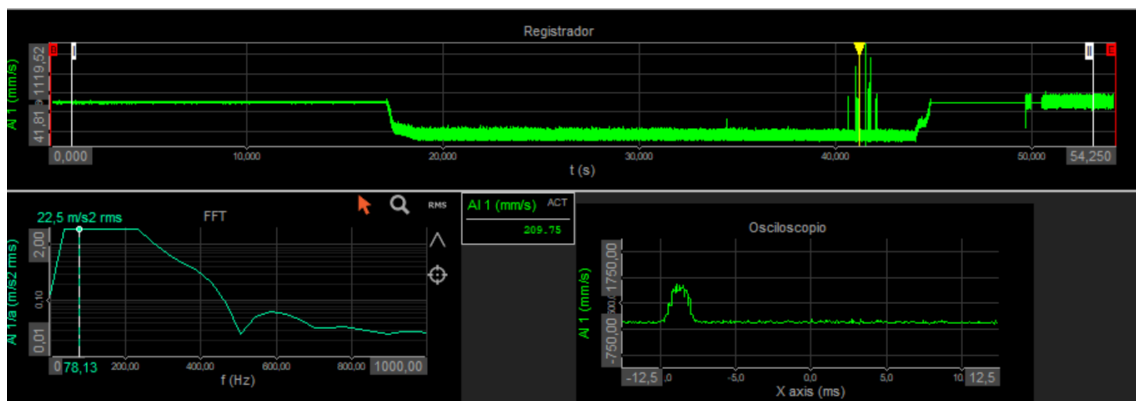
Es necesario aclarar que estas herramientas de corte tienen unos rangos aceptados según la velocidad de corte, velocidad de avance, profundidad, tipo de material... Es decir, no todas las plaquitas se pueden usar para un mismo material ni tampoco superar el umbral de velocidad que se permite con ella, como se ha explicado anteriormente.

En la Figura 105 se muestra claramente el momento en el que la herramienta de corte se fractura, consiguiendo un acabado superficial de la probeta rugoso debido a la fusión del material de la herramienta y de la pieza, creando un filo recocado por la alta temperatura que alcanzó el proceso, observándose el salto de chispas a partir de ese momento hasta el final del mecanizado. Además del mal acabado, se observa una variación en el diámetro superficial de la probeta, es decir, un "escalón", provocado también por este fallo inesperado.



**Figura 105. Acabado superficial de la probeta por fallo prematuro de la plaquita.**

Este fenómeno se puede observar claramente en el “Registrador” (gráfica amplitud-tiempo), donde se aprecian picos de señal anormales con respecto a la continuidad anterior y, en la gráfica FFT se observan amplitudes de vibración enormes llegando a valores de hasta  $22,5 \text{ m/s}^2$  como se muestra en la Figura 106. Todo el tramo anterior a este suceso mantiene un rango de amplitud de vibración parecido a los dos ensayos anteriores, algo superior debido a la modificación de las condiciones de corte, pero nada que destacar como consecuencia del gran diámetro de la probeta, característica muy influyente.



**Figura 106. Amplitudes de vibración exageradas en el momento de la rotura de la hta.**



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Se puede decir de forma general que se han conseguido todos los propósitos que se tenían en este Trabajo de Fin de Grado. Se puede dividir este bloque de conclusiones en dos partes, la primera sería la parte previa a los ensayos realizados y la segunda, se trataría el campo del análisis de las vibraciones obtenidas en los ensayos.

1. Se ha instalado el Vibrómetro Láser correctamente, realizándose un manual sencillo para su correspondiente configuración y montaje.
2. Se ha llevado a cabo una correspondiente validación, sencilla y sin necesidad de dispositivos externos de complicado acceso, como es un teléfono móvil y una aplicación gratuita, confirmando que el dispositivo capta las señales de vibración de forma correcta, dando paso a que se pueda usar el vibrómetro para ensayos reales.
3. Una vez validado el equipo, se ha realizado la puesta a punto del dispositivo, comprobando que la distancia de medición sea correcta, la señal registrada por el software sea perceptible y clara, ajustando los parámetros necesarios para ello y, que la intensidad de esta sea la suficiente.
4. Tras completar el bloque anterior, y después de llevar a cabo varios ensayos, se ha llegado a la conclusión de que la velocidad de corte es un parámetro muy influyente en cuanto a la amplitud de las vibraciones captadas, como también el diámetro de las probetas. El diámetro de estas, al disminuir tras cada mecanizado provocaba el aumento de forma progresiva de la amplitud (que no las frecuencias) de las vibraciones.
5. Lo mismo ha ocurrido con la velocidad de corte, al variar sólo este parámetro, se ha podido apreciar el aumento de la amplitud de vibración.
6. Este aumento de amplitud de vibración provoca un desgaste más rápido de la herramienta de corte, es decir, un corte más agresivo, deteriorando la herramienta. Se confirma esto en el último ensayo, donde el diámetro de la probeta era muy superior a las anteriores (con el fin de reducir lo máximo posible la influencia del diámetro de la probeta en la amplitud de las vibraciones), por lo que ha influido en menor medida, pero se ha duplicado la velocidad de corte, provocando finalmente la rotura de la herramienta.
7. Cabe destacar que el mecanizado en seco, al no usar fluidos de corte para la lubricación y refrigeración del proceso de mecanizado, es mucho más agresivo, contribuyendo en gran medida al deterioro de la herramienta.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## CAPÍTULO 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Javier Trujillo Vilches, Lorenzo Sevilla Hurtado, y D. D. Mariano Marcos Bárcena, «ANÁLISIS PARAMÉTRICO DEL MECANIZADO EN SECO DE LA ALEACIÓN UNS A97075».
- [2] Grupo de investigación TEP 933 «Ingeniería de Fabricación» de la Universidad de Málaga, «Sistema experto para la mejora de la integridad superficial en el mecanizado sostenible de aleaciones ligeras. Convocatoria de 2021 de “PROYECTOS DE GENERACIÓN DE CONOCIMIENTO” en el marco del Programa Estatal para Impulsar la Investigación Científico-Técnica y su Transferencia, del Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación 2021-2023».
- [3] «Vibraciones ¿Qué son? Tipos de vibraciones | AISLAMANIA». <https://aislamania.com/vibraciones-que-son-tipos-de-vibraciones/> (accedido 7 de noviembre de 2022).
- [4] M. Salazar Arango, «DETERMINACIÓN DE ESPECTROS DE ACELERACIÓN PARA EL TORNO», 2007.
- [5] «Electricidad: Circuitos de Corriente Alterna». [http://www.sapiensman.com/electrotecnia/corriente\\_alterna.htm](http://www.sapiensman.com/electrotecnia/corriente_alterna.htm) (accedido 7 de noviembre de 2022).
- [6] «Corriente alternada. Fase , ángulo de fase y diferencia de fase . Reactancia .» <http://www.sapiensman.com/electrotecnia/problemas22.htm> (accedido 20 de junio de 2023).
- [7] «FFT». <https://www.nti-audio.com/es/servicio/conocimientos/transformacion-rapida-de-fourier-fft> (accedido 7 de noviembre de 2022).
- [8] P. G. White, «Introducción al Análisis de Vibraciones», 1990. [En línea]. Disponible en: [www.AzimaDLI.com](http://www.AzimaDLI.com)
- [9] «¿Qué son la vibraciones en el mecanizado y cómo eliminarlas? | Secotools.com». <https://www.secotools.com/article/120669?language=es> (accedido 9 de noviembre de 2022).
- [10] «Funcionamiento de un torno: Pieza del torno en la que gira el eje». <https://www.ncservice.com/es/conoce-el-funcionamiento-de-un-torno-sabes-cual-es-la-pieza-del-torno-en-la-que-gira-el-eje> (accedido 9 de noviembre de 2022).
- [11] G. Mikell, «Fundamentals of Modern Manufacturing Materials Processes and Systems 4th Edition», 1996.
- [12] «Mecanizar con contrapunto en un torno». <https://www.cmz.com/es/mecanizar-con-contrapunto-en-un-torno/> (accedido 14 de noviembre de 2022).
- [13] «TECNOLOGIA DEL TORNEADO: ACCESORIOS DEL TORNO». <http://mecanicaindustrialupel-ipb.blogspot.com/2013/01/accesorios-del-torno.html> (accedido 26 de junio de 2023).
- [14] «Vibrómetros - Predictiva21 - Aplicaciones y tipos de vibrómetros.» <https://predictiva21.com/vibrometros/> (accedido 18 de noviembre de 2022).

- [15] «Efecto piezoeléctrico | Kistler». <https://www.kistler.com/ES/es/efecto-piezoelctrico/C00000136> (accedido 1 de septiembre de 2023).
- [16] «Transductores piezoeléctricos | Power-MI». <https://power-mi.com/es/content/transductores-piezoel%C3%A9ctricos> (accedido 17 de noviembre de 2022).
- [17] «Qué es el análisis de vibraciones, para qué sirve y cómo funciona». <https://www.cursosaula21.com/que-es-el-analisis-de-vibraciones/> (accedido 15 de noviembre de 2022).
- [18] «Acelerómetro piezoeléctrico Introducción y Historia». [https://hmong.es/wiki/Piezoelctric\\_accelerometer#title](https://hmong.es/wiki/Piezoelctric_accelerometer#title) (accedido 16 de noviembre de 2022).
- [19] Celia Pacheco y José Alfonso Soto, «Corrientes de Foucault. Medida de conductividad eléctrica por inducción electromagnética.», 2008.
- [20] «Analizador de Vibraciones - Tipos de analizadores de vibración». <https://predictiva21.com/analizador-vibraciones/> (accedido 16 de noviembre de 2022).
- [21] «Transductores sísmicos de velocidad | Power-MI». <https://power-mi.com/es/content/transductores-s%C3%ADsmicos-de-velocidad> (accedido 17 de noviembre de 2022).
- [22] «Vibraciones: Vibrómetro». <http://www.uco.es/RiesgosLaborales/fisicoyquimico/vibraciones/photos/view/1-Vibrometro> (accedido 26 de junio de 2023).
- [23] «Estudio de las vibraciones | Power-MI». <https://power-mi.com/es/content/estudio-de-las-vibraciones> (accedido 10 de mayo de 2023).
- [24] «IVS-500 Industrial Vibration Sensor IVS-500 Industrial Vibration Sensor Acoustic quality control with laser precision Product brochure».
- [25] Alan Reyes Sánchez, «UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MORELOS FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS E INGENIERIA S E N T A».
- [26] «¿Cómo funcionan los sistemas interferométricos?» <https://www.renishaw.es/es/como-funcionan-los-sistemas-interferometricos--38612> (accedido 20 de noviembre de 2022).
- [27] M. Vishwakarma, R. Purohit, V. Harshlata, y P. Rajput, «Vibration Analysis & Condition Monitoring for Rotating Machines: A Review», 2017. [En línea]. Disponible en: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com) [www.materialstoday.com/proceedings](http://www.materialstoday.com/proceedings)
- [28] S. K. Nithin, K. Hemanth, V. Shamanth, R. Shrinivas Mahale, P. C. Sharath, y A. Patil, «Importance of condition monitoring in mechanical domain», *Mater Today Proc*, vol. 54, pp. 234-239, ene. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.08.299.
- [29] N. Tandon y A. Choudhury, «A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings», 1999. [En línea]. Disponible en: [www.elsevier.com/locate/triboint](http://www.elsevier.com/locate/triboint)
- [30] M. Siddhpura y R. Paurobally, «A review of chatter vibration research in turning», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 61. Elsevier Ltd, pp. 27-47, 2012. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2012.05.007.

- [31] J. Munoa *et al.*, «Chatter suppression techniques in metal cutting», *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 65, n.º 2, pp. 785-808, 2016, doi: 10.1016/j.cirp.2016.06.004.
- [32] J. C. Beddoes, R. T. Holt, A. K. Koul, L. Zhao, y W. Wallace, «Lightweight J-1? Immarigeon, Materials for Aircraft Applications».
- [33] Y. D. Sánchez Hernández Directores de Tesis Lorenzo Sevilla Hurtado D Mariano Marcos Bárcena Málaga, «Universidad de Málaga Tesis Doctoral Metodología para la Caracterización del Mecanizado de Aleaciones Ligeras de uso Aeronáutico a través del Análisis de la Viruta». [En línea]. Disponible en: <http://orcid.org/0000-0001-5017-5501>
- [34] M. Danish, T. L. Ginta, M. Yasir, y A. M. A. Rani, «Light alloys and their machinability», en *Machining of Light Alloys*, CRC Press, 2018, pp. 1-34. doi: 10.1201/b22153-1.
- [35] «Manual IVS-500 Industrial Vibration Sensor Polytec».
- [36] «World's most versatile data acquisition system | SIRIUS | Dewesoft». <https://dewesoft.com/es/productos/sistemas-daq/sirius> (accedido 29 de marzo de 2023).
- [37] «¿Qué es adc o analog-digital coverter (convertidor de análogo a digital)?» <https://citelia.es/diccionario/adc-convertidor-analogo-digital/> (accedido 31 de marzo de 2023).
- [38] «Especificaciones técnicas SIRIUS | Dewesoft». <https://dewesoft.com/es/productos/sistemas-daq/sirius/especificaciones-tecnicas> (accedido 29 de marzo de 2023).
- [39] «Todo sobre aluminio 7075 - Coppermetal». <https://www.coppermetal.com.br/es/blog/todo-sobre-aluminio-7075/> (accedido 12 de julio de 2023).
- [40] «1.4404 | AISI 316L - Aceros inoxidable ► ex stock». <https://www.gss-spain.com/productos/aceros-inoxidables/1-4404-aisi316l-f310k/> (accedido 12 de julio de 2023).
- [41] «Equivalente de carbono en componentes de acero soldados con LIBS». <https://www.thermofisher.com/blog/cienciaacelerada/metales/equivalente-de-carbono-en-componentes-de-acero-soldados-con-libs/> (accedido 12 de julio de 2023).
- [42] «Tipos de acero según su composición de carbono».
- [43] D. Martinez Krahrmer, «Guía práctica para la selección de insertos de mecanizado Non conventional machining processes View project Laser transmission welding of dissimilar materials View project», 2017, doi: 10.13140/RG.2.2.24174.82242.
- [44] P. Fin de Máster, P. Blanco Ostos Tutor, y L. Valentín Bohorquez, «Equation Chapter 1 Section 1».