



Universidad de Oviedo

Memoria del Trabajo Fin de Máster realizado por

Ana García Fernández

para la obtención del título de

Máster en Ingeniería de Automatización e Informática Industrial

**ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN SÓLIDOS MACIZOS Y
LAMINADOS EN LA LAMINACIÓN EN FRÍO EN ARCELOR
MITTAL ASTURIAS**

Junio 2016

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 1-IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO..... | 5 |
| 2.-PROPUESTA..... | 6 |
| 2.1-INTRODUCCIÓN..... | 6 |
| 2.2-OBJETIVOS..... | 8 |
| 2.3-ALCANCE..... | 9 |
| 2.4-PARÁMETROS RELEVANTES..... | 10 |
| 3-ANTECEDENTES..... | 11 |
| 3.1-CONTEXTO EMPRESARIAL..... | 11 |
| 3.1.1-ARCELOR MITTAL..... | 11 |
| 3.1.2-CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO DE ARCELOR MITTAL..... | 11 |
| 3.2- UBICACIÓN DE LOS PROBLEMAS TRATADOS EN EL PROYECTO..... | 12 |
| 3.2.1-LAMINACIÓN EN FRÍO..... | 12 |
| 3.2.2- PARQUE DE BOBINAS..... | 16 |
| 3.3- ANÁLISIS VIBRACIONAL..... | 19 |
| 3.4- ANTECEDENTES EN LA OBTENCIÓN DE LA FRECUENCIA DE RESONANCIA DE LOS CILINDROS..... | 23 |
| 4-SOLUCIÓN APORTADA EN CUANTO AL PROCESO PRODUCTIVO..... | 25 |
| 4.1-TOMA DE DATOS..... | 25 |
| 4.1.1-EQUIPOS..... | 25 |
| 4.1.2-EXPERIMENTOS CON LOS CILINDROS..... | 29 |
| 4.1.3-EXPERIMENTOS CON LAS BOBINAS..... | 31 |

| | |
|---|----|
| 4.2-PROCESAMIENTO DE LOS DATOS EN FRECUENCIA..... | 47 |
| 4.2.1- OBTENCIÓN DEL ESPECTRO FRECUENCIAL..... | 47 |
| 4.2.2-APLICACIÓN DEL ANÁLISIS FRECUENCIAL A LOS CILINDROS..... | 56 |
| 4.2.3-APLICACIÓN DEL ANÁLISIS FRECUENCIAL A LAS BOBINAS..... | 56 |
| 4.3- RUIDOS PRESENTES EN LOS ESPECTROS..... | 57 |
| 4.3.1-RUIDOS EN EL CASO DE LAS CILINDROS..... | 58 |
| 4.3.2-RUIDOS EN EL CASO DE LAS BOBINAS..... | 58 |
| 4.4-BASE TEÓRICA: FRECUENCIA DE RESONANCIA DE LOS CILINDROS..... | 59 |
| 4.4.1- APROXIMACIONES DIMENSIONALES DEL CILINDRO..... | 60 |
| 4.4.2- APROXIMACIONES DIMENSIONALES DE LA AMPUESA..... | 61 |
| 4.5-FUERZA DEL IMPACTO Y RELACIÓN CON EL ANALISIS TEMPORAL..... | 62 |
| 5-RESULTADOS..... | 63 |
| 5.1-CILINDROS..... | 63 |
| 5.1.1-CORRELACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS CON LAS CONDICIONES EXTERNAS..... | 63 |
| 5.1.2-CÁLCULO DE LA FRECUENCIA DE RESONANCIA DE UN CILINDRO..... | 66 |
| 5.1.3-ANÁLISIS DE RUIDOS Y FILTROS APLICADOS..... | 67 |
| 5.1.4-APLICACIÓN DE DISTINTAS VENTANAS..... | 70 |
| 5.1.5-SIMULACIONES REALIZADAS CON <i>SOLIDWORKS</i> | 71 |
| 5.2-BOBINAS..... | 73 |
| 5.2.1-RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS DEL BLOQUE 1..... | 73 |
| 5.2.2-RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS DEL BLOQUE 2..... | 75 |
| 5.2.3-RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS DEL BLOQUE 3..... | 80 |

| | |
|---------------------------------|----|
| 6-CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN..... | 81 |
| 7-FUTUROS TRABAJOS..... | 82 |
| 7.1-CILINDROS..... | 82 |
| 7.2-BOBINAS..... | 82 |
| 8-BIBLIOGRAFÍA..... | 83 |

1-IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO

DATOS DEL PROYECTO

Título: Análisis de vibraciones en sólidos macizos y laminados en la laminación en frío en Arcelor Mittal Asturias

Fecha de lectura: Junio 2016.

DATOS EMPRESARIALES

Empresa: Arcelor Mittal.

Área: Centro de Investigación y Desarrollo.

Departamento: Mecatrónica.

Tutor Empresa: Rubén Pérez Chust.

DATOS UNIVERSITARIOS

Tutor Académico: Antonio Miguel López Rodríguez.

Área: Robótica y Automatización.

DATOS DE LA AUTORA

Autora: Ana García Fernández.

Titulación: Grado en Electrónica Industrial y Automática.

2.-PROPUESTA

2.1 INTRODUCCION

El presente trabajo se centró en el análisis de vibraciones durante el proceso de laminación en frío. Consta de dos partes:

-La primera se refiere al proceso de fabricación: forma parte de un proyecto de Arcelor para determinar el nivel de seguridad de los rodillos de laminación.

-La segunda parte se encuadra en la manipulación del producto final: es un estudio encaminado a identificar los impactos recibidos por las bobinas de chapa durante su transporte y almacenamiento.

Ambas situaciones tienen en común el método utilizado en el tratamiento, la medida y cuantificación de los resultados. El sensor de medición y registro de las vibraciones se basa en un acelerómetro de 3 ejes.

En el caso de los cilindros de laminación, la imposibilidad de poder controlar todos los parámetros que intervienen en el proceso da lugar a que, en determinados casos, acumulen elevadas tensiones internas que los desestabilizan. Esto hace que se agrieten y puedan llegar a explotar.

Este fenómeno es sumamente peligroso por lo que, como precaución, es necesario desmontar el cilindro del tren de laminación para introducirlo en una camisa de seguridad. Empíricamente, se ha establecido un tiempo de reposo de 24 horas dentro de la camisa para lograr unas condiciones mínimamente seguras. Pese a ello no sería la primera vez que, transcurrido este periodo, el cilindro acaba por explotar.

Por esta razón, sería muy interesante disponer de un sistema de medición que determinase de forma precisa cuando el cilindro ha dejado de vibrar. Para conseguirlo procede centrarse únicamente en analizar las vibraciones en torno a la frecuencia de resonancia del cilindro por entender que esta es la única situación capaz de generar la energía suficiente como para que se produzca su explosión. Además, fijarse sólo en una banda estrecha de vibraciones permitirá evitar muchas de las posibles interferencias que se producen en un ambiente industrial como el estudiado.

Este proyecto cuenta con un antecedente basado en un sensor similar desarrollado en 2012 por Arcelor Mittal EEUU en Illinois. No obstante, como se verá más adelante, se discrepa en la forma de obtener la frecuencia de resonancia. Por este motivo se pretende hallar la base teórica de dicha frecuencia. Esto permitirá aportar un fundamento sólido al estudio y acotar una banda frecuencial para cilindros diferentes sin necesidad de realizar mediciones *in situ* lo que es de gran relevancia para un centro de investigación que atiende a plantas situadas en todo el globo ya que representa un ahorro enorme en gastos de desplazamiento.

En la fase de manipulación del producto final el trabajo desarrollado marca el inicio de un proyecto innovador que pretende distinguir como se impacta a una bobina de chapa

(dirección y magnitud del golpe) a través del estudio frecuencial de las vibraciones producidas.

Las bobinas son transportadas por un puente grúa. En su manejo reciben frecuentes impactos que en algunos casos no son apreciados a primera vista y es el cliente quien los detecta, lo que supone un importante sobrecoste directo al que hay que añadir la mala imagen empresarial generada. Identificar la dirección del golpe y si ha podido tener fuerza suficiente como para causar daños ayudaría a evitar estos problemas.

En este caso no existe ningún antecedente y la determinación de si es posible extraer información útil del análisis vibracional del golpe ya constituye una primera fase del proyecto.

2.2-OBJETIVOS

- Determinar la frecuencia de resonancia del cilindro de laminación.**
- Aportar una base teórica que apoye los resultados experimentales** debido a las discrepancias surgidas a la hora de determinar la frecuencia de resonancia de acuerdo con el estudio de Arcelor Mittal EEUU-Illinois.
- Detectar y clasificar los impactos en las bobinas de chapa elaboradas según su dirección en bandas frecuenciales.**
- Determinar y clasificar los impactos más fuertes sobre las bobinas.**

2.3-ALCANCE

Para determinar la frecuencia de resonancia del cilindro se ha realizado un análisis frecuencial en el cual:

- Se han estudiado las señales obtenidas fijándose en fenómenos que puedan deberse a interferencias propias del ambiente de trabajo. Las mediciones se tomaron en la planta de laminación en frío donde los ruidos e interferencias electromagnéticas son comunes y que por tanto, deben ser eliminadas.
- Se han aplicado filtros con el fin de rechazar ruidos e interferencias electromagnéticas. También se observó el efecto de la aplicación de diferentes ventanas en el espectro frecuencial.
- Una vez determinada la frecuencia de resonancia se buscó darle una base teórica sólida. Para ello se pensó en apoyarse en la obra de reconocidos expertos en mecánica clásica, teoría de máquinas y física así como en programas de diseño mecánico.

En el caso de las bobinas:

- Inicialmente, para ser capaces de distinguir los distintos tipos de impacto se desarrollaron experimentos en un ambiente controlado que no implicase movilizar sistemáticamente costosos recursos como el puente grúa o una bobina acabada.
- Se buscaron materiales específicos que simulasen los impactos verticales, laterales y las suspensiones de las bobinas originales con el fin de distinguir bandas frecuenciales para el impacto lateral, vertical y la suspensión.
- Vistos los alentadores resultados obtenidos con estas mediciones, se trasladó la experiencia a un puente grúa y unas bobinas a escala.
- Finalmente, se desarrolló un ensayo para determinar las variaciones en la fuerza del impacto. Para evitar dañar las bobinas este experimento se desarrolló con materiales que sustituyen el acero laminado y el gancho del puente grúa.

2.4-PARÁMETROS RELEVANTES

Por lo que respecta a los cilindros fue necesario determinar:

- Sus dimensiones. Para ello se dispuso de modelos presentes en la planta de laminación en frío de Arcelor Mittal Avilés.
- Composición. Este dato también procede de la acería de Avilés.
- Dimensiones, material y planos de las ampuestas. Estas se emplean como elemento encargado de la suspensión y guía de los cilindros y se colocan en ellas cuando se les excita para el análisis vibracional. Sus características son necesarias para cualquier simulación. Se ha dispuesto de planos de las instaladas en el tren de laminación de la empresa en Avilés.

En el caso del estudio llevado a cabo con las bobinas, se considera relevante:

- Las dimensiones y material de las mismas. Existen diferentes modelos de bobinas entre las que se incluyen aquellas hechas a medida para cada cliente. Dado que el abanico es muy amplio, se centró el estudio en las utilizadas durante las pruebas.

Durante el desarrollo de todos los experimentos se ha tenido especial cuidado en recoger todos los parámetros que, incluso no influyendo directamente, podrían afectar en un desarrollo posterior. Este punto se desarrollará más adelante donde se demostrará que existen condicionantes (tipo de eslingas, cunas o materiales de aislamiento) que, aunque tienen cierto efecto en el análisis no resultan fundamentales pues no alteran los datos de forma sustancial.

3-ANTECEDENTES

3.1-CONTEXTO EMPRESARIAL

3.1.1-ARCELOR MITTAL

El grupo Arcelor Mittal es la mayor empresa siderúrgica a nivel mundial con presencia en 60 países y una capacidad de producción de 119 millones de toneladas anuales. La planta situada en Asturias es la única siderurgia integral de España y en ella se fabrica una cuarta parte del acero nacional. Los productos obtenidos se dividen en planos (chapa gruesa, hojalata, galvanizado, galvanizado pintado) y largos (carril y alambrón).

3.1.2-CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO DE ARCELOR MITTAL

El centro de investigación tiene la misión de mejorar el proceso productivo del acero mediante el aporte de innovadoras tecnologías así como de proveer de nuevas soluciones a los problemas ya existentes.

Ubicado en Avilés, cuenta con una gran plantilla de investigadores multidisciplinares: químicos, matemáticos, ingenieros...Su trabajo va dirigido a todas las plantas de Arcelor Mittal en el mundo y es destacable el carácter internacional de su equipo.

3.2- UBICACIÓN DE LOS PROBLEMAS TRATADOS EN EL PROYECTO

Tanto el área de análisis de los cilindros como la de las bobinas están ubicadas en las instalaciones de laminación en frío de Arcelor Mittal Asturias. Los cilindros forman parte del conjunto de herramientas para llevar a cabo la laminación. Las bobinas son el producto final del proceso y se almacenan en el parque de bobinas donde tiene lugar la manipulación objeto de estudio en el presente trabajo.

A continuación se pasa a exponer el proceso de laminación en frío junto con las variables más importantes del mismo. Finalmente, se describirá el parque de bobinas y las variables de mayor influencia.

3.2.1-LAMINACIÓN EN FRÍO

La laminación es un proceso de conformado metálico que consiste en reducir la sección transversal de un metal al forzar a que este pase entre dos cilindros de generatriz rectilínea. La laminación en frío es aquella que se lleva a temperatura ambiente (frente a la laminación en caliente que tiene lugar por encima de la temperatura de recristalización del metal).

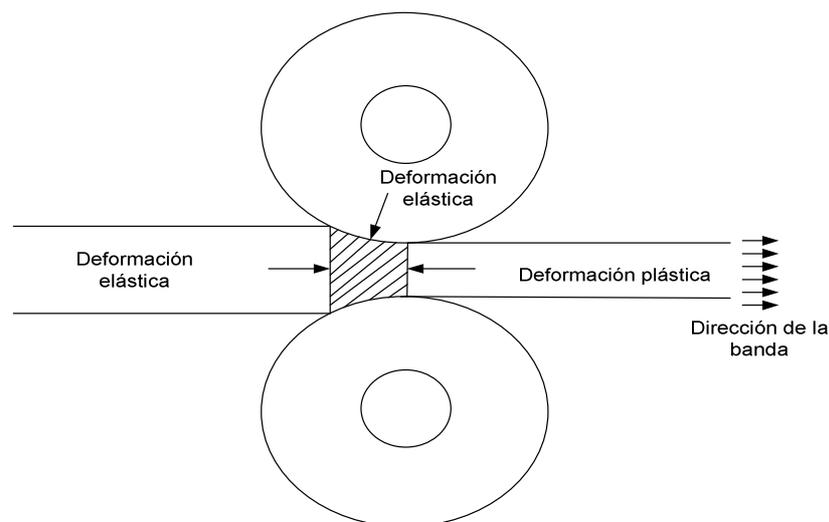


Imagen 1: detalle del proceso de laminación. Imagen extraída del libro virtual "El proceso siderúrgico".

La laminación en frío se aplica después de la laminación en caliente, produciendo espesores muy reducidos, con un excelente acabado superficial, un buen control dimensional y una mejora de las propiedades mecánicas debidas al endurecimiento por deformación. En el proceso de laminación en frío se llega a reducir el espesor de la banda entre un 40% y 90% por la acción conjunta de la fuerza aplicada por los cilindros y la tensión de la banda.

El proceso de laminación en frío se aplica a la obtención de productos planos: hojalata, galvanizado y galvanizado pintado.

ELEMENTOS DE LA LAMINACIÓN EN FRÍO

La reducción del espesor se lleva a cabo en un tren de laminación que está formado por cajas. Cada caja contiene un número de cilindros (caja cuarta: 4 cilindros, sexta: 6 cilindros...) donde se distinguen los cilindros de trabajo (en contacto directo con la banda) y que siempre son 2, y los cilindros de apoyo (en contacto con los de trabajo) cuyo número varía en función de tipo de caja.

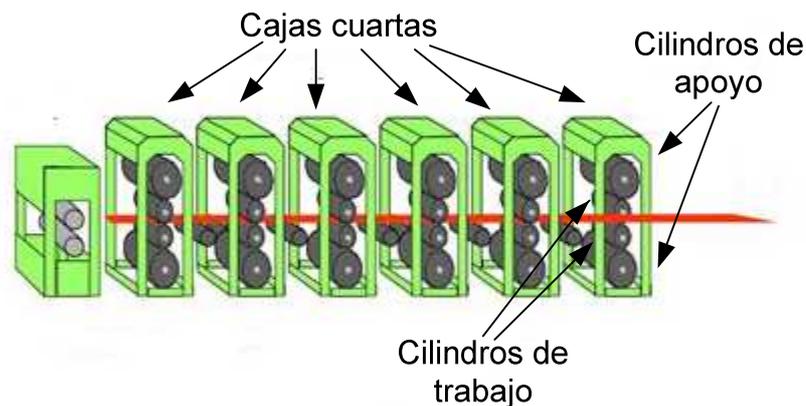


Imagen 2: Tren de laminación compuesto por 6 cajas cuartas. Imagen extraída del libro virtual "El proceso siderúrgico".

FUERZAS Y TENSIONES DURANTE LA LAMINACIÓN EN FRÍO

El objeto del estudio vibracional de los cilindros es determinar cómo evolucionan las tensiones internas causadas por las fuerzas a las que se ven sometidos durante el proceso de laminación.

La laminación en frío involucra de por sí fuerzas importantes que no generan problemas en los cilindros. Si durante el proceso existe alguna complicación, las fuerzas aumentan su magnitud con lo que las tensiones internas acumuladas en los cilindros pueden resultar peligrosas conduciendo a la destrucción del mismo.

Un proceso de laminación normal involucra unas fuerzas que dependen de:

- La resistencia del metal a la deformación.
- La reducción a efectuar.
- El espesor inicial.
- Las tensiones de entrada y salida.
- Los diámetros de los cilindros de trabajo.
- El estado superficial de los cilindros.
- El aplastamiento de los cilindros.

-La lubricación entre banda y cilindros.

PROBLEMAS SURGIDOS DURANTE LA LAMINACIÓN EN FRÍO

Durante la laminación en frío es necesario tener un riguroso control de los parámetros que se describirán a continuación. Estos son críticos ya que están directamente relacionados con la aparición de elevadas tensiones internas en los cilindros.

-Deformación de los cilindros: la laminación es un proceso que incorpora dos metales: la banda y los cilindros. La banda va a ser deformada plásticamente. El cilindro, tiene que sufrir una cierta deformación elástica. Al girar el cilindro y entrar en contacto con la banda, se aplanan y al liberarse de la presión, el cilindro vuelve a su forma circular original.

-Rozamiento: las fuerzas de rozamiento entre banda y cilindros son necesarias ya que sin ellas no sería posible el “arrastramiento” de la banda en el proceso de laminado. Si las fuerzas de rozamiento son muy elevadas se limitan las posibilidades de reducción y se obtendrá una banda con los bordes ondulados; si por el contrario, son excesivamente bajas, provocan que la banda y los cilindros patinen con lo que la chapa obtenida tendrá “cazuela” (la banda adquiere forma cóncava en el centro).

Las fuerzas de rozamiento se controlan a través del concepto de lubricidad. Los factores más importantes que impiden la correcta lubricidad son:

- Boquillas obstruidas o mal alineadas.
- El diámetro del cilindro de trabajo. Al aumentar este, aumenta la masa y, por consiguiente, la fuerza de rozamiento.
- La velocidad de la caja del tren.
- La rugosidad de la superficie de la banda: si al entrar está demasiado rugosa, tendrá efectos perjudiciales para el proceso.
- La rugosidad de la superficie de los cilindros. Los cilindros de trabajo, con el uso, pueden llegar a desgastarse y por tanto a ser demasiado lisos.
- La reducción, que no debe ser demasiado elevada.

-Vibraciones: existen tres tipos diferenciados de vibraciones que se introducen dentro de los trenes de laminación durante el proceso. Se producen cuando el tren se comporta como si fuese un enorme muelle y vibra en determinadas frecuencias. Todas ellas aumentan las fuerzas a las que se ven sometidos los cilindros y causan deformaciones en la chapa que deben ser evitadas.

-Vibraciones en la tercera octava: la frecuencia de este sistema oscilatorio en un tren es de 30-140 Hz aproximadamente.

En las vibraciones en tercera octava, los cilindros de apoyo superiores y sus ampuestas actúan como masa; el contacto cilindro contra cilindro de los

cilindros de trabajo, los husillos y el castillete actúan conjuntamente como muelle.

Las vibraciones en tercera octava se desencadenan normalmente con mucha rapidez — 2 ó 3 segundos— alcanzando una amplitud severa en la que todo el castillete tiembla. Normalmente ello sucede en las últimas cajas de los trenes tándem, a velocidades de funcionamiento altas. Al rebotar los cilindros de trabajo contra la banda, se producen en ella importantes variaciones en el espesor.

-Vibraciones en la quinta octava: tipo de vibración más común. La frecuencia de esta oscilación se mueve entre 600 y 700 Hz.

Los dos cilindros de trabajo y sus ampuestas actúan como una masa y rebotan juntos entre los cilindros de apoyo. El efecto muelle producido es la resultante de los dos puntos de contacto entre los cilindros de trabajo y los cilindros de apoyo.

El efecto sobre la banda es el que denominamos persiana: estrechas acanaladuras onduladas tan ligeras que no producen variación en el espesor.

Estas vibraciones tienden a producirse cuando un tren funciona a velocidad constante durante periodos prolongados. Teniendo en cuenta que la frecuencia natural del tren es de 600 ciclos por segundo, las marcas producidas por la vibración aumentan gradualmente en los cilindros de apoyo, haciéndolas cada vez más profundas. Manteniendo el tren a velocidad constante, el problema empeora progresivamente.

-Vibraciones por torsión: la frecuencia de esta oscilación es mucho más lenta que la tercera o quinta octava, se halla sólo entre 5 y 15 Hz.

Los arboles actúan como un muelle de torsión: los cilindros del tren actúan como volantes de inercia. Puede ocurrir a veces a velocidades bajas debidas a un cierto rozamiento en el paso entre cilindros donde el coeficiente de rozamiento efectivo disminuye al aumentar la velocidad. Si esto sucede, aparecerán bandas transversales claras, y se ocasionarán ligeros cambios en el espesor. A alta velocidad, esta vibración puede ser debida a una cierta inestabilidad en el control de velocidad del motor de accionamiento.

CONSECUENCIAS DE UNA MALA LAMINACIÓN

Si la laminación no se hace correctamente, las fuerzas a las que se ven sometidas los cilindros aumentan de forma considerable lo que genera elevadas tensiones internas que provocan vibraciones en los cilindros.

Cuando esto se produce, puede ocurrir que el cilindro se recupere y vuelva a un estado de equilibrio (con lo que volvería a ser perfectamente funcional) o que las vibraciones fracturen el cilindro. La fractura puede llevarse a cabo de dos formas: bien generando fallas o roturas

en el cilindro o bien haciendo que explote. Estos efectos conllevan la inutilización de los cilindros y aunque la probabilidad de explosión es muy baja resulta muy peligrosa.

Debido al riesgo de explosión, en el momento en que se sospecha que un cilindro está inestable se saca del tren de laminación y se coloca en unas ampuestas dispuestas a tal efecto. Dichas ampuestas se montan a su vez por pares (una encima de otra) y se introducen en una estructura (camisa) para evitar que en el supuesto de que cilindro fallase o explotase se produzcan graves daños.

Actualmente, el tiempo que se mantienen los cilindros dentro de la camisa se ha determinado a través de la experiencia considerando que 24 horas son suficientes. Esto introduce 2 problemas: el primero de seguridad ya que se han producido casos aislados en que el cilindro explota después de ese tiempo y el segundo una pérdida de eficiencia pues se estima que en muchos casos el cilindro se ha relajado (ha dejado de vibrar) antes de 24 horas lo que implica que hay cilindros útiles que no están trabajando.

3.2.2- PARQUE DE BOBINAS

Es el lugar donde se almacenan las bobinas desde que se fabrican hasta que son recogidas para su entrega. La factoría de Arcelor Mittal Asturias cuenta con un parque de bobinas de 20.000 m² con una capacidad de almacenamiento de miles de unidades.



Imagen 3: Parque de bobinas. Imagen extraída del libro virtual “El proceso siderúrgico”.

En este espacio las bobinas son almacenadas unas junto a otras reposando en lo que se denominan cunas. También se apilan. La manipulación de las bobinas es un proceso largo y laborioso porque hay que sacarlas del tren, llevarlas al parque y, finalmente, depositarlas en el medio de transporte que las conducirá a su destino.

La manipulación en el interior de la industria se realiza con el puente grúa:



Imagen 4: Manipulación de las bobinas dentro del parque. Imagen extraída del libro virtual “El proceso siderúrgico.”

El puente grúa cuenta con un gancho especialmente diseñado para la elevación de las bobinas:



Imagen 5: Gancho del puente grúa. Imagen extraída del libro virtual “El proceso siderúrgico”.

En el parque se mueve un elevado volumen de bobinas diariamente (es difícil precisarlo ya que las capacidades de producción se ajustan a la demanda).

El proceso de manipulación es delicado; es fácil dañar las bobinas y dado que se trata de un producto final, las consecuencias de que esto suceda tienen una gran repercusión económica.

CONSECUENCIAS DE UNA MALA MANIPULACIÓN

En este proceso (coger la bobina, moverla y posarla) es inevitable, que a veces se produzcan impactos. Las bobinas golpeadas pueden, en función de la fuerza y la localización del golpe, ser útiles para su venta o deben ser retiradas. En cualquier caso, no siempre se pueden apreciar las deformaciones a simple vista y como se trata de un producto final puede suceder que sea el cliente el que rechaza las bobinas defectuosas, con consecuencias no deseables de sobrecoste en el transporte (se debe pagar el envío y la recogida de un material no viable) y de mala imagen empresarial.

3.3- ANÁLISIS VIBRACIONAL

El análisis de vibraciones es una técnica de estudio y mantenimiento predictivo que se haya en continuo crecimiento en la industria. Permite obtener información acerca del funcionamiento de sistemas complejos sin alterar el comportamiento de los mismos y sin parar la cadena de producción.

Su campo de aplicación es inmenso y los fallos que permite encontrar son:

- Desbalanceo.
- Desalineamiento.
- Defecto de rodamientos.
- Ejes torcidos.
- Desajuste mecánico.
- Defecto de transmisiones por correa.
- Defectos de engranajes.
- Problemas eléctricos.

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS ONDAS VIBRACIONALES

El estudio vibracional analiza las distintas magnitudes que forman la señal recogida seleccionando aquellas de especial interés para el problema a tratar.

-Amplitud: indica cuanto se desplaza un cuerpo y, por tanto, la cantidad de movimiento que la masa experimenta con respecto a su posición de reposo. Permite averiguar la gravedad del problema.

-Frecuencia: es el número de ciclos que tienen lugar en la unidad de tiempo.

Este parámetro cobra especial importancia cuando se analizan elementos rotativos ya que hay una relación importante entre frecuencia y velocidad angular debida a que las fuerzas cambian de dirección y amplitud de acuerdo con la velocidad de giro.

En otro tipo de sistemas el análisis frecuencial puede ser de suma utilidad. Es importante resaltar que para llevarlo a cabo con éxito se precisa un conocimiento exhaustivo de la naturaleza del problema ya que cada elemento muestra una frecuencia de vibración distinta.

La frecuencia es inversamente proporcional al periodo por lo que la información extraída no difiere, si bien, en función de la naturaleza del problema puede ser más apropiado referirse a uno u otro.

-Velocidad: tiene en cuenta el desplazamiento y la frecuencia. Es por tanto un indicador directo de la severidad de las vibraciones.

-Aceleración: proporciona la medida del cambio de velocidad con respecto al tiempo. La aceleración está relacionada con la fuerza que provoca la vibración, algunas de ellas se producen a altas frecuencias, aunque velocidad y desplazamiento sean pequeños.

Las aceleraciones en el mundo de la mecánica se traducen en desplazamiento que en el caso de las vibraciones son generalmente indeseadas. Una elevada aceleración implica un elevado producto de masa por velocidad. Este aspecto resulta sumamente delicado en sistemas mecánicos y es un punto en el que se ha centrado la atención en el desarrollo del presente trabajo.

TIPOS DE ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Principalmente existen 2 tipos de estudio.

Análisis de frecuencia: es en el que se utilizó mayoritariamente en el presente proyecto. Se basa en el teorema de Fourier por el cual cualquier señal periódica y continua puede ser descompuesta como suma de senoidales.

Dado que se trabajará con señales digitales (discretas) y que, para resolver la discrepancia de que las ondas senoidales y cosenoidales son de duración infinita frente a nuestros muestreos cuya duración es finita, se supondrá que la señal se repite periódicamente. Por tanto se aplicará la Transformada de Fourier discreta (DFT).

El resultado de aplicar la DFT generará una señal frecuencial en la cual el armónico principal es la frecuencia fundamental de la señal y el resto de armónicos marcan la forma de la señal.

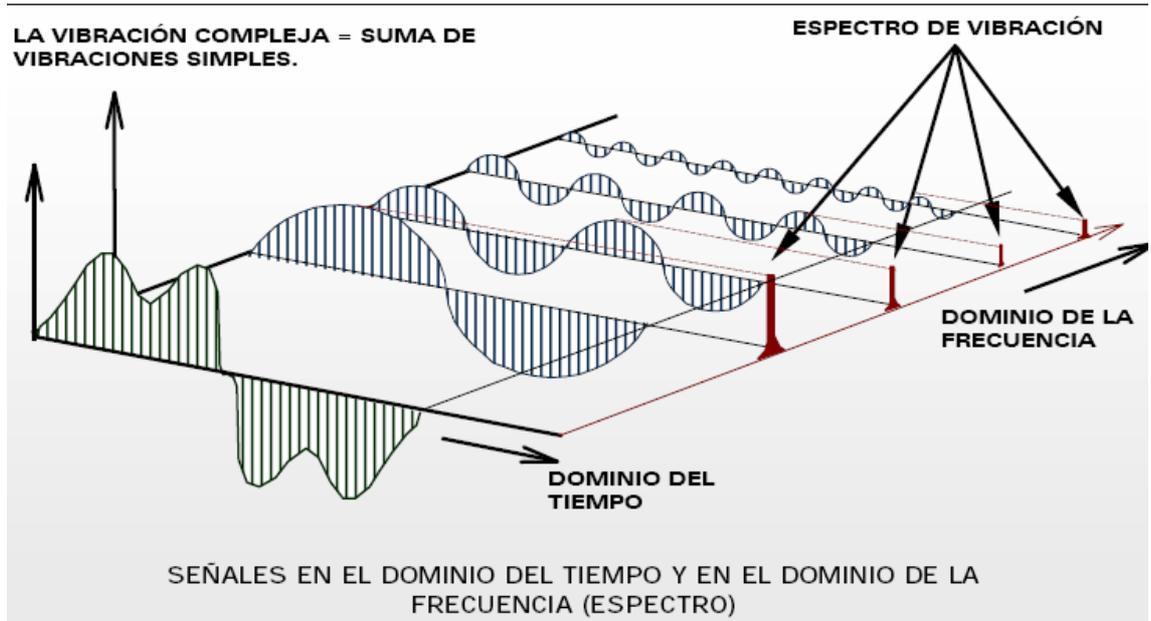


Imagen 6: descomposición de una señal en suma de senoidales. Imagen extraída de "wikipedia.org".

Análisis de tiempo: es un complemento del análisis de frecuencia puesto que sirve para confirmar diagnósticos en aquellos fallos que poseen espectros muy parecidos. También se utiliza cuando se quiere comparar la fuerza de distintos impactos.

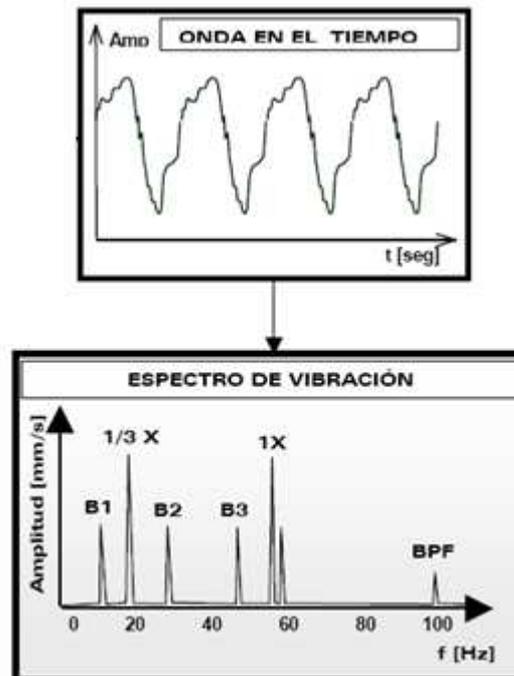


Imagen 7: Comparativa entre una señal en el tiempo y la misma en frecuencia. Imagen extraída de "wikipedia.org".

ENSAYOS Y OBTENCIÓN DE DATOS

La obtención de vibraciones dependerá del problema en cuestión y de la finalidad con la que se realice el estudio.

-En caso de que se trate de elementos mecánicos móviles, se aconseja realizar las medidas durante el propio funcionamiento de la instalación para detectar cualquier desviación del funcionamiento normal. Cada conjunto tiene que ser estudiado por separado ya que la vibración compuesta de la máquina será la superposición de las vibraciones de los elementos simples que la componen, si bien existen piezas de especial importancia, como son los apoyos de los rodamientos, ya que por estos se transmiten las vibraciones.

-En el caso de elementos estáticos para realizar un estudio vibraciones será necesario una excitación previa del elemento. Para ello existen 2 técnicas:

-Excitación por impulso: cuando la muestra se somete a un golpe que genera vibraciones que son detectadas por un sensor.

-Barrido de frecuencia: cuando el modelo recibe un estímulo de frecuencia variable. La respuesta es registrada y analizada de acuerdo con la naturaleza del objeto y el barrido realizado.

3.4- ANTECEDENTES EN LA OBTENCIÓN DE LA FRECUENCIA DE RESONANCIA DE LOS CILINDROS

Un estudio llevado a cabo por Arcelor Mittal Illinois-Chicago publicado el 2 de Agosto de 2012 en EEUU se centró en el desarrollo de un sensor para la monitorización del estrés en los cilindros.

En él, al igual que se ha hecho en este trabajo se debe acotar la frecuencia de resonancia de los cilindros. Esto se debe a que las vibraciones, originadas por las elevadas tensiones a las que se han visto sometidos los cilindros como fruto de un mal proceso de laminación, sólo se considera que puedan tener la energía suficiente como para provocar la falla o explosión si se producen en torno a la frecuencia de resonancia. Identificar esta frecuencia permitiría acotar una banda frecuencial en la que centrar nuestro interés y de cara al desarrollo de equipos futuros permitiría una mayor eficiencia pues sería suficiente con analizar un estrecho espectro de frecuencias.

El estudio americano relaciona la frecuencia de resonancia de los cilindros con la velocidad de propagación del sonido en el mismo. Se considera que la velocidad de propagación en el acero es de 6.000 m/s (este parámetro puede variar ampliamente pues el sonido es una vibración mecánica que se ve afectada por el material, la temperatura...) no se expone en el informe cómo se calculó el parámetro: ni el tipo de acero considerado, ni la temperatura, etc... Aceptando como una aproximación válida esa velocidad, se calcula la frecuencia como la velocidad dividida entre la longitud del cilindro, es decir, la frecuencia de resonancia de los cilindros de laminación empleados por la factoría que son de 10 m de largo rondaría los 600 Hz.

Desde el departamento de Mecatrónica de Arcelor Mittal Asturias se llevó a cabo una búsqueda a fin de relacionar la velocidad de propagación del sonido en un medio con la frecuencia de resonancia de este pero no se obtuvo ningún resultado.

Siendo más prácticos, se trató de ver si la fórmula era aplicable para el caso de los cilindros de la acería asturiana:

-Una velocidad de 5.184m/s (aproximada) y una longitud en torno a los 4 m generaban una frecuencia de resonancia de 1.300 Hz. Con el sensor disponible no se puede medir por encima de los 1.024 Hz pero, en las medidas realizadas sí que se puede distinguir un primer armónico que se correspondería con la frecuencia de resonancia (se verá más adelante en el presente trabajo) y se encuentra en torno a los 350Hz.

Dado que no existe base científica encontrada que permita hallar una relación entre la velocidad del sonido en el acero y su frecuencia de resonancia y que de forma práctica no se ha podido corroborar con los cilindros de la acería de Avilés se decidió centrar el estudio en la frecuencia de resonancia de la industria avilesina dando mucha importancia a tratar de verificar de alguna forma (bien apoyándose en teorías físicas, algoritmos matemáticos etc...) porqué sale esa frecuencia.

Hallar la base teórica de dicha frecuencia permitirá no solo proporcionar una base sólida al estudio sino también, acotar el rango de frecuencias de cilindros diferentes sin necesidad de realizar mediciones previas lo que permitirá ahorrar multitud de desplazamientos y recursos que en una empresa del tamaño de Arcelor Mittal, en la que desde el Centro de Desarrollo Tecnológico de Asturias se pretende dar soluciones a nivel mundial, es de suma importancia.

4-SOLUCIÓN APORTADA EN CUANTO AL PROCESO PRODUCTIVO

4.1-TOMA DE DATOS

4.1.1-EQUIPOS

Para la toma de datos se empleó un equipo proporcionado por el departamento de Electrónica de la Universidad de Oviedo.

El equipo consta de:

-Parte hardware: formada por un sensor destinado a la captación de las vibraciones a través de la medida de la aceleración en los 3 ejes espaciales.

-Parte software: aplicación que recibe los datos medidos y permite un procesamiento inicial de la señal y la generación de unos ficheros para el almacenamiento de los datos en crudo.

Es reseñable, por tanto, que se cuenta con un sistema de conversión analógica digital. Un parámetro fundamental es la frecuencia de muestreo de 2.048Hz lo que, por el teorema de *Nyquist-Shanon*, permite reconstruir una señal periódica de una frecuencia de hasta 1.024 Hz. Este rango se estimó que cumplía con creces las necesidades presentes.

A continuación se pasa a describir brevemente el sistema empleado.

HARDWARE

El *hardware* se compone de dos partes: el sensor y la batería. Ambos están separados por un cable de 1.750 mm. El encapsulamiento del sensor le permite soportar impactos elevados y el hecho de que esté separado de la batería por el cable evita que esta sufra daños.

El conjunto del sensor está formado por: un acelerómetro de tres ejes, un microcontrolador que gestiona el acelerómetro y las comunicaciones y un módulo de transmisión de datos vía WIFI. Este tipo de transmisión inalámbrica permite que el equipo que registra los datos pueda situarse a una distancia de hasta 12 m del punto de medida, lo que en cualquier entorno industrial se justifica en base a la seguridad.

El módulo de la batería incluye: una batería de 5 horas de autonomía y una placa de circuito impreso (PCB) para gestionar la recarga que se puede efectuar mediante un cable USB.

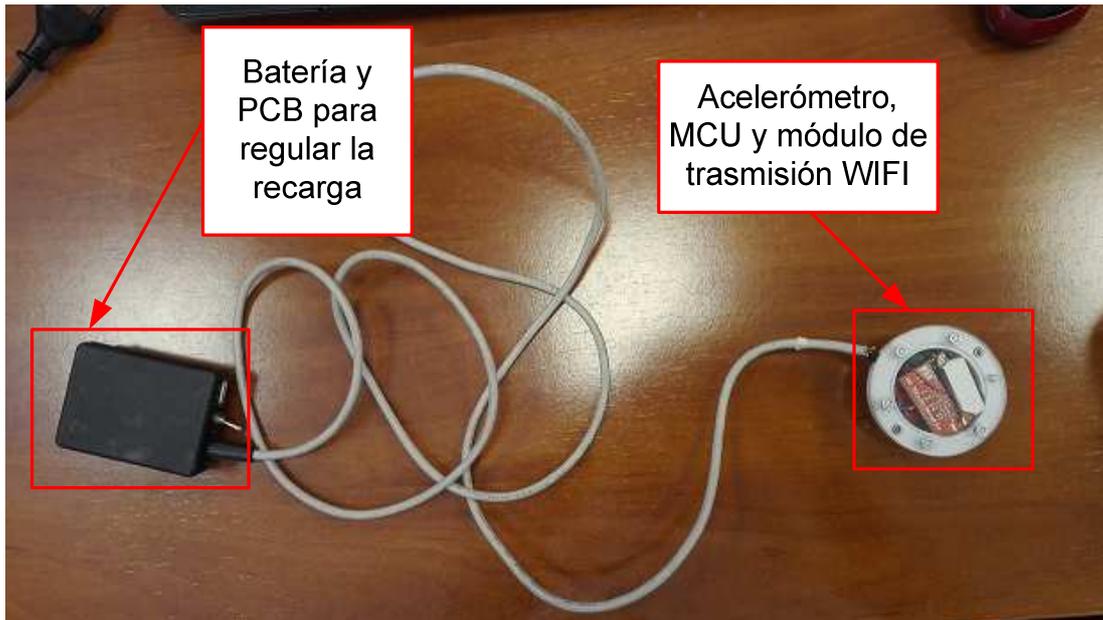


Imagen 8: Sensor.

El diagrama de bloques del sistema es:

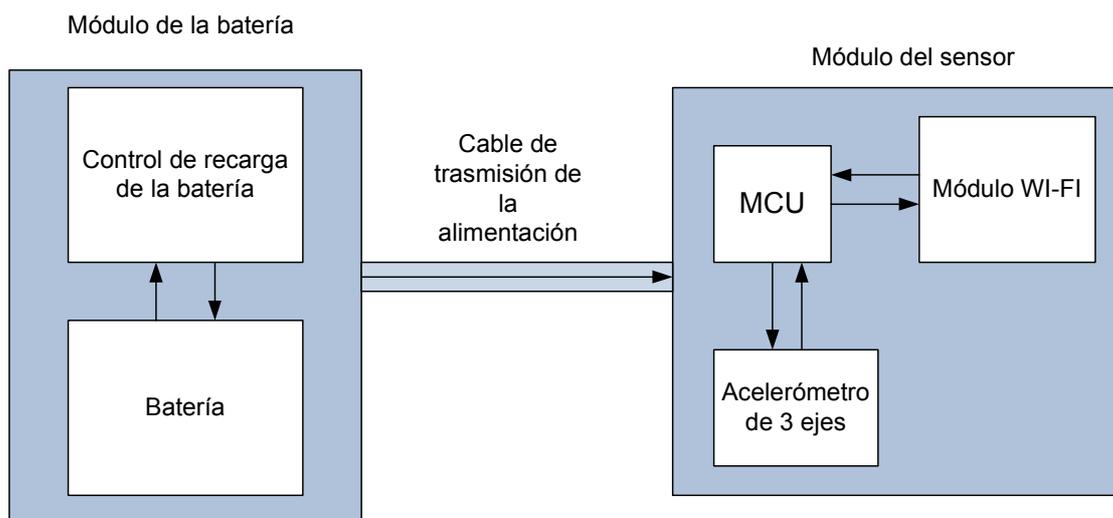


Imagen 9: Diagrama de bloques del sensor.

SOFTWARE

Se compone de dos programas, uno de ellos para la adquisición de datos *acc3canal10b* y otro para su procesamiento *acc1canaloffline*.

Aplicación *acc3canal10b*

Permite registrar los datos y representar los valores proporcionados por el acelerómetro. Contiene un selector de tiempo con el que configurar el periodo durante el que se estarán registrando los datos (desde un mínimo de un minuto hasta un máximo de diez).

Permite ver los siguientes gráficos:

-Canal X, Canal Y y Canal Z: se muestra la aceleración en cada eje en tiempo real.

-Arm_X, Arm_Y y Arm_Z: visualización del procesamiento de la señal en frecuencia en cada eje en tiempo real.

-La gráfica central: muestra todos los datos registrados procesados en frecuencia, y mediante una escala de colores, se destacan los armónicos.

Visualizar los datos procesados al mismo tiempo que se toman y poder comparar los tres ejes de forma simultánea permite interrelacionar los fenómenos que ocurren en los ejes entre sí y su analogía con el mundo físico.

La aplicación genera unos ficheros de datos que contienen los valores en crudo registrados en los ejes así como los valores procesados.

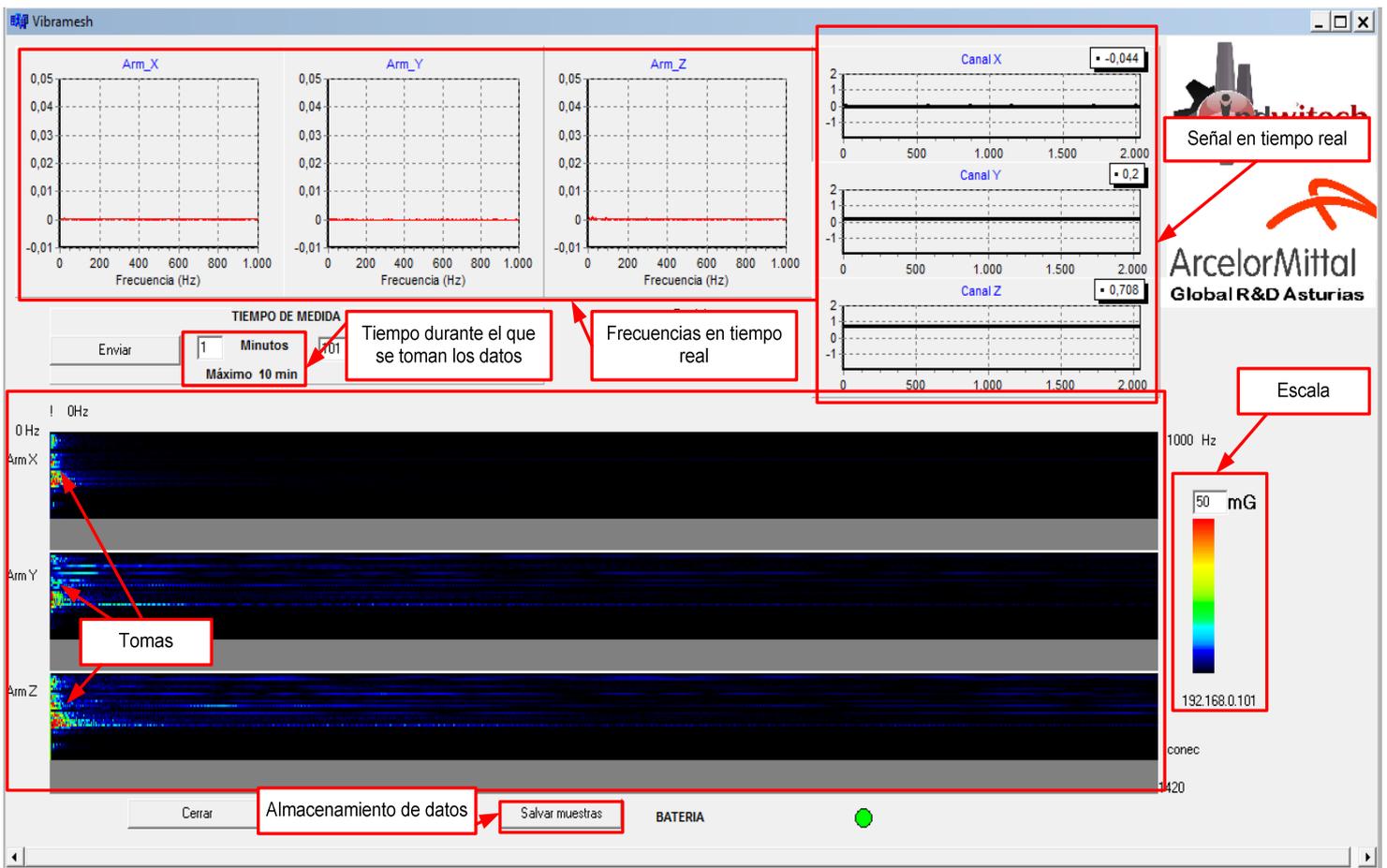


Imagen 10: Captura de pantalla de la aplicación acc3canal10b.

Aplicación *acc3canaloffline*

Permite la visualización de los datos obtenidos mediante la aplicación *acc3cana10b*. Se debe seleccionar el fichero a visualizar y este se muestra de forma que en el eje “y” aparezca cada toma, en el eje “x” aparezcan las frecuencias y en la escala de colores se refleje el valor de la aceleración en mG con los picos en frecuencia resaltados.

Si se desea visualizar una zona concreta se puede seleccionar y aparecerá con un zoom aplicado en la gráfica superior.

Esta aplicación permite una aproximación inicial al problema del análisis frecuencial.

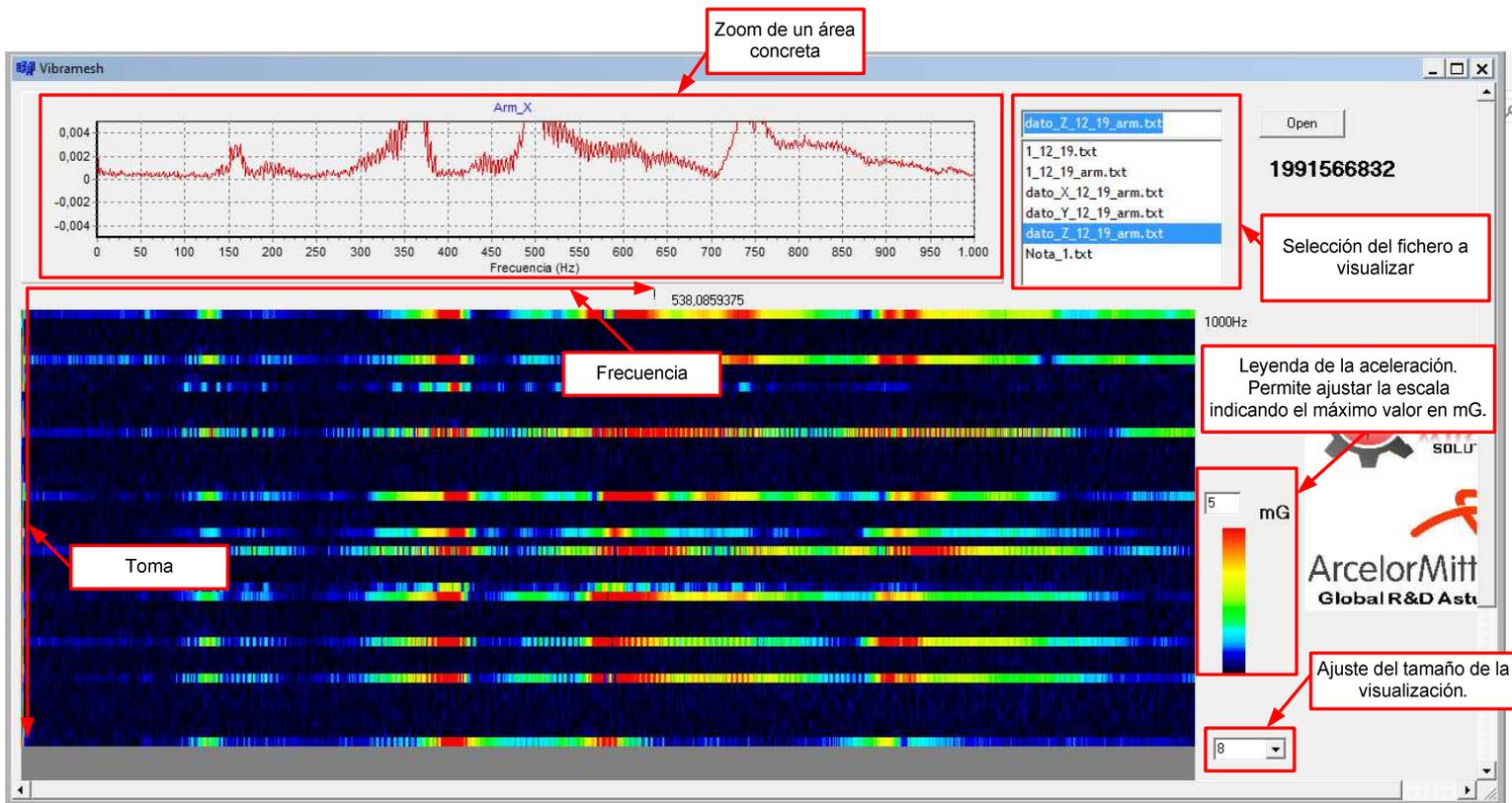


Imagen 11: Captura de pantalla de la aplicación *acc3canaloffline*.

4.1.2-EXPERIMENTOS CON LOS CILINDROS

La toma de datos en los cilindros tuvo lugar en la planta de laminación en frío de la acería de Arcelor Mittal Avilés.

Se empleó un cilindro de tipo de laminación de dimensiones estándar¹:

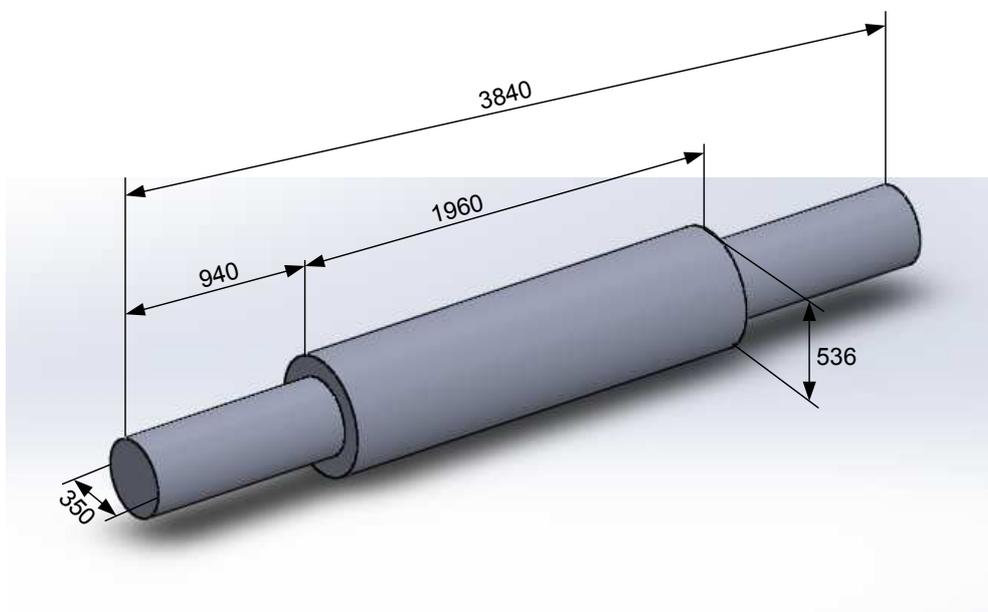


Imagen 12: Dimensiones del cilindro empleado en mm.

El cilindro se colocó en una ampuesa de tipo M192215011_179329_2, cuyo plano se adjunta con el presente trabajo.

Se situó el sensor en un extremo del cilindro el cual se golpeó sucesivamente con una pequeña masa (un destornillador plano de diámetro 5 mm y longitud 150mm).

Los golpes se produjeron en:

- El centro del cilindro.
- El extremo donde se encuentra el sensor.
- El extremo opuesto al sensor. En este último punto se aplicaron en sentido axial al cilindro y en sentido radial.

Los datos fueron registrados durante un minuto.

Se decidió registrar también el ruido existente en el lugar con el sensor fijado al cilindro y sin excitarlo de ninguna forma a fin de medir el ruido del ambiente en el que se tomaron las muestras.

¹ Desde la planta de laminación en frío de Arcelor Mittal Avilés no se ha facilitado ninguna referencia ni plano del cilindro pero se han proporcionado las medidas y el material del modelo que se usa actualmente.



Imagen 13: Toma de datos cilindros.



Imagen 14: Detalle de la colocación del sensor en la toma de datos.

La toma de datos se repitió durante 5 días no consecutivos generando un gran número de datos a procesar para observar patrones y ver la reproducibilidad y la repetitividad.

4.1.3-EXPERIMENTOS CON LAS BOBINAS

Los experimentos con las bobinas se llevaron a cabo en tres bloques diferenciados: bloque I, bloque II y bloque III.

Por un lado se pretendía estudiar de forma controlada lo que puede suceder al golpear las bobinas y saber si es posible distinguir una serie de bandas frecuenciales. Así, una vez que los experimentos se llevasen a la práctica con los equipos disponibles en Arcelor Mittal, se tendría claro como ejecutarlos con el fin de dinamizar su realización. El motivo de esto radica en que llevar a cabo los experimentos con las bobinas reales y el puente grúa involucra una gran cantidad de recursos y se quería ganar eficiencia respecto a este punto.

Por tanto se desarrollaron una serie de pruebas encaminadas a distinguir distintos tipos de golpes de acuerdo a las bandas frecuenciales en que se producen. Estos experimentos conforman el bloque I.

Una vez se analizaron los datos extraídos del primer bloque y se obtuvieron las conclusiones iniciales, se pasó al desarrollo de los experimentos del bloque II.

Por otro lado se pretendió ser capaces de establecer relaciones entre la fuerza del impacto y las señales obtenidas. No se trata medir la fuerza del golpe pero sí de distinguir entre aquellos más o menos fuertes. Para ello se diseñaron los experimentos del bloque III. Estos fueron realizados con materiales de propia disposición en un ambiente controlado. Dada la magnitud de la fuerza a la que se pretendía llegar no se planificó su desarrollo con bobinas reales.

BLOQUE I

Generalidades

Se pretende simular los tres posibles golpes que la grúa le daría a la bobina:

- Impacto desde arriba, simulando el descenso de la grúa para coger la bobina. Se corresponde con el experimento 1.
- Impacto lateral, esto es, lo que sucede al incidir la grúa lateralmente sobre la bobina o al golpear una bobina con otra; experimento 2.
- Impacto que llevaría la bobina cuando, una vez sujeta por la grúa ésta la eleva; experimento 3.

Se han recogido los datos de las simulaciones y tras su análisis, se han distinguido diferentes rangos de frecuencia en los que tienen lugar estos acontecimientos.

Para todos los ensayos se ha empleado una plomada de masa 1.325 g. Para poder simular de la forma más fiel el comportamiento del gancho y la bobina (ambos están fabricados de acero) se procuró que los elementos que se emplean en su lugar (una plomada que representa el gancho y una lámina o disco para imitar la bobina) fuesen de acero.

Se ha tenido la precaución de fijar el acelerómetro a la plomada realizando dos taladros en la última en los que se introducen ajustadamente los dos imanes de fijación del sensor para asegurar que no se produzcan desplazamientos a consecuencia de los impactos.

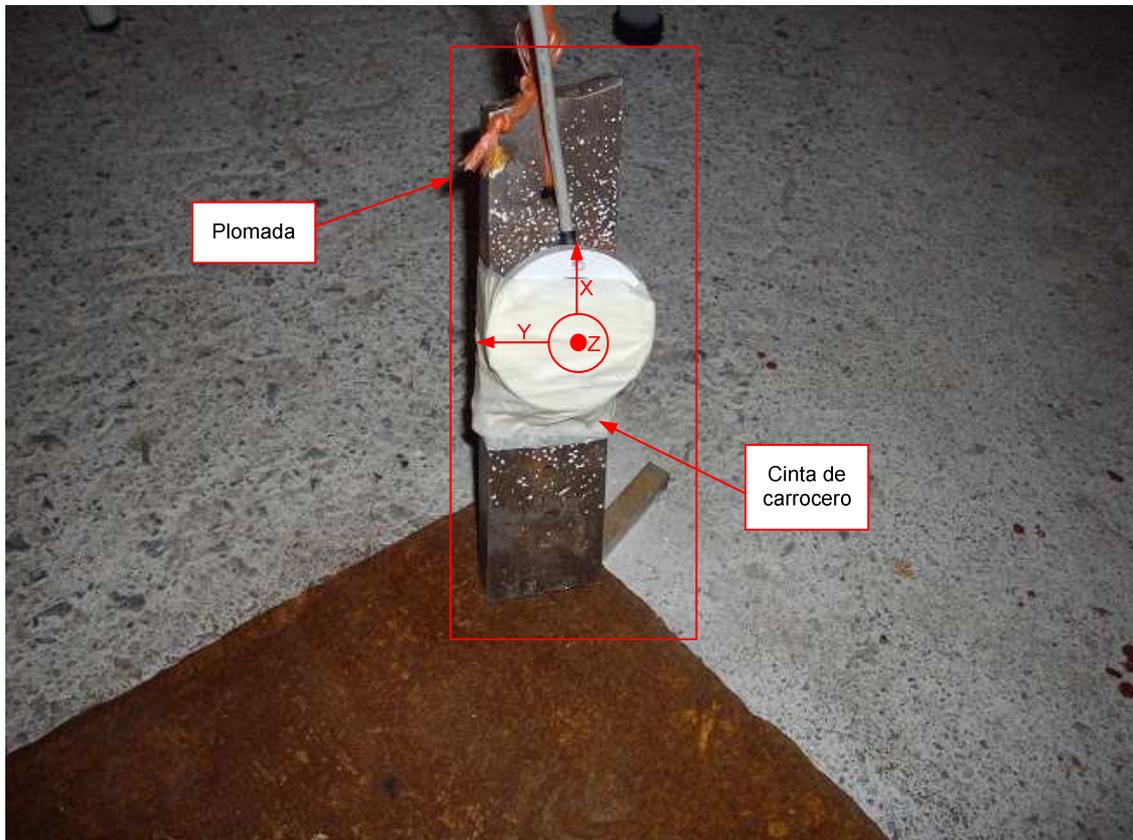


Imagen 15: Detalle de cómo se fijó el sensor a la plomada.

Experimento 1

Se compone de tres ensayos en cada uno de los cuales se han recogido datos correspondientes a sesiones de impacto de 1 minuto.

Ensayo 1

Se realiza un montaje con la plomada suspendida de una cuerda que se deja caer sobre una chapa de acero desde diferentes alturas.

La cuerda es de imitación de esparto y posee una elasticidad similar al cable de acero.

La chapa es de acero de 600x700x5mm y se colocó sobre 3 varillas (también de acero) que permiten generar un plano de apoyo constante en cada ensayo (ya que tres puntos solo generan un único plano) y también permite regular la rigidez del impacto ya que la chapa es mucho más flexible en el centro que en los extremos.

Se hace impactar la plomada en la zona central de la chapa (en esta localización la elasticidad de la chapa es máxima).

Se recogerán datos desde una altura de 300 mm y 600 mm. Para cada altura se deja caer la plomada varias veces registrando los datos durante un tiempo determinado (en este caso, un minuto). Esto forma una sesión de impacto (este concepto se repetirá sucesivamente más adelante). Se realizaron cuatro sesiones de impacto: dos para 300 mm y otras dos para 600 mm.



Imagen 16: Descripción del ensayo 1.

Ensayo 2

Este caso difiere del anterior en la chapa empleada. Se eligió un disco de acero común de 12 mm de espesor y 500 mm de diámetro. Al igual que en el ensayo anterior, el disco está separado del suelo por tres varillas de acero lo que genera un plano de apoyo constante e invariable en cada impacto. La cuerda es la misma que en el ensayo 1 (imitación sintética de esparto).

Se deja caer la plomada desde una altura de 300 mm (dos sesiones de impacto de un minuto).



Imagen 17: Descripción del ensayo 2.

Ensayo 3

Mismo montaje que en el ensayo 2 pero en este caso se coloca una plancha de goma vulcanizada de 7 mm de grosor encima de la chapa. La goma pretende evitar las vibraciones debidas a los rebotes en la plomada con lo que se pretende obtener una señal más limpia de cara a hacer el análisis posterior.

Se deja caer la plomada desde 300 mm de altura. Se repiten los impactos durante dos sesiones de un minuto cada una.



Imagen 18: Descripción del ensayo 3.

Experimento 2

En este caso se hace impactar la plomada lateralmente sobre un perfil de acero común. En cada impacto se aleja una distancia constante de 35 mm y se deja precipitar por su propio peso sobre la varilla de acero. La altura del péndulo es de 1.000 mm. Al igual que en los experimentos anteriores, se emplea una cuerda de cable sintético de imitación de esparto debido a que reproduce el comportamiento del cable de acero. La plomada se sujeta con la cuerda en dos puntos separados para garantizar una mayor estabilidad en el impacto. Se realizaron cuatro sesiones de impacto de un minuto cada una.

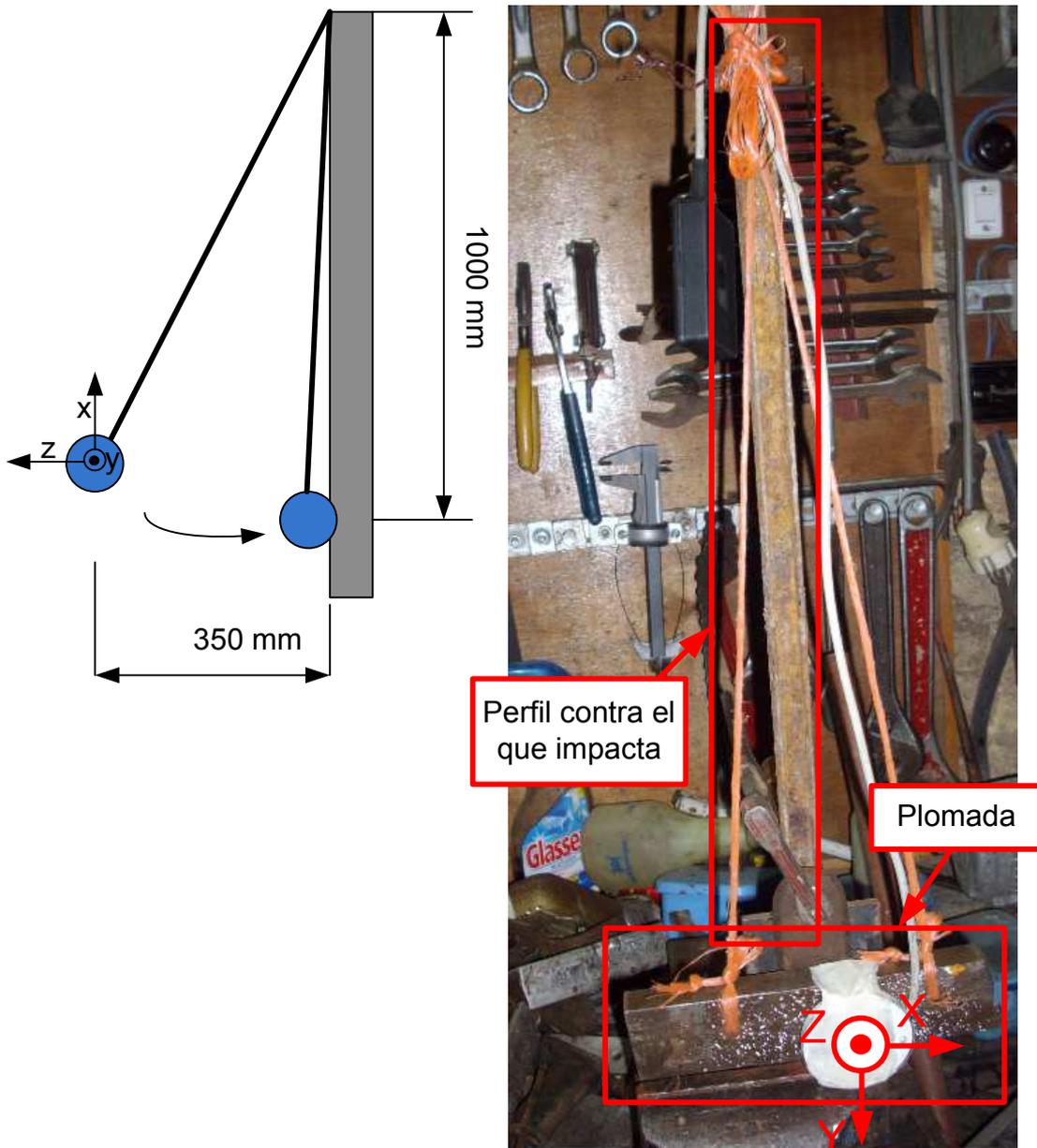


Imagen 19: Descripción del experimento 2.

Experimento 3:

Para este experimento se empleó un motor de 1 kW de potencia y una velocidad de 0.23 m/s que elevaba, mediante un cable de acero de 3.5 mm de diámetro, un conjunto donde se situaba el sensor. Este último estaba sujeto mediante eslingas de nylon al arnés del extremo del cable.

El conjunto estaba formado por la chapa de acero empleada en el experimento 1 (ensayos 2 y 3), la plomada usada en todos los ensayos y una serie de elementos de fijación (imanes para fijar la plomada y cinta de carroceros para fijar las eslingas). Peso total, 24,5 kg.

El procedimiento consistió en accionar el motor, elevar el conjunto y bajarlo sucesivamente. Se realizaron dos sesiones de elevación de un minuto cada una.

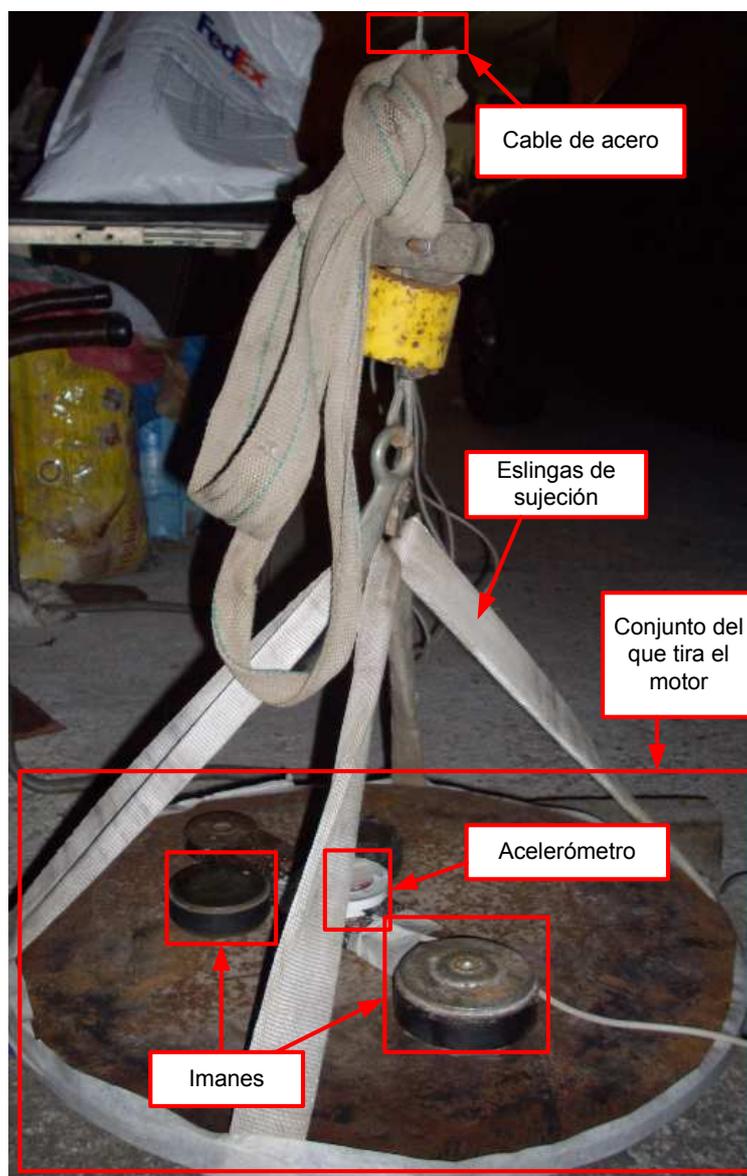


Imagen 20: Experimento 3.



Imagen 21: Detalle de cómo quedan los ejes del acelerómetro en el experimento 3.

BLOQUE II

Los experimentos se realizaron simulando las condiciones existentes en el parque de bobinas de la forma más fidedigna posible. Se emplearon 2 bobinas diferentes de pequeñas dimensiones lo que permite ver si el comportamiento estudiado está afectado por el tamaño. Las bobinas de chapa están escaladas respecto a modelos reales fabricados por Arcelor Mittal. Se decidió hacer las pruebas con ellas por cuestiones de disponibilidad y por considerar que reproducen de forma fiel el comportamiento real.

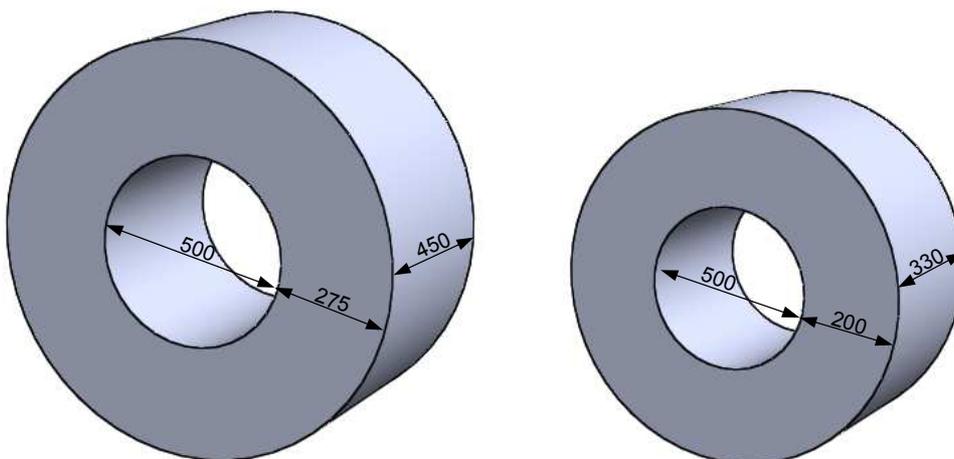


Imagen 22: Dimensiones de las bobinas empleadas (en mm).

Se llevaron a cabo mediante el puente grúa de la planta piloto del Centro de Desarrollo Tecnológico de Arcelor Mittal Avilés cuyas dimensiones son: 10 m de movimiento lateral, 50 m longitudinalmente y 5 m en vertical. Su movimiento vertical está gobernado por un motor de potencia 5 kW y velocidades de descenso: 0,023 m/s y 0,091 m/s.

Experimento 1

Se realizó un impacto vertical del gancho del puente grúa sobre la bobina.

Las variables en este experimento fueron: la posición del sensor que se colocó en el gancho o en la bobina, y la velocidad de descenso del gancho que viene delimitada por el motor del puente grúa. Se decidió que el sensor se colocaría siempre en la misma posición en la bobina: en el interior de esta, perpendicular al impacto. Se consideró que los resultados así obtenidos serían los más claros de la representación del golpe puesto que queda en la misma dirección que un eje del acelerómetro.

Se hicieron un total de cuatro ensayos realizando dos sesiones de impacto en cada una:

Ensayo 1: Impacto con el sensor en la bobina velocidad rápida.

Ensayo 2: Impacto con el sensor en la bobina velocidad lenta.

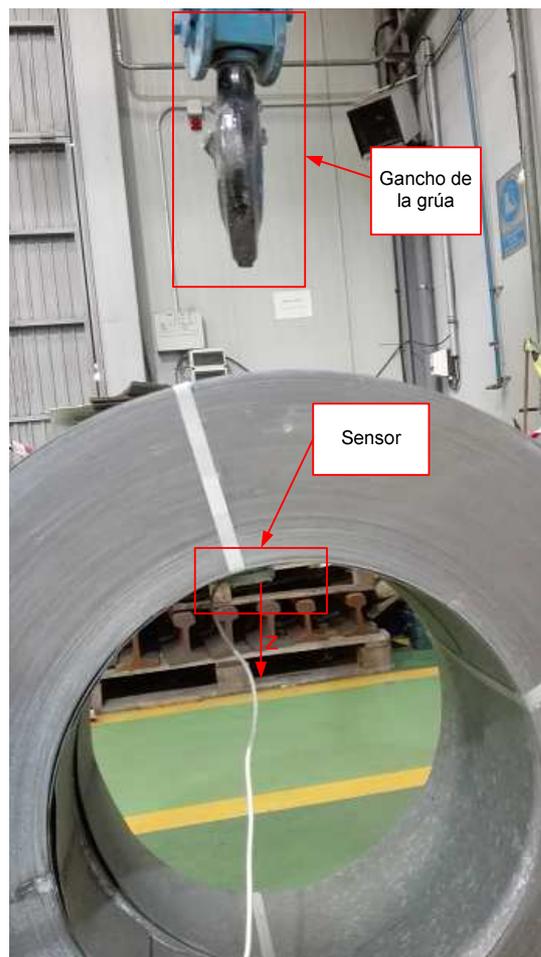


Imagen 23: Experimento 1, ensayos 1 y 2.

Ensayo 3: Impacto con el sensor en el gancho velocidad rápida.

Ensayo 4: Impacto con el sensor en el gancho velocidad lenta.

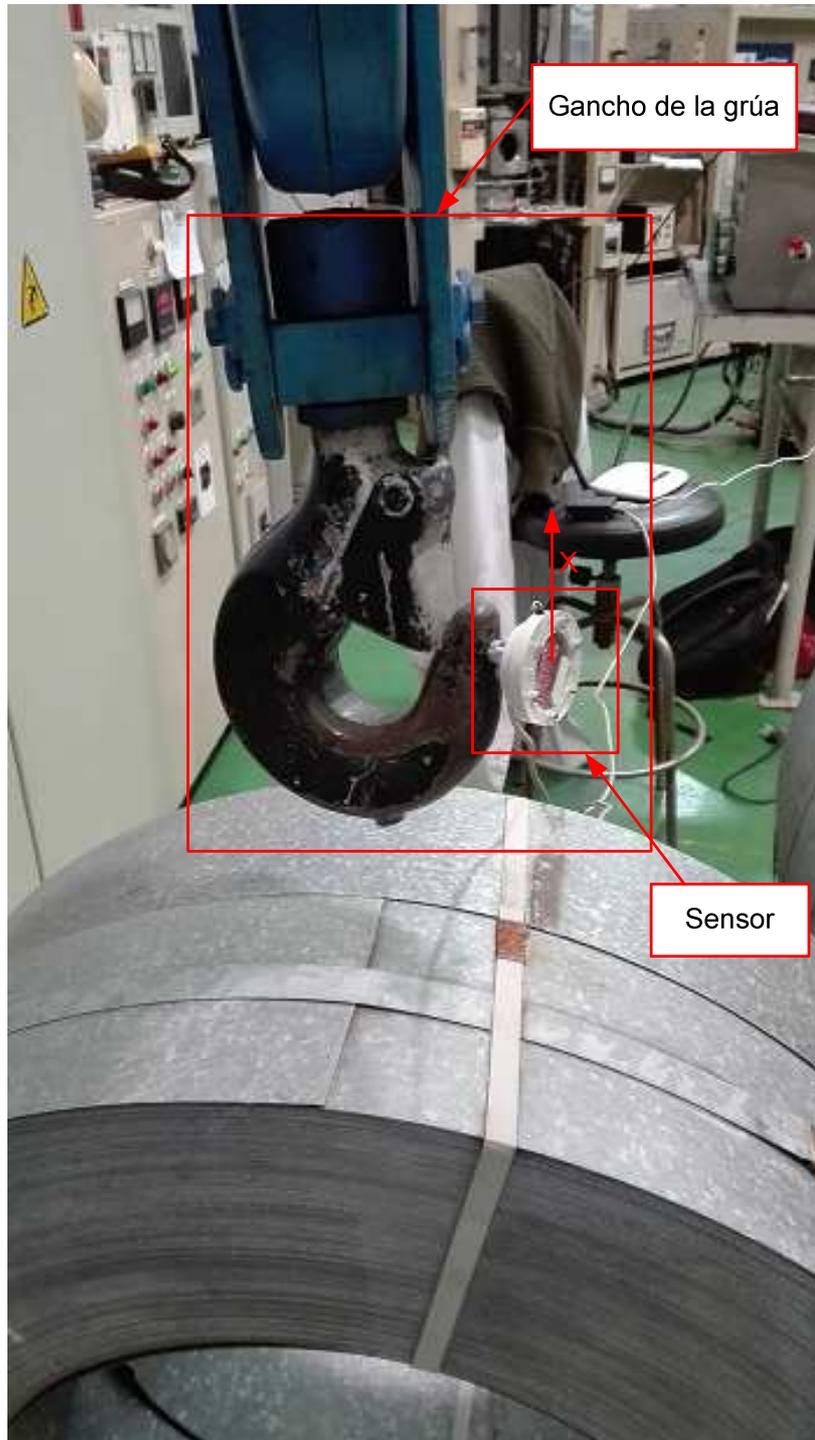


Imagen 24: Experimento 1, ensayos 3 y 4.

Experimento 2

Se realizó un impacto lateral del gancho del puente grúa sobre la bobina. El gancho se aleja una distancia determinada para producir un movimiento pendular. Se registra el golpe contra la bobina.

Las variables son la posición del sensor (colocándolo en la bobina o en el gancho) y la distancia desde la que se deja impactar el gancho sobre la bobina (con desplazamiento pendular).

Se decidió ubicar el sensor perpendicularmente al impacto del gancho para que la aceleración coincida con uno de sus ejes. Se considera que el impacto en dirección radial a la bobina se vería amortiguado por las capas de chapa de la misma por lo que se la golpeó en dirección axial.

Se hicieron un total de cuatro ensayos en dos sesiones de impacto cada una:

Ensayo 1: Impacto con el sensor en la bobina, distancia 5 cm.

Ensayo 2: Impacto con el sensor en la bobina, distancia 10 cm.

Ensayo 3: Impacto con el sensor en la bobina, distancia 20 cm.



Imagen 25: Experimento 2, Ensayos 1,2 y 3.

Ensayo 4: Impacto con el sensor en el gancho, distancia 5 cm.

Ensayo 5: Impacto con el sensor en el gancho, distancia 10 cm.

Ensayo 6: Impacto con el sensor en el gancho, distancia 20 cm.

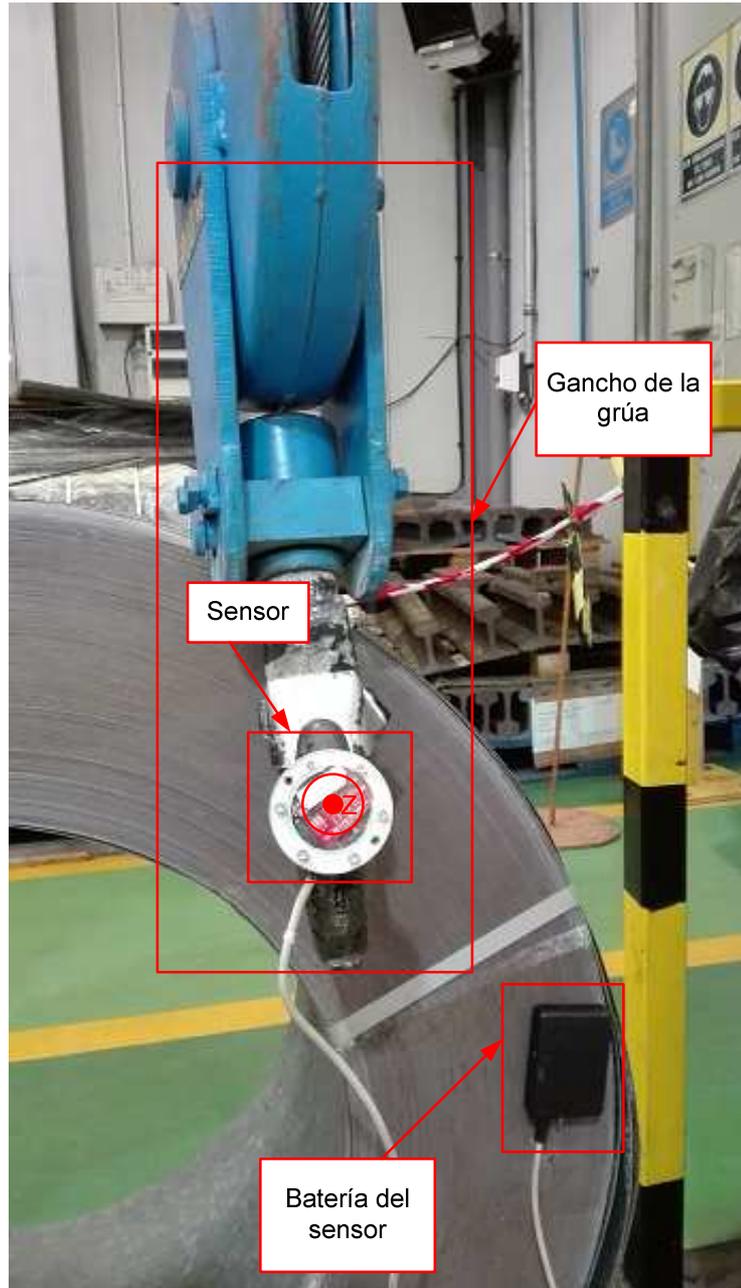


Imagen 26: Experimento 2, ensayos 4, 5 y 6.

Experimento 3

Se suspende la bobina mediante cadenas atadas al gancho del puente grúa para registrar el tirón inicial de la subida.

Aunque se piensa que las cadenas reflejan mejor el comportamiento real del gancho del puente grúa en el parque de bobinas, se decidió probar también con las eslingas elásticas ya que, aunque estas últimas también actúan como un atenuador de los impactos, el gancho del puente grúa en el parque de bobinas tiene elementos atenuadores además de la propia elasticidad del cable.

Las variables a considerar son: si el tirón inicial de la suspensión se realiza con eslingas inicialmente tensas o flojas y si la eslinga es de nylon o es una cadena. No se considera que en este caso la posición del sensor en el gancho o en la bobina sea una variable (se comprobó que apenas se nota una aceleración apreciable al colocarlo en el gancho).

Se hicieron un total de cuatro ensayos realizando dos sesiones de impacto en cada una.

Ensayo 1: Suspensión con las eslingas metálicas inicialmente flojas.

Ensayo 2: Suspensión con las eslingas metálicas inicialmente tensas.

Ensayo 3: Suspensión con las eslingas elásticas inicialmente flojas.

Ensayo 4: Suspensión con las eslingas elásticas inicialmente tensas.

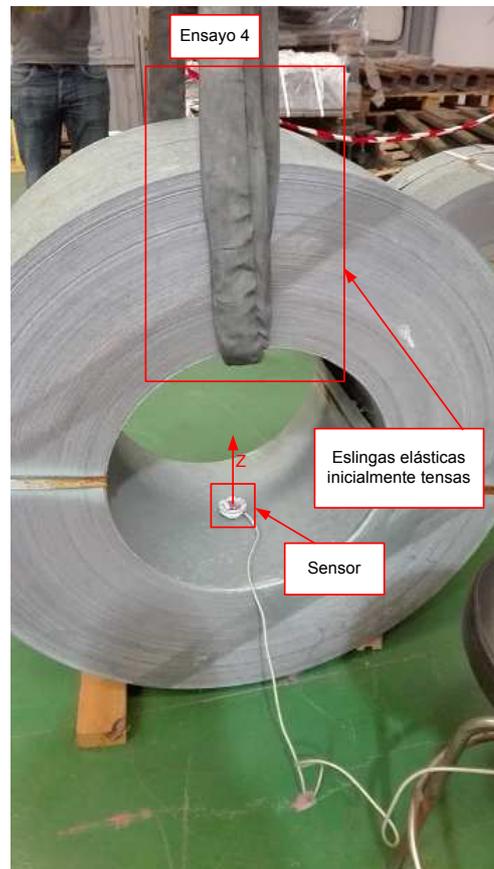
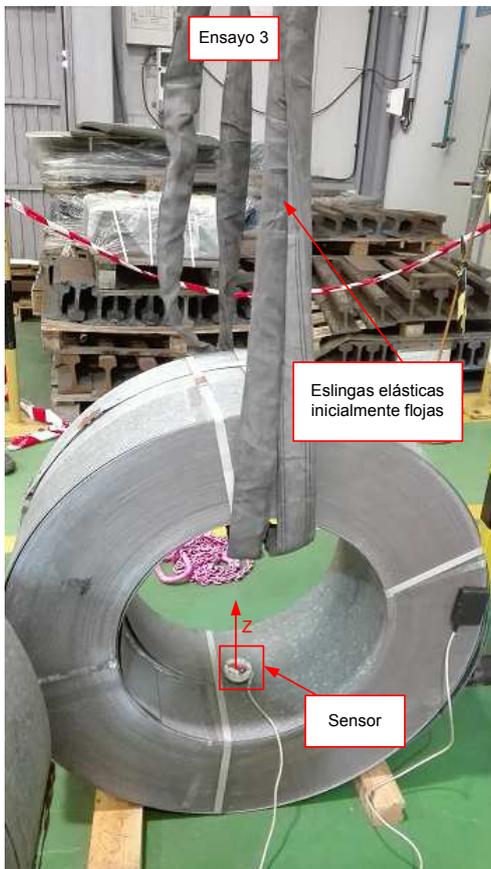
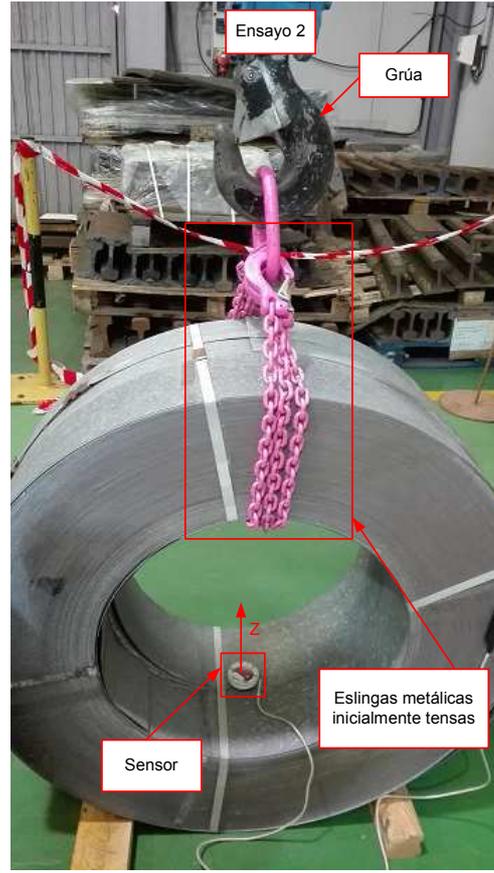
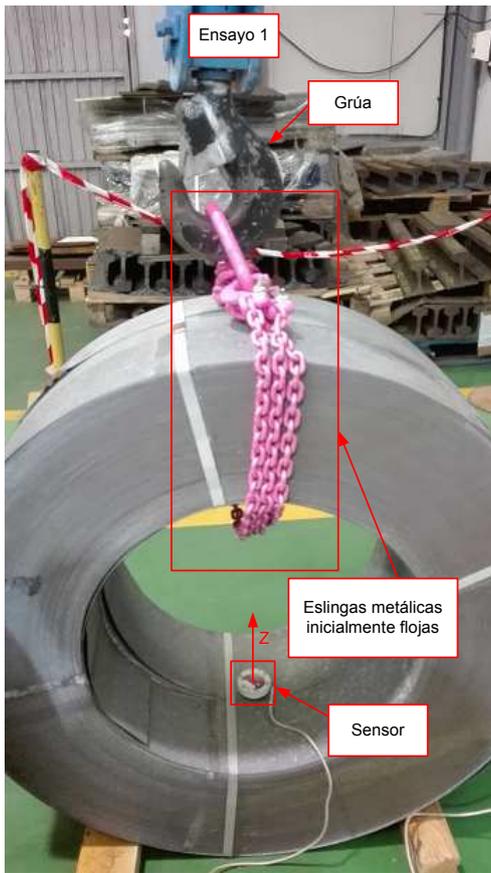


Imagen 27: Experimento 3, ensayo 1, 2 3 y 4.

BLOQUE III

Se pretende distinguir entre golpes más o menos fuertes. Para variar la fuerza en los experimentos se hizo impactar una plomada a distintas alturas contra un disco de acero. La aceleración de bajada es siempre la de la gravedad pero la energía potencial crece con la altura con lo que se espera que en el momento del impacto se manifieste una mayor energía convertida en una mayor deceleración (proporcional a la fuerza) cuanto mayor sea la altura desde la que se suelta.

El elemento penetrador es una plomada de acero de 1.410 gramos de masa. La chapa de acero fue la empleada en los experimentos 1 y 2 del bloque I.

El sensor fue fijado a la parte superior del penetrador. Se empleó cinta de carroceros para evitar cualquier desplazamiento. Se envolvió con espuma aislante especial para aplicaciones de sonido con el fin de evitar posibles daños en el sensor si al rebotar este quedaba entre la chapa y la plomada.

Además se fijó parte del cable que une el módulo del acelerómetro con la batería a la cuerda (cable sintético imitación esparto) que sujeta el penetrador con el fin de evitar que el impacto dañase el cable.

La chapa se situó sobre un lecho de arena previamente nivelado a fin de compensar las irregularidades del suelo y minimizar el posible combamiento sufrido. Además se emplearon cuatro bloques de hormigón armado de 20Kg cada uno situados a 90º entre sí para evitar cualquier desplazamiento de la chapa.

La idea inicial consistía en dejar caer el sensor desde: 200 mm, 400 mm, 600 mm, 800 mm, 1000 mm, 1200 mm, 1400 mm. Sin embargo durante el desarrollo práctico se comprobó que era imposible recoger medidas más allá de los 800 mm ya que el sensor cortaba la comunicación.

Se realizaron, por tanto, tomas de datos a: 200 mm, 400 mm, 600 mm y 800 mm.

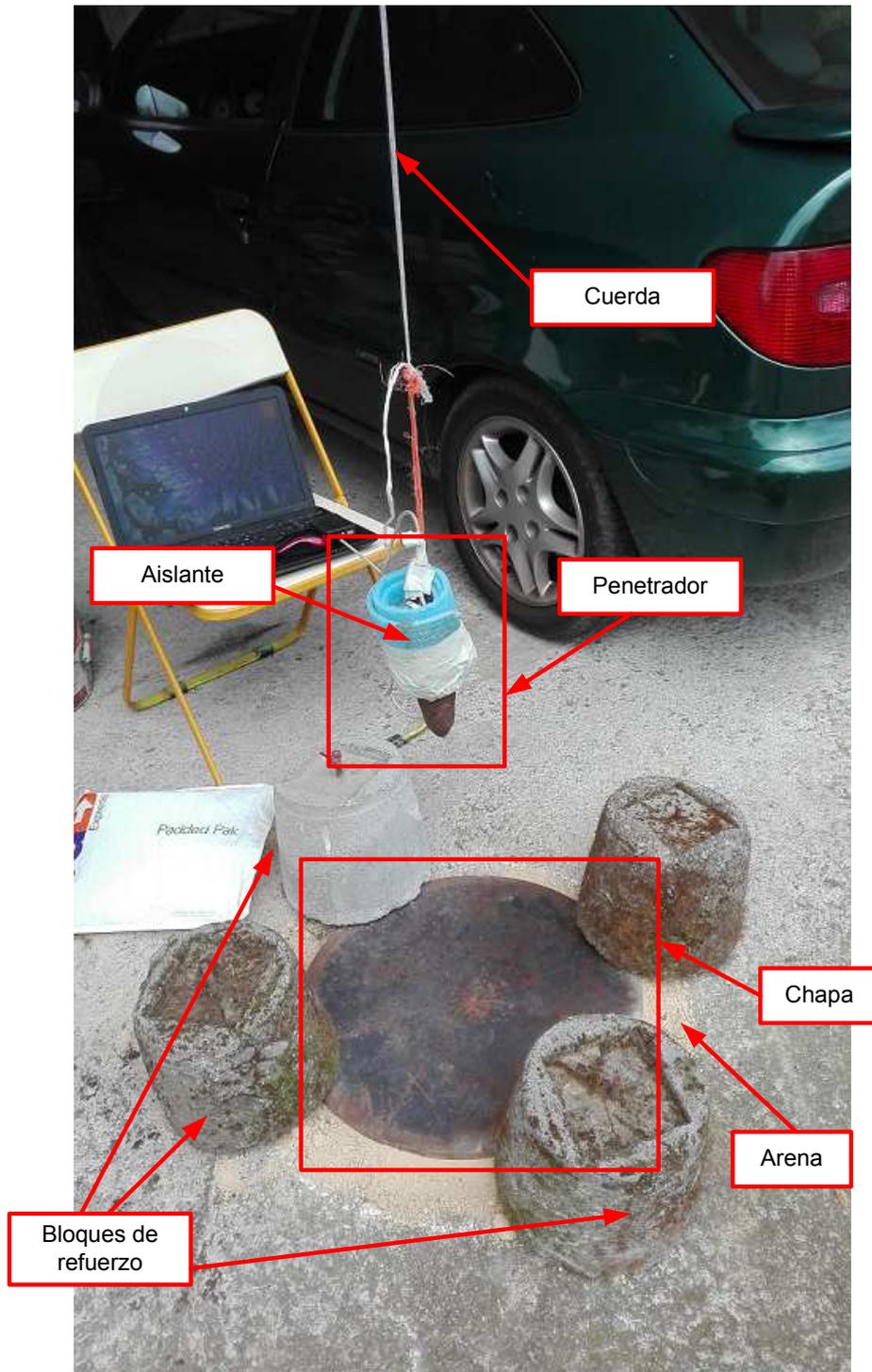


Imagen 28: Descripción del experimento.

4.2-PROCESAMIENTO DE LOS DATOS EN FRECUENCIA

El análisis frecuencial consta de unos pasos básicos que se han aplicado tanto para el problema de los cilindros como para el de las bobinas.

4.2.1- OBTENCIÓN DEL ESPECTRO FRECUENCIAL

Se pasa a continuación a describir cómo se realizó el procesado en frecuencia para el análisis de vibración. El *software* de apoyo utilizado para este procesamiento fue *Matlab*, versión 2014 a.

Existen generalidades que se describirán a continuación, sin embargo y dado que es necesario adecuarse a cada problema para estudiarlo correctamente, más adelante se describirán en los apartados 4.2.2 y 4.2.3 las singularidades referidas al de los cilindros y al estudio de las bobinas.

Pasos en un análisis frecuencial genérico aplicado a la industria

Un parámetro fundamental en el procesamiento digital de la señal (en inglés, DSP) es la frecuencia de muestreo. En nuestro caso viene dada por el equipo de captación de señales empleado (descrito en el apartado 4.1.1) cuya frecuencia de muestreo es de 2.048 Hz.

Según el teorema de Nyquist-Shanon podremos reconstruir correctamente señales de hasta 1.048 Hz sin sufrir problemas de *aliasing*.

Para realizar el procesamiento se aplicó la “Trasformada rápida de Fourier (FFT)” cuya diferencia con la “Trasformada Discreta de Fourier” consiste en una mayor eficiencia al reducir el número de operaciones que lleva a cabo.

El procesado en frecuencia parte de la señal en el tiempo. A esta señal es necesario quitarle la media ya que así se elimina el nivel de continua presente. No se puede trabajar en frecuencia con señales con nivel de continua ya que entonces la frecuencia de 0 Hz (continua) generaría un armónico desproporcionado al ser la que está más presente en la señal y alteraría la lectura frecuencial.

Por otro lado, en todos los gráficos presentes en el documento (que no hayan sido extraídos de fuentes externas) aparecerá en el eje de abscisas la frecuencia (expresada en hercios) y en ordenadas se muestra la “energía” de la señal: una medida de cuanto está presente cada frecuencia en la señal. Se trata de un valor adimensional y para indicarlo se ha puesto “A” en ese eje.

SELECCIÓN DEL TRAMO

Es necesario dividir la señal en el tiempo en tramos para poder hacer un promediado de estos. Así se consigue disminuir el ruido presente en la señal ya que, la señal promediada da más peso a los armónicos y el mismo peso a las frecuencias que no contienen armónicos pero sí ruido blanco con lo que se consigue una señal más limpia.

La selección del tramo es un paso importante que siempre debe adecuarse a la naturaleza del problema, en particular, en el caso de las bobinas hubo un análisis para poder seleccionarlo de forma óptima.

La grúa generó una señal temporal donde se podían aislar los impactos.

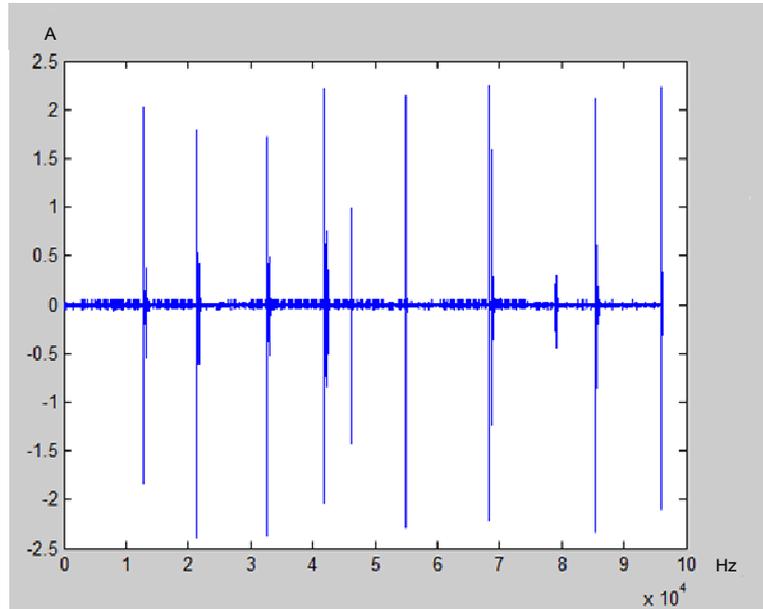


Imagen 29: Espectro temporal de la bobina golpeada lateralmente por la grúa con el sensor situado en la bobina durante un minuto.

El problema surgió al seleccionar el ancho del tramo. Este debería elegirse atendiendo a la parte a estudiar de la señal (el impacto) y ser lo suficientemente ancho para obtener una buena resolución sin exceder la amplitud del fenómeno analizado pues esto introduciría nuevas frecuencias no deseadas.

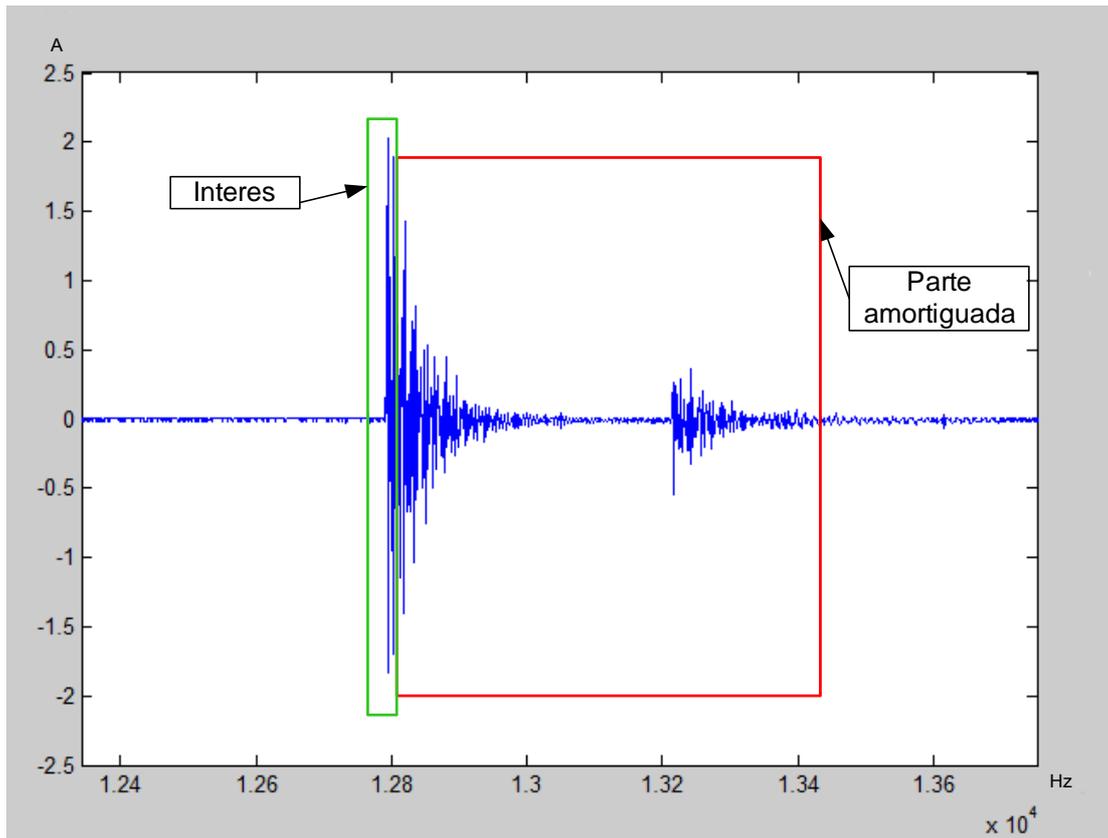


Imagen 30: Zoom en el espectro de la imagen 31 en el que se puede apreciar la zona de interés como la zona que recibe el impacto de la bobina, la parte correspondiente al amortiguamiento del golpe y un fenómeno de rebote del gancho de la grúa contra la bobina.

Por un lado, se supone que solo la primera parte del impacto (la primera senoide) se correspondería con el impacto propiamente dicho siendo las restantes la amortiguación sufrida por el elemento. El elemento puede ser, bien la plomada en los experimentos de bloque I, bien la bobina o el gancho en el bloque II. Es decir, esta parte de amortiguación parecía no interesar de forma inicial.

No obstante, aislar una señal muy estrecha (sólo la parte del impacto) tiene desventajas ya que trabajar con tan pocos datos por tramo deriva en una pérdida de resolución muy importante.

Se decidió realizar una comparativa en la selección del tramo probando con uno muy estrecho, pero que aislase sólo el impacto y con uno más ancho, pero que cogiese la amortiguación. La conclusión obtenida es que, la selección tomando un tramo más ancho incluyendo la amortiguación obtenía más resolución que aquella que se centraba en la parte del impacto y que, además, los armónicos o rangos frecuenciales destacables, eran muy parecidos.

Se optó por la selección de un tramo ancho que cogiese parte de la amortiguación.

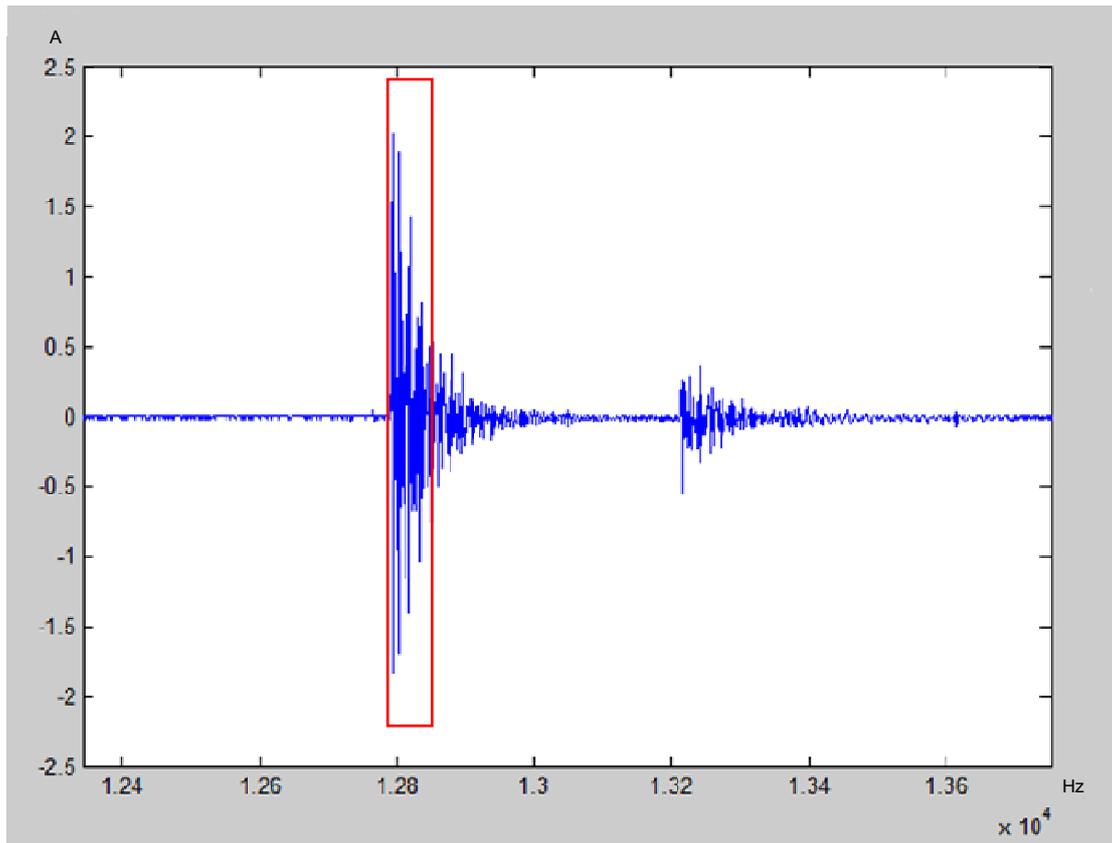


Imagen 31: Zoom en el espectro de la imagen 32 en el que se destaca el tramo elegido para el estudio posterior.

Otros fenómenos derivados del impacto como es el efecto del rebote no interesan en ningún caso al ser puntuales (aparecen sólo en algunos impactos) y no representativos del sistema a estudiar.

APLICACIÓN DE LA VENTANA

En DSP se entiende por ventana una función matemática utilizada para el procesamiento de señales que evita las discontinuidades al principio y al final de los bloques analizados.

Cuando se selecciona un tramo de señal, se está empleando una ventana rectangular para cortarla. Es imposible hacer coincidir el final de la ventana con el paso por cero de la senoide. La aplicación de la FFT interpretará que la parte periódica es la señal cortada que en realidad no ha hecho ciclos completos.

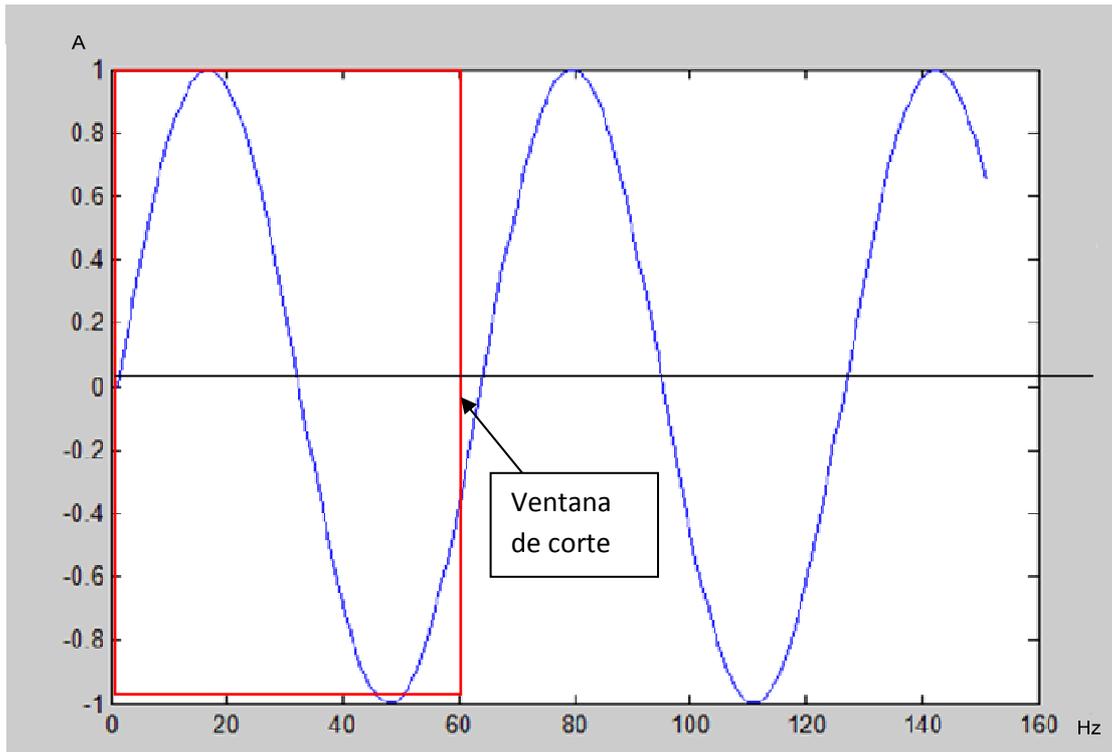


Imagen 32: Senoide generica a la que se aplica una ventana rectangular. Se aprecia que el final de la ventana no coincide por el paso por cero de la senoide.

Lo anterior traducido al plano frecuencial creará lóbulos que generan una mala interpretación frecuencial puesto que es difícil distinguirlos de los verdaderos armónicos.

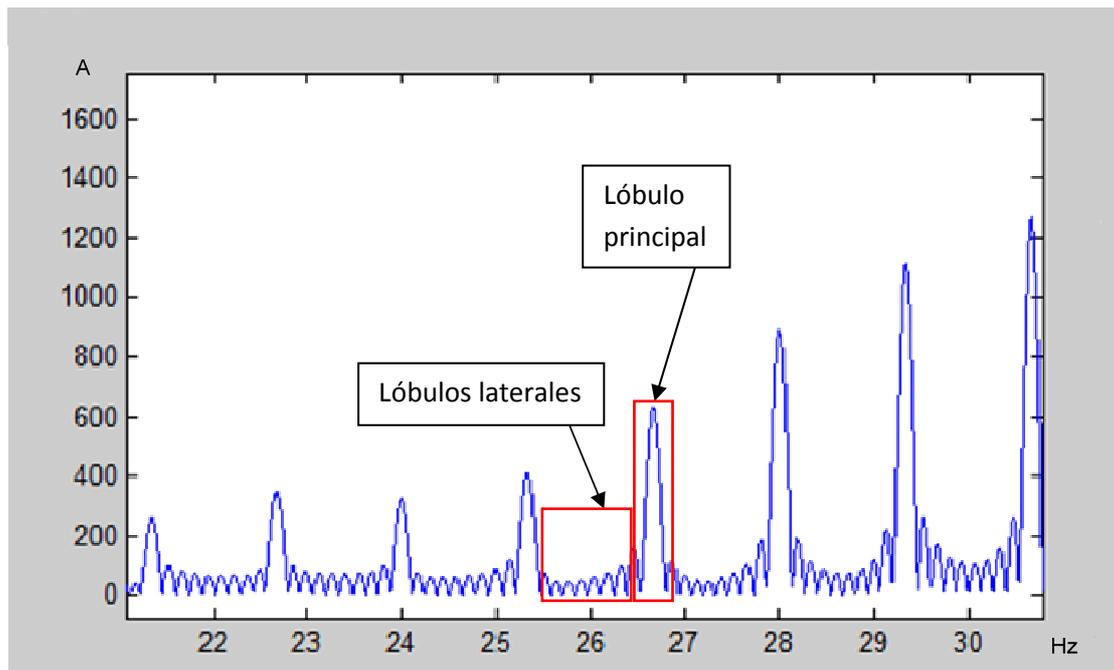


Imagen 33: Espectro genérico en el que se pueden ver los lóbulos principales y laterales producidos como consecuencia de la aplicación de una ventana rectangular.

Para remediar lo expuesto más arriba se emplean ventanas que no tengan un espectro rectangular. Estas evitan o disminuyen los lóbulos laterales formados y generan unos picos correspondientes a los armónicos lo más estrechos posible para que el espectro frecuencial sea fácil de interpretar.

Actualmente existen muchas ventanas y *Matlab* permite implementar multitud de ellas. Muchas perfeccionan el comportamiento en cierto parámetro sacrificando otros y otras sirven para propósitos específicos. Se describirán a continuación las ventanas más comunes que se han aplicado tanto para el problema de los cilindros como para el estudio de las bobinas.

- Rectangular: tiene un lóbulo principal muy estrecho lo que es bueno pero la amplitud de los lóbulos laterales es bastante grande. Es la que se emplea en *Matlab* por defecto.

- Blackman*: tiene un lóbulo principal muy ancho (inconveniente) pero la amplitud de los lóbulos laterales se reduce al mínimo.

- Hamming*: supone un compromiso entre las dos ventanas anteriores lo que la convierte en una ventana de propósito general muy extendida en aplicaciones industriales. Se empleará como ventana de referencia en el presente trabajo.

- Flap top*: es una ventana de *Blackman* usada en aplicaciones muy específicas dónde sea necesario disminuir al máximo los lóbulos laterales aún a riesgo de sacrificar el ancho del lóbulo principal.

-*Hanning*: supone un término medio entre la ventana de *Hamming* y la de *Blackman*. Tiene múltiples aplicaciones industriales y es de uso genérico si bien se suele emplear más *Hamming*.

Una imagen del resultado de aplicar las distintas ventanas a una misma señal se aprecia en la imagen 34.

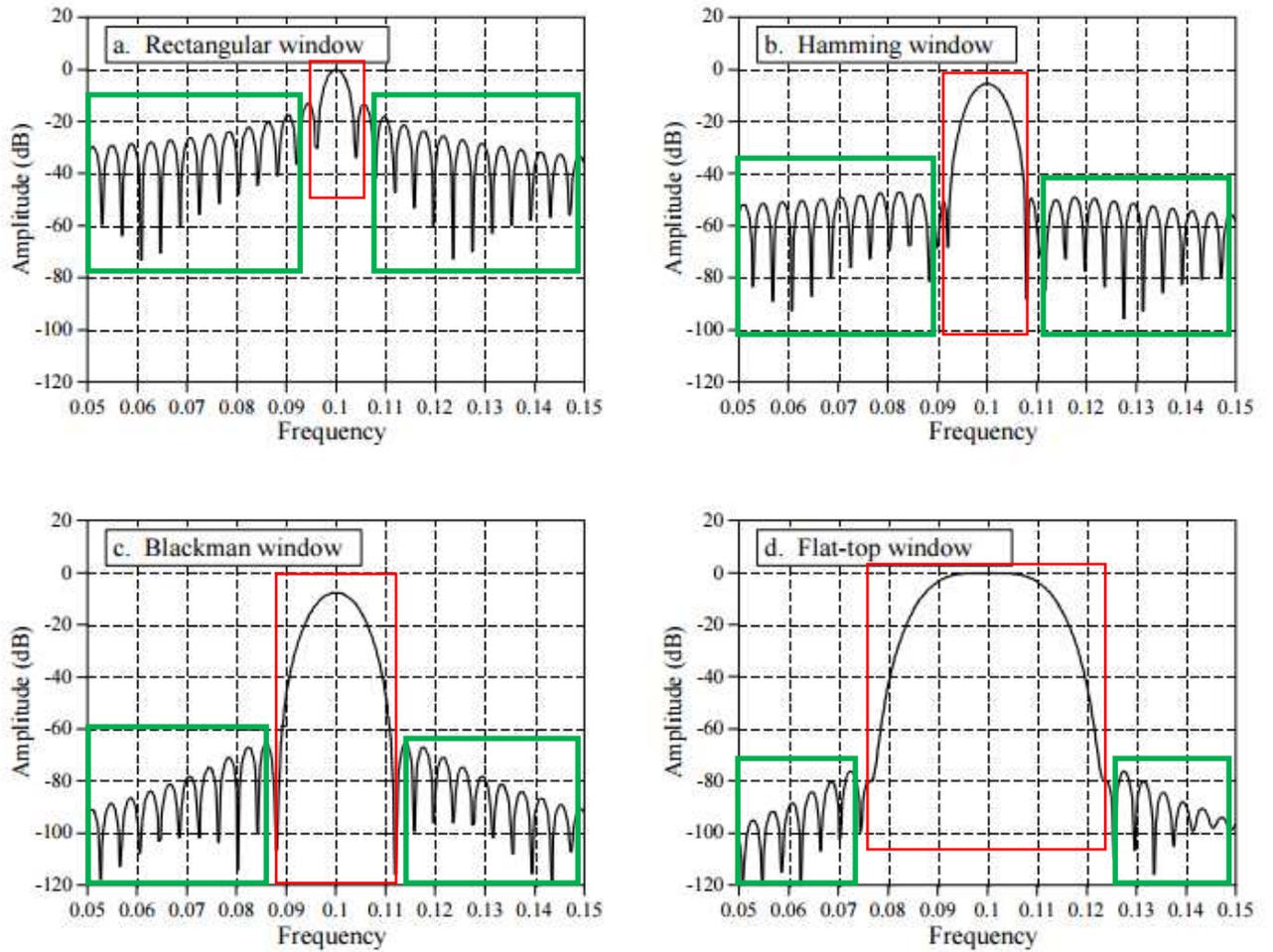


Imagen 34: Comparativa entre las distintas ventanas aplicadas a una señal. Imágenes tomadas del libro “The Scientist and Engineer’s to Digital Signal Processing” (a las imágenes se les han añadido los recuadros rojos y verdes a fin de resultar más ilustrativas) Leyenda: **Rojo: Lóbulos principales; Verde: Lóbulos laterales**

ZERO PADDING

El tamaño de una señal en el tiempo y su descomposición en frecuencia es el mismo. Esto implica que cuanto más larga es una señal mayor resolución tenemos en la representación espectral.

Pese a estar trabajando con anchos de señal escogidos para evitar que no sean demasiado estrechos (ver apartado 4.1) los tramos siguen teniendo un ancho muy pequeño lo que conlleva una elevada pérdida de resolución al realizar el espectro.

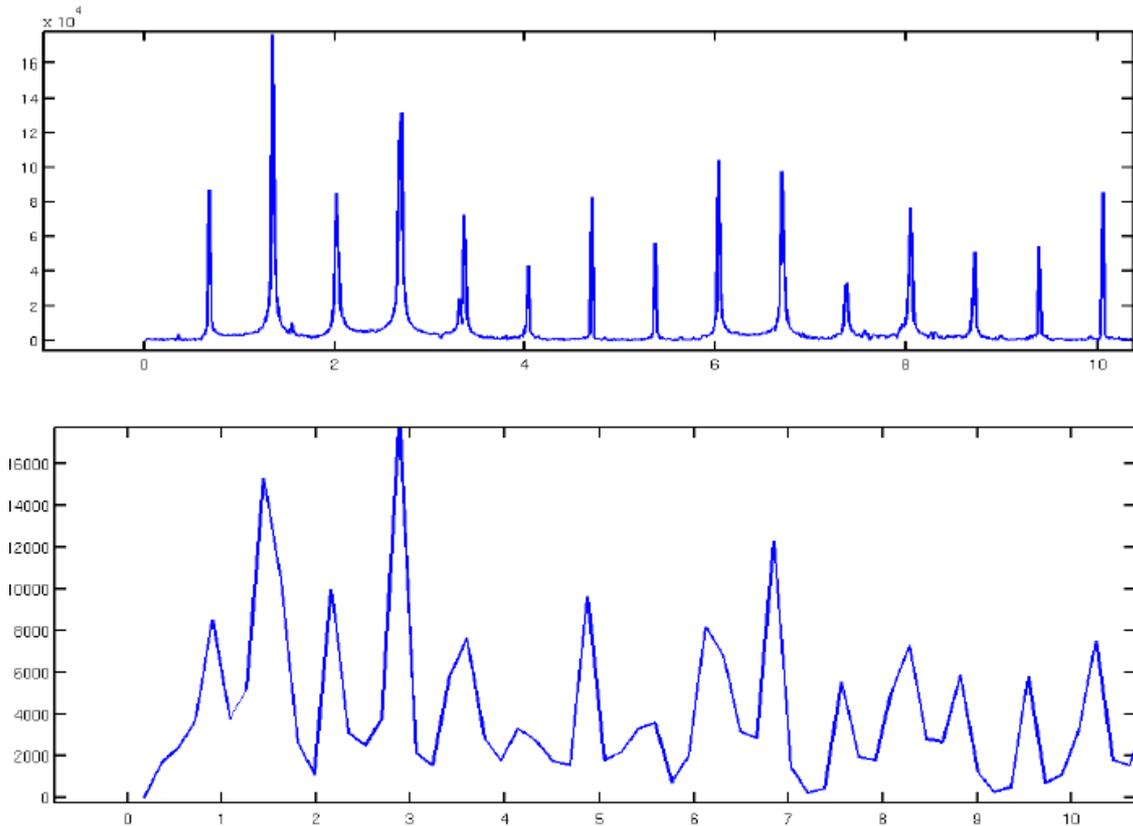


Imagen 35: Comparativa entre un espectro con buena resolución espectral (arriba) y uno con mala resolución espectral (abajo). Imágenes tomadas del libro "The Scientist and Engineer's to Digital Signal Processing".

Una elevada resolución suele ser muy importante en todos los problemas de DSP en la industria ya que si es baja frecuencias separadas pueden aparecer juntas.

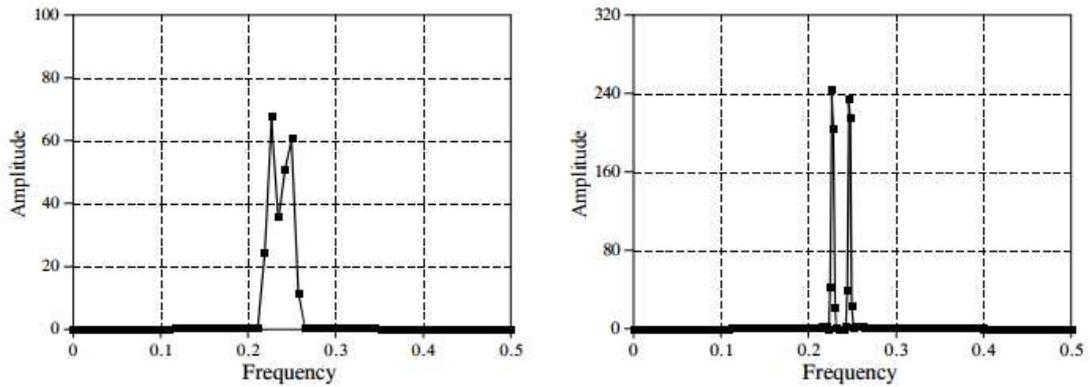


Imagen 36: Una mala resolución (izquierda) espectral no permite diferenciar frecuencias separadas mientras que una buena resolución espectral (derecha) sí. Imágenes tomadas del libro “The Scientist and Engineer’s to Digital Signal Processing”.

Para evitar lo anterior se añaden ceros al final del tramo al cual se le aplicará la transformada. Los ceros no cambian la forma del espectro frecuencial solo proveen de más muestras y por tanto de una mayor resolución. A esta técnica se la denomina *zero padding*.

La aplicación del *zero padding* consigue que cada tramo seleccionado (tanto en el caso de los cilindros como en las bobinas) tenga un ancho equivalente a toda la medición, lo que nos asegura una buena resolución frecuencial.

4.2.2-APLICACIÓN DEL ANÁLISIS FRECUENCIAL A LOS CILINDROS

La aplicación del análisis frecuencia busca:

-Correlacionar los fenómenos observados durante los ensayos prácticos con los espectros conseguidos.

-Identificación de la frecuencia de resonancia: esta se corresponde con la frecuencia del armónico fundamental.

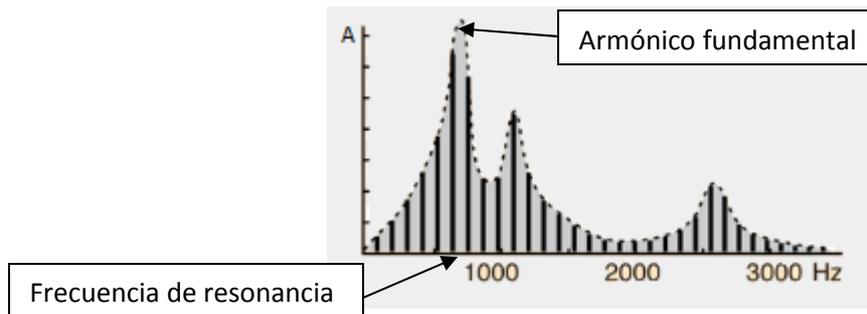


Imagen 37: Espectro frecuencial en el que se señala la frecuencia de resonancia. Imagen extraída del libro "The Scientist and Engineer's to Digital Signal Processing".

Para ayudar a su identificación se aplicarán diferentes ventanas y filtros a los espectros obtenidos.

4.2.3-APLICACIÓN DEL ANALISIS FRECUENCIAL A LAS BOBINAS

En el caso de las bobinas tiene como objetivo:

-La separación en bandas frecuenciales de los distintos tipos de impacto tanto en los experimentos del bloque I como en los experimentos del bloque II. Se pretende así aislar unas bandas frecuenciales lo más estrechas posibles correspondientes a los golpes recibidos por las bobinas.

4.3- RUIDOS PRESENTES EN LOS ESPECTROS

En todos los análisis frecuenciales que realicemos es importante tener en cuenta la presencia de ruidos. Según el tipo de interferencia se podrá disminuir, eliminar o simplemente aceptar su existencia y evitar que nos confunda a la hora de analizar los distintos espectros.

Se estudiará en este punto los ruidos más comunes en un análisis frecuencial, sus causas y cómo evitarlos. Estos ruidos surgen en casi todos los espectros frecuenciales y, por tanto, estarán presentes en el análisis de los cilindros y en el de la grúa.

-Ruido blanco: está presente en todas las frecuencias. Se disminuye mediante el promediado de espectros frecuenciales. Esto se realizó en el apartado 4.2.1.

-Ruido $1/f$, ruido de parpadeo o ruido rosa: se trata de un ruido que se incrementa con las bajas frecuencias. Se puede apreciar en muchos sistemas. Su origen está en la fluctuación a baja frecuencia de los valores de resistencia que se traducen en tensión de ruido cuando por ellos circula una corriente continua. El espectro se caracteriza por una disminución de la densidad de ruido a medida que sube la frecuencia hasta llegar a ser despreciable respecto al ruido blanco. No se puede eliminar.

-Ruido electromagnético: provocado por la interferencia de ondas electromagnéticas. En el espectro aparece como picos a una frecuencia específica. Normalmente las interferencias provienen de la red eléctrica por lo que suelen manifestarse picos a 50Hz y sus múltiplos. Su efecto se puede eliminar no teniendo en cuenta lo que ocurra a las frecuencias múltiplo de una interferencia de red o bien mediante un filtro de rechazo de banda lo que se analizará en el apartado 4.3.1.

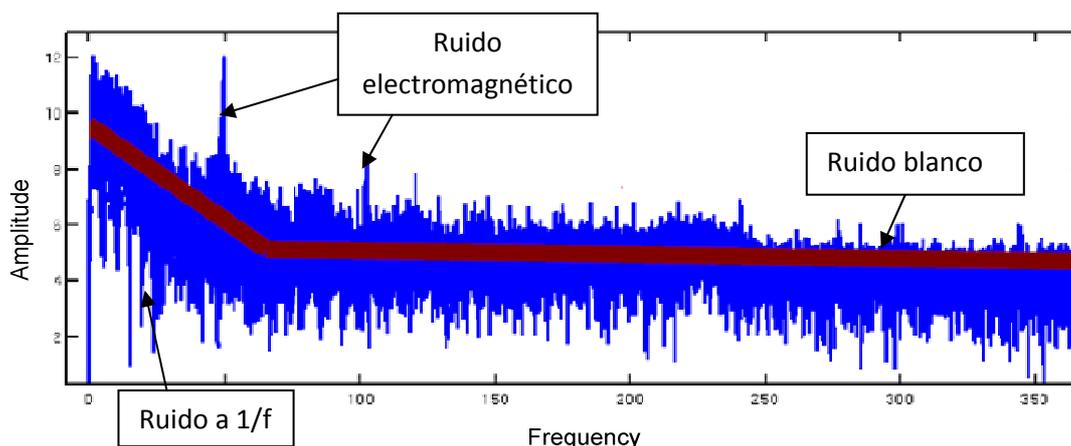


Imagen 38: Espectro frecuencial en el que se muestran los tres tipos de ruido. Imagen extraída del libro "The Scientist and Engineer's to Digital Signal Processing".

A los ruidos anteriormente citados se debe añadir aquellas perturbaciones no deseadas que aparecen como resultado de tomar las medidas en un ambiente muy ruidoso como es el caso de la planta de laminación en frío y que se pueden manifestar como determinados picos en ciertas bandas frecuenciales (ver apartado 5.1.1).

Todos los espectros analizados tienen ruido. El ruido blanco no supone un problema en tanto que, con un número suficiente de muestras, se puede realizar un promediado que conlleva su disminución. En el caso del ruido $1/f$, electromagnético y aquellas perturbaciones propias del sistema particular de estudio, el tratamiento que se les da depende del problema.

4.3.1-RUIDOS EN EL CASO DE LOS CILINDROS

En este caso se decidió aplicar filtros de rechazo de banda.

FILTRADO DIGITAL

Se ha realizado el filtrado digital de las señales con las que se trabaja con el fin de eliminar ruidos electromagnéticos que se sospecha que son múltiplos de la frecuencia de red así como aquellos generados por el propio ambiente de trabajo y que se manifiestan como interferencias a determinadas frecuencias. Se tiene una importante interferencia a 700 Hz cuya causa no está clara pero se ha pensado, dado la estrechez de la banda en algún tipo de interferencia electromagnética. También aparece un pequeño pico a 300 Hz fruto de una interferencia generada por el movimiento de un puente grúa en la planta de laminación.

Se implementarán filtros de rechazo de banda. De esta forma se delimitarán unas bandas alrededor de los 300 Hz y 700 Hz (se diseñarán dos filtros de rechazo de banda 290-320 Hz y 690-720 Hz). Un filtro de rechazo de banda está formado por la suma de un filtro paso bajo y un filtro paso alto. A su vez, este último se modela como un filtro identidad menos un filtro paso bajo con la misma frecuencia de corte (f_c ó f_c).

Se ha empleado un filtro *windowed-sinc* debido a que estamos trabajando con la frecuencia y estos filtros presentan una respuesta frecuencial óptima. El kernel (h_i) viene determinado por:

$$\{h_i\} = (\sin(2\pi f_c i))/\pi i \quad \text{Fórmula 1}$$

Donde f_c es la frecuencia de corte e i es el orden.

Se ha trabajado con un filtro de orden de 1.024. A mayor orden, el bode del filtro caerá con una pendiente más vertical y el coste computacional será mayor. Se ha fijado un orden de 1.024 ya que así se puede apurar bastante la banda que se pretende corregir y el tiempo computacional no es muy elevado.

También es importante tener en cuenta que a la hora de aplicar el filtro este debe ser simétrico ya que si no, introducirá distorsiones sólo a un lado de la señal filtrada y provocará retrasos incontrolados. Para evitar que el filtro no introduzca lóbulos en la respuesta frecuencial se aplicó una ventana de *Hamming*.

4.3.2-RUIDOS EN EL CASO DE LAS BOBINAS

Para el problema de las bobinas se consideró que no era necesario eliminar ruidos electromagnéticos mediante filtrado ya que estos no interfieren en las medidas obtenidas. El ruido a $1/f$ se tuvo en cuenta en el procesamiento y no se considera que obstaculizase la obtención de resultados. Se minimizó el efecto del ruido blanco al promediar varias señales

4.4-BASE TEÓRICA: FRECUENCIA DE RESONANCIA DE LOS CILINDROS

Como se explicó en el apartado 3.4 los análisis americanos habían determinado la frecuencia de resonancia como la velocidad de propagación del sonido en el acero dividido por la longitud del cilindro. Dado que no se pudo comprobar la base teórica de estos cálculos y que la frecuencia obtenida de forma práctica en la acería de Avilés difería de la aplicación de la fórmula se pasó a tratar de darle un marco teórico consistente a la frecuencia de resonancia.

Se pretende, por tanto, calcular de forma teórica la frecuencia de resonancia del conjunto cilindro ampuesa y la frecuencia de resonancia del cilindro desnudo. Esta última simulación permite comprobar si la ampuesa tiene alguna influencia ya que todos los datos sólo pueden ser tomados en el cilindro montado en las ampuestas. Si no tiene influencia (lo esperable ya que la ampuesa apenas debería excitarse con el cilindro) se puede entender que la frecuencia de resonancia es la del cilindro y es independiente de la forma de sujeción que tiene en los extremos.

Tras la consulta de libros especializados en Física y en Mecánica ya que se pretendía establecer un símil entre un sistema mecánico y el conjunto cilindro-ampuesa. Esto no generó ningún resultado satisfactorio.

A la dificultad de las fórmulas encontradas, se sumó el hecho de que no sean materias propias de la formación en Electrónica Industrial y Automática lo que aún aumenta la complejidad. A través de textos de análisis de velocidades críticas en ejes se trató de implementar, después del desarrollo de los modelos arrojados por los libros, programas que permitiesen la obtención de frecuencias de resonancia. No se obtuvo ningún resultado por lo que se pasó a tratar de enfocar el problema de otra forma.

Se pensó en tratar de utilizar un *software* de desarrollo y simulación mecánico que permitiese calcular las frecuencias de resonancia de los sistemas ya que este parámetro es empleado de forma frecuente en los diseños de los ingenieros. Se barajaron los programas:

-*Inventor*

-*SolidWorks*

-*CypeCAD*

Por razones de disponibilidad se utilizó el *SolidWorks Premium 2016 x64 Edition*.

4.4.1- APROXIMACIONES DIMENSIONALES DEL CILINDRO

Se ha simplificado la geometría del cilindro, representándolo mediante 3 cilindros unidos. El del centro simula el grueso central y los extremos son una simplificación de la forma cónica original en la que además se ha eliminado la forma de esclavo. El cilindro empleado en la simulación se aprecia en la imagen 41.

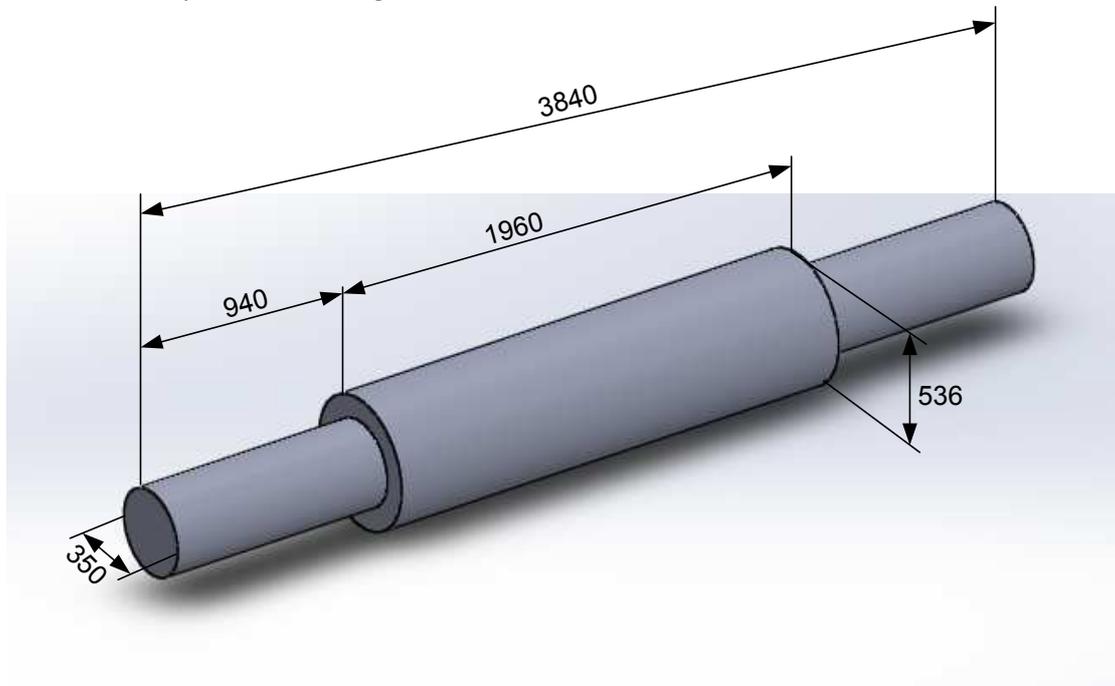


Imagen 39: Aproximación geométrica del cilindro en mm.

Simulación

Aquí se describen y se justifican los parámetros configurados a la hora de realizar la simulación.

Dentro de propiedades de simulación se puede configurar el número de frecuencias que deseamos obtener. Se deja el valor de 5 frecuencias que está por defecto teniendo en cuenta que la frecuencia fundamental es la primera. El programa dispone de varios modos de simulación que han de ajustarse en función de los parámetros fijados. En este caso se selecciona la casilla "Selección de Solver automática".

El material del cilindro es "Acero al carbono fundido". El programa permite simular con sujeciones que pueden ser fijas, de rodillo o de bisagra. Se entiende que en los ensayos el rodillo se haya fijo por los extremos.

Se desecha la posibilidad de hacer simulaciones con cargas. Rellenar este campo no es obligatorio. Ya que se entiende que el cilindro no está sufriendo ninguna fuerza en particular en el momento de los experimentos no se fija ninguna carga. (Nota: el peso es tenido en cuenta por defecto en el programa por lo que no es necesario fijar la fuerza de la gravedad.)

Malla: se ha empleado el algoritmo que viene por defecto.

4.4.2- APROXIMACIONES DIMENSIONALES DE LA AMPUESA

Se ha empleado el plano **M192215011_179329__2**, que se adjunta con el presente trabajo. La ampuesa se ha simplificado respetando las dimensiones más representativas del conjunto y el agujero central, el cual tuvo que ser ampliado respecto del existente en el plano debido al diámetro del cilindro.

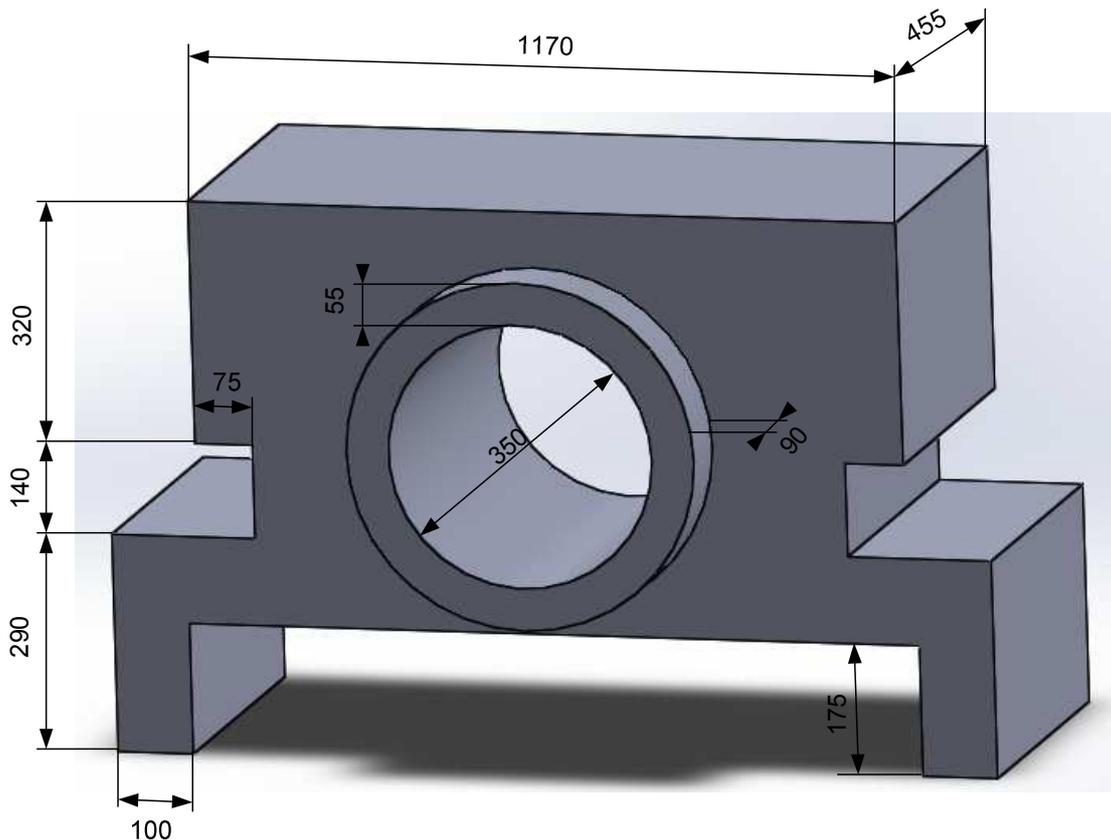


Imagen 40: Aproximación geométrica de la ampuesa en mm.

Simulación

Se considera que tanto el cilindro como la ampuesa son de “Acero al carbono fundido”.

Se entiende que en los ensayos el rodillo se halla fijo por los extremos. No se fija la base de las ampuestas ya que estas no están atornilladas al suelo solo están colocadas encima de la superficie, pero con posibilidad de vibrar ligeramente. No se le añade ninguna fuerza y se emplea el mallado por defecto.

4.5-FUERZA DEL IMPACTO Y RELACIÓN CON EL ANÁLISIS TEMPORAL

El análisis temporal se basó en aislar la parte de la señal correspondiente al impacto sin analizar la parte de amortiguación ya que esta es propia del elemento penetrador y del elemento impactado.

En este caso no se puede aplicar análisis frecuencial ya que la amplitud de los armónicos no depende en ningún caso de la aceleración sino de la correlación de la señal registrada con una senoidal de la frecuencia del armónico: a mayor correlación más amplitud tendrá el armónico.

Se logra así aislar la aceleración propia del choque evitando la del descenso (que será igual a la gravedad).

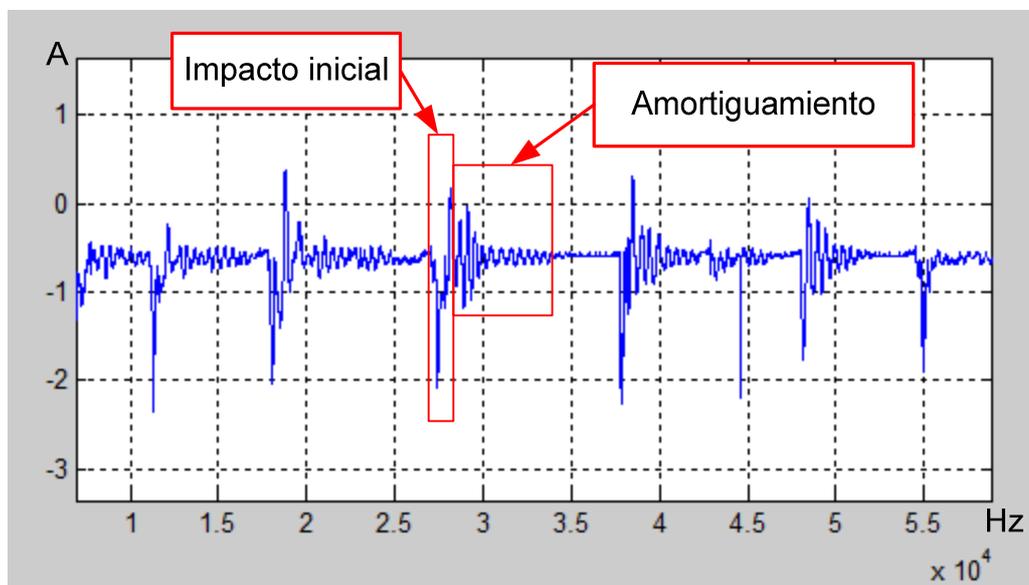


Imagen 41: Se muestra la señal obtenida con una altura de 60cm.

Una vez seleccionada esa parte para cada impacto de la señal se realiza la media con los valores absolutos. Emplear los valores absolutos permite evitar el signo de la aceleración que en este caso es negativo.

5-RESULTADOS

5.1-CILINDROS

5.1.1-CORRELACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS CON LAS CONDICIONES EXTERNAS

En este apartado se busca mostrar aquellas condiciones que generaban señales cuya interpretación pueden dar lugar a equívocos.

Se entiende por interferencias aquellas señales que no son fruto de la excitación provocada del cilindro, pero que sí le afectan y aparecen en la toma de datos.

Se tipifican como interferencias las originadas por las grúas que se desplazan por la planta de laminación en frío: un puente grúa que se mueve longitudinalmente por toda la superficie y otra grúa empleada en la zona de los cilindros que cubre un área más limitada.

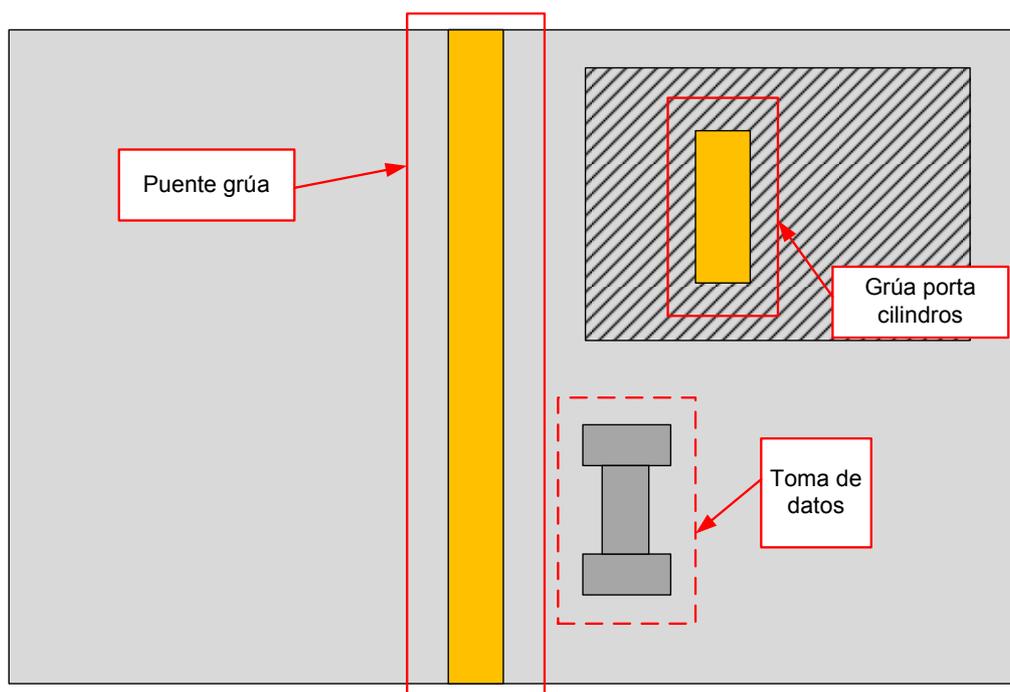


Imagen 42: Esquema de la planta de laminación en frío. No está a escala.

Estas interferencias se pueden apreciar en la toma de datos. No tener en cuenta las bandas frecuenciales que aparecen o desechar las tomas especialmente afectadas puede alterar todo el procesamiento posterior.

En el eje x se recogen las interferencias generadas por el puente grúa.

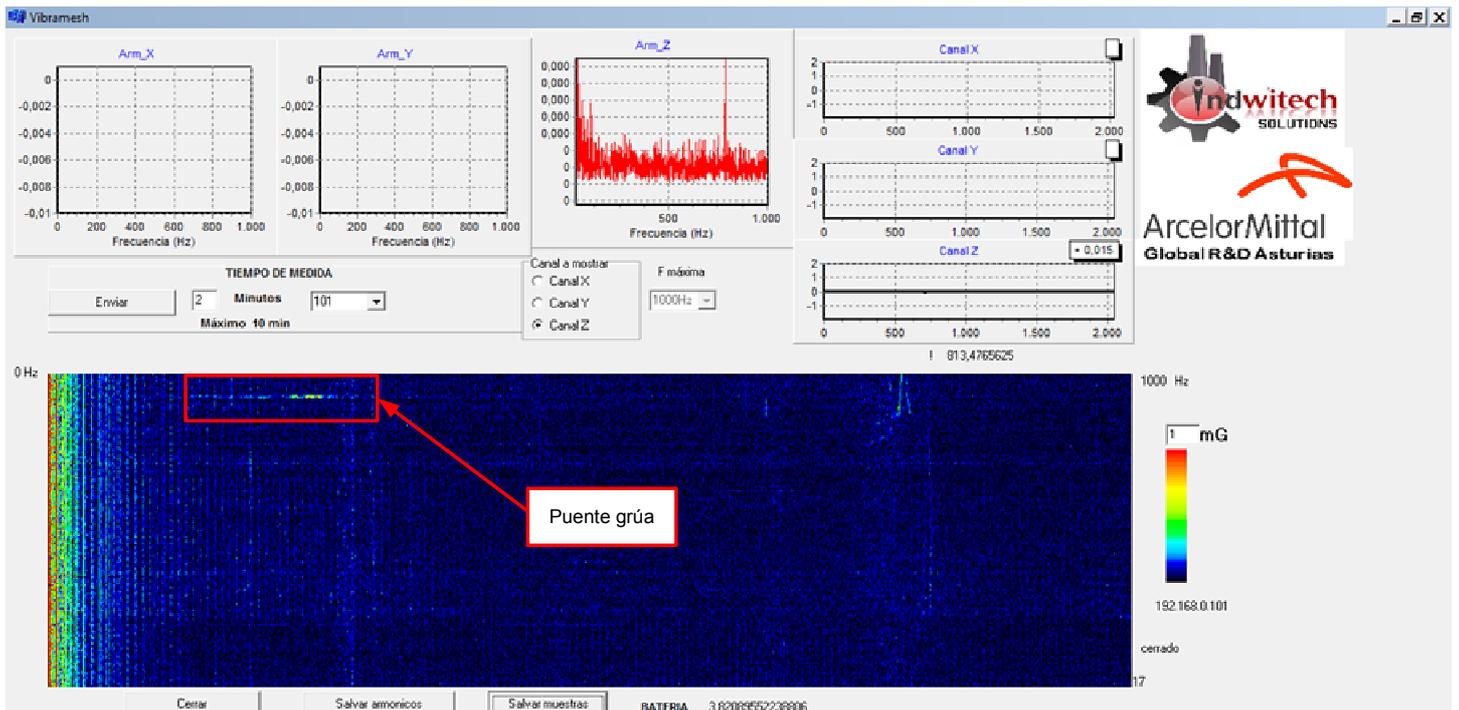


Imagen 43: Interferencias en el eje x generadas por el puente grúa.

Se aprecian unas bandas débiles en torno a 180 Hz, 279, 307 y 380 Hz sin haber excitado el cilindro: se deben a que el puente grúa se desplazó en ese momento.

En el eje y se observan las que tiene lugar como consecuencia del movimiento de la grúa transportadora de cilindros.

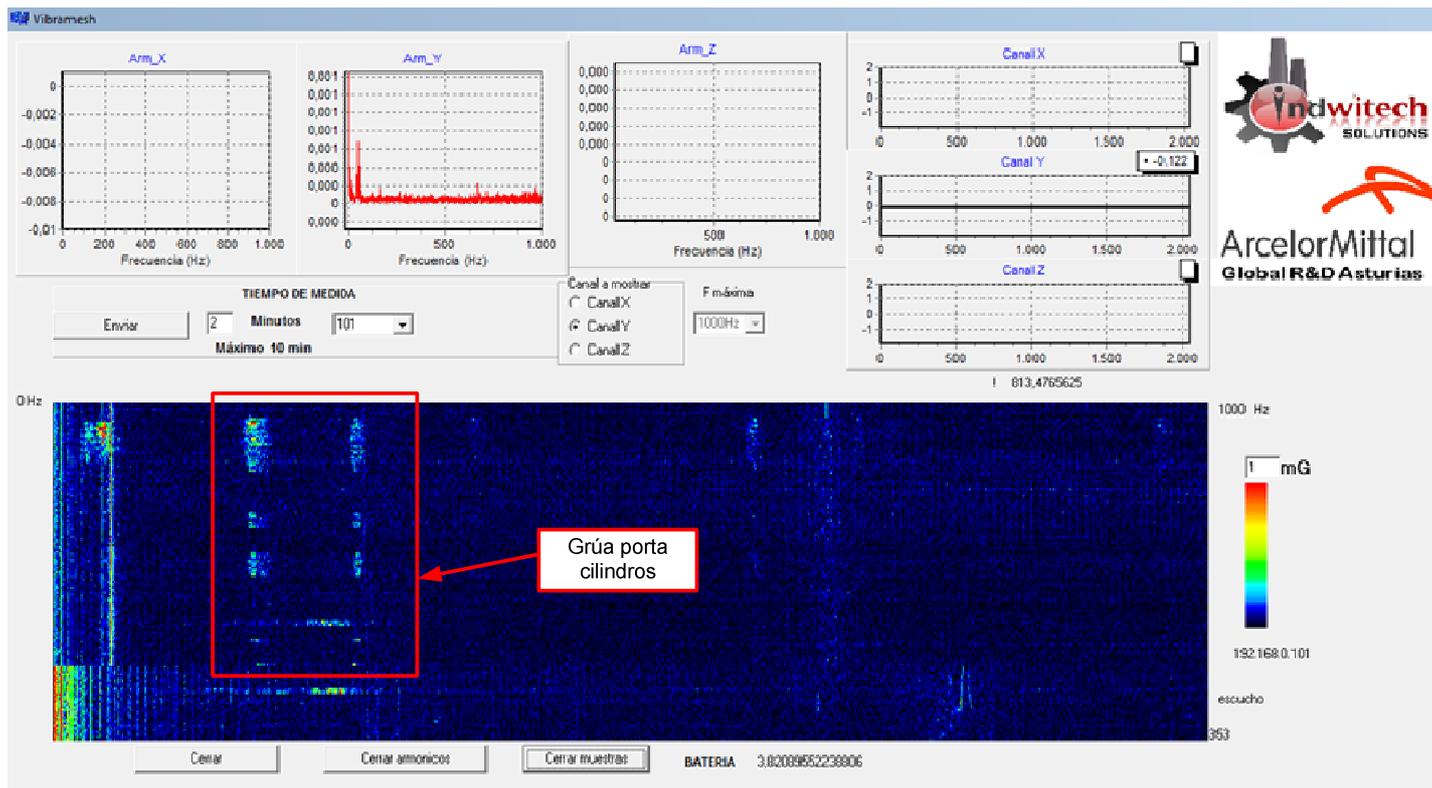


Imagen 44: Interferencias en el eje y generadas por la grúa porta-cilindros.

Las perturbaciones generadas se mueven en bandas en torno a los 230 y 290 Hz.

En el eje z no se distinguen perturbaciones significativas por lo que no se ha incluido la imagen.

5.1.2-CÁLCULO DE LA FRECUENCIA DE RESONANCIA DE UN CILINDRO

Tras procesar los datos obtenidos al golpear un cilindro con un destornillador, se obtuvieron las siguientes gráficas:

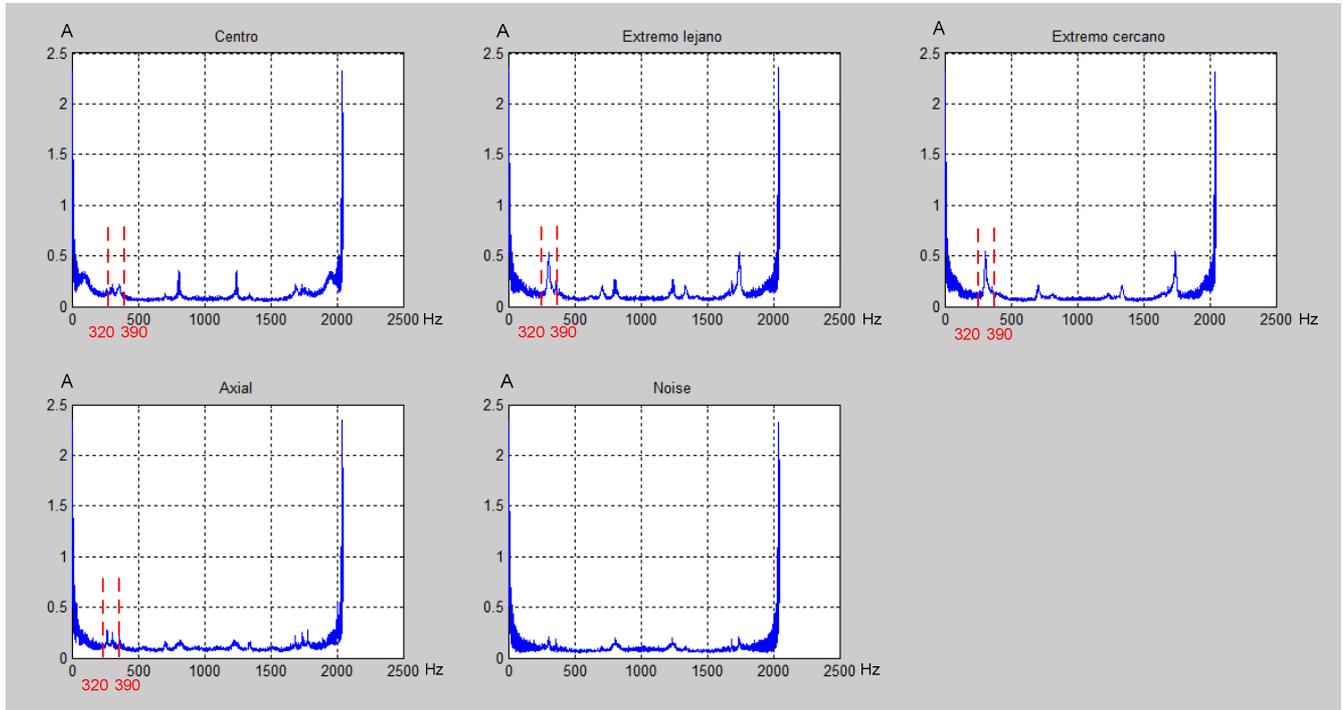


Imagen 45: Gráficas obtenidas del procesamiento de las señales de los cilindros donde se marca la frecuencia de resonancia.

Donde:

- Centro: golpes en el centro del cilindro.
- Extremo lejano: se corresponde a impactos aplicados en el extremo opuesto al extremo en el que se encuentra el sensor en el cilindro.
- Extremo cercano: impactos aplicados en el mismo extremo en el que se encuentra el sensor en el cilindro.
- Axial: golpes en dirección axial al cilindro en el extremo opuesto a donde se colocó el sensor.
- Noise: ruido ambiente registrado sin impactar al cilindro.

Tras la comparativa de las imágenes podemos observar que la frecuencia de resonancia del cilindro se encuentra en torno a los 320-390Hz.

5.1.3-ANÁLISIS DE RUIDOS Y FILTROS APLICADOS

A través de la gráfica anterior podemos observar la presencia de ruidos:

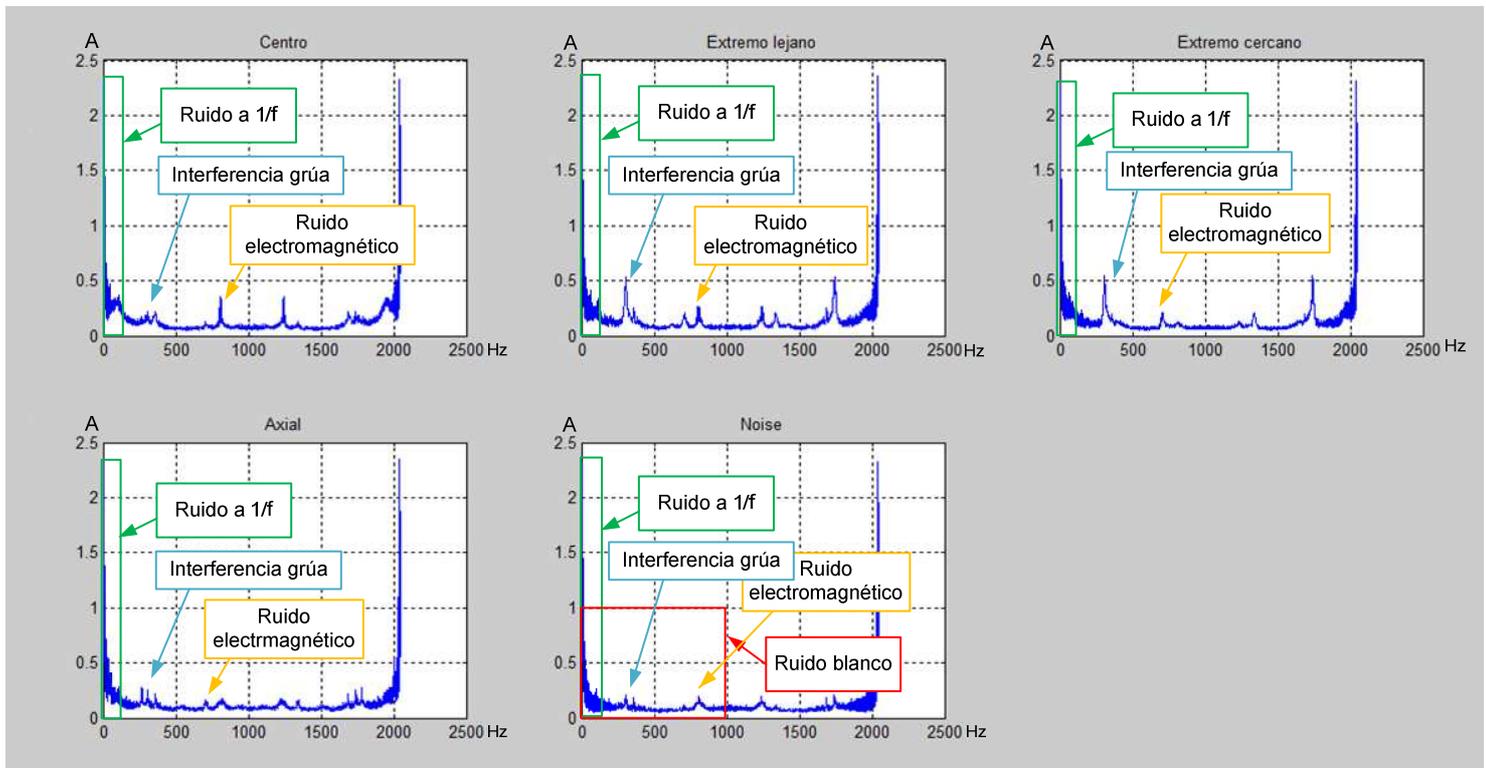


Imagen 46: Gráficas obtenidas del procesamiento de las señales de los cilindros donde se marcan los ruidos existentes.

Se observa la presencia de picos de ruido identificado a 700 Hz y, en menor medida, en algunos casos a unos 300Hz. Esta última perturbación es posible que se deba según lo analizado en el apartado 5.1.1 al desplazamiento de la grúa porta-cilindros.

La gráfica de “Noise” muestra los ruidos a los que se ve sometido el sistema destacando la presencia de ruido a 1/f. Se manifiesta también de forma débil el ruido electromagnético.

Se han implementado filtros de rechazo de banda para eliminarlos. Así se ha hecho un filtro de tipo *windowed sinc* para eliminar perturbaciones a 300 Hz.

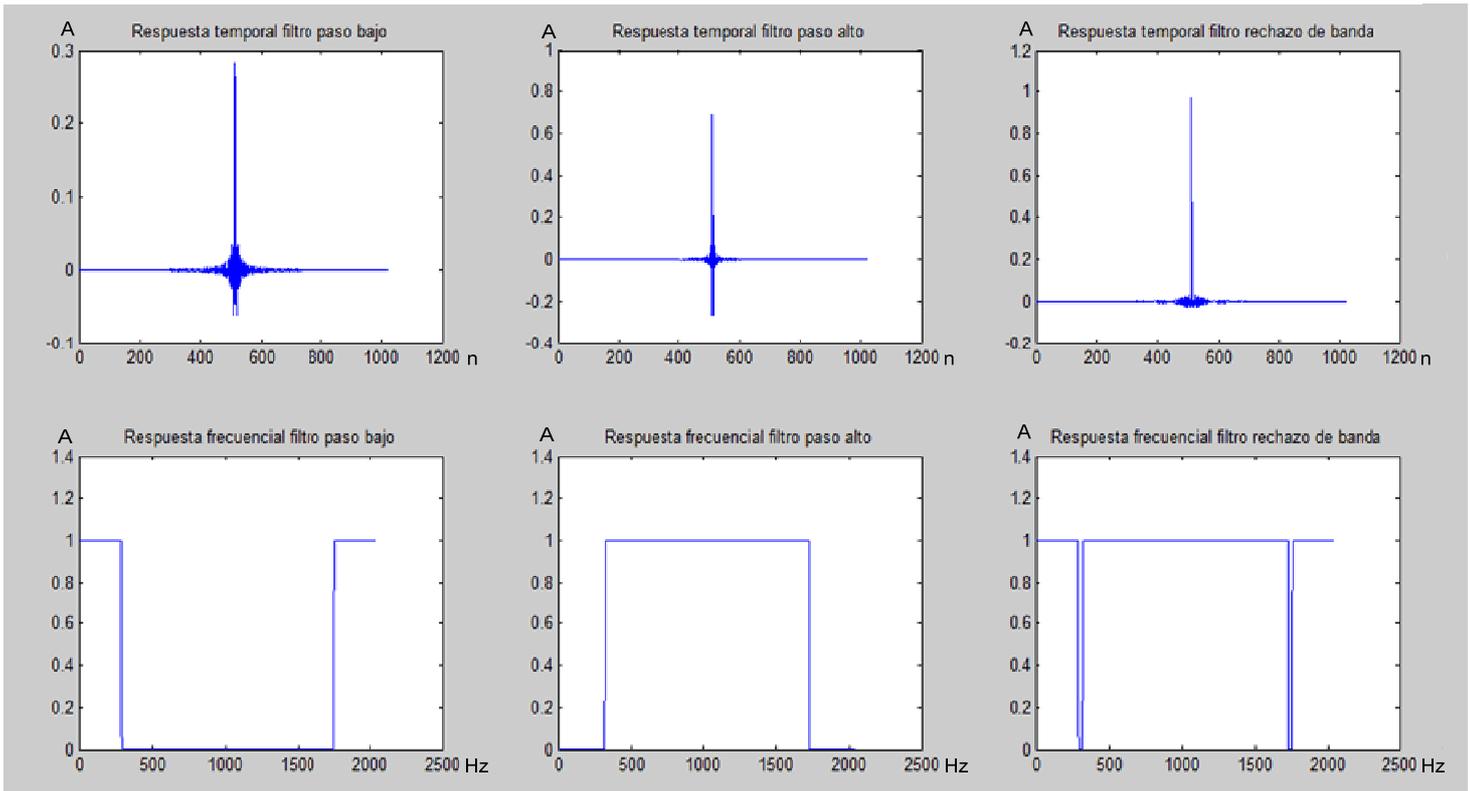


Imagen 47: Respuestas temporales y frecuenciales del filtro de rechazo de banda implementado a 300 Hz como suma de un filtro paso bajo de f_c 290Hz y un filtro paso alto de f_c 320Hz.

También se pretende eliminar perturbaciones a perturbaciones a 690 Hz.

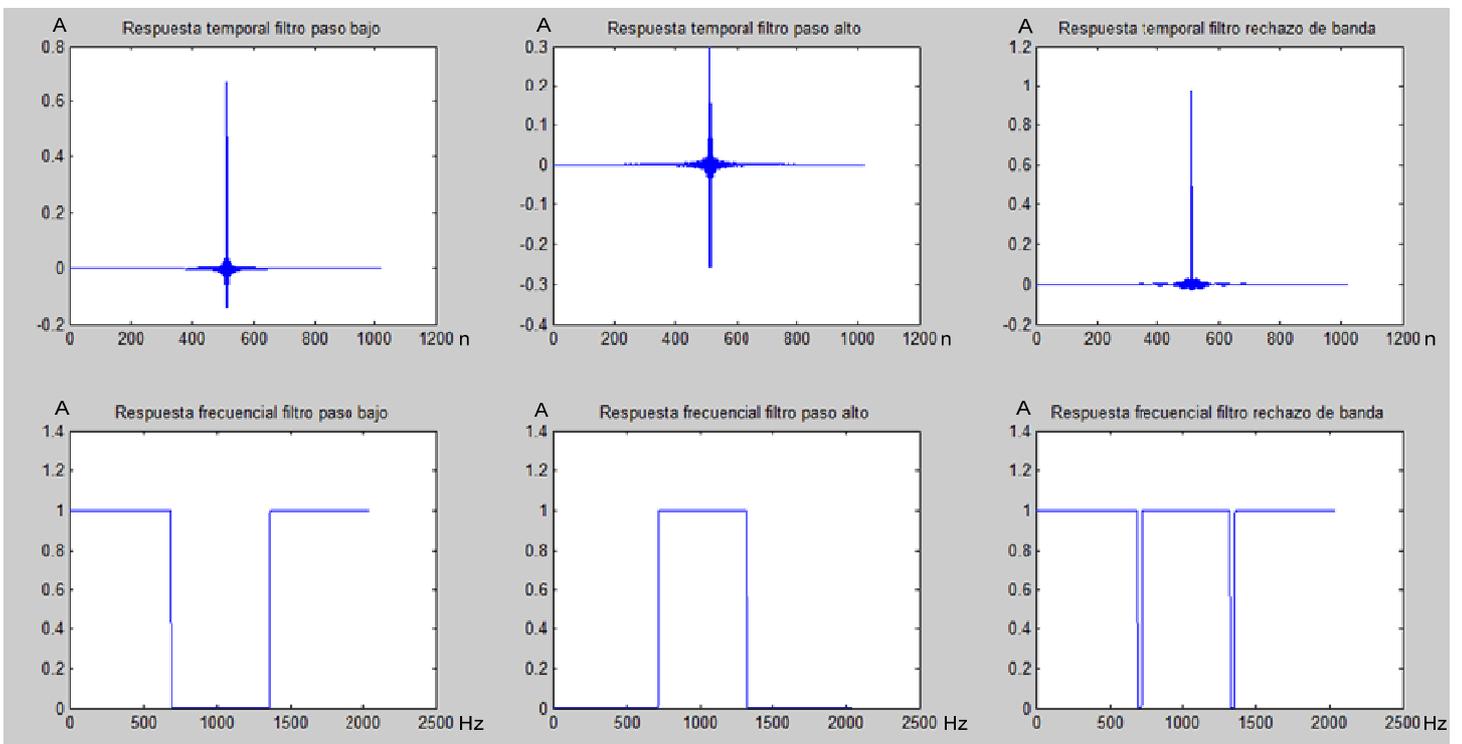


Imagen 48: Respuestas temporales y frecuenciales del filtro de rechazo de banda implementado a 700 Hz como suma de un filtro paso bajo de f_c 690Hz y un filtro paso alto de f_c 720Hz.

La aplicación de los filtros a las señales obtenidas cuando se golpea con un destornillador el cilindro se puede apreciar en la siguiente imagen.

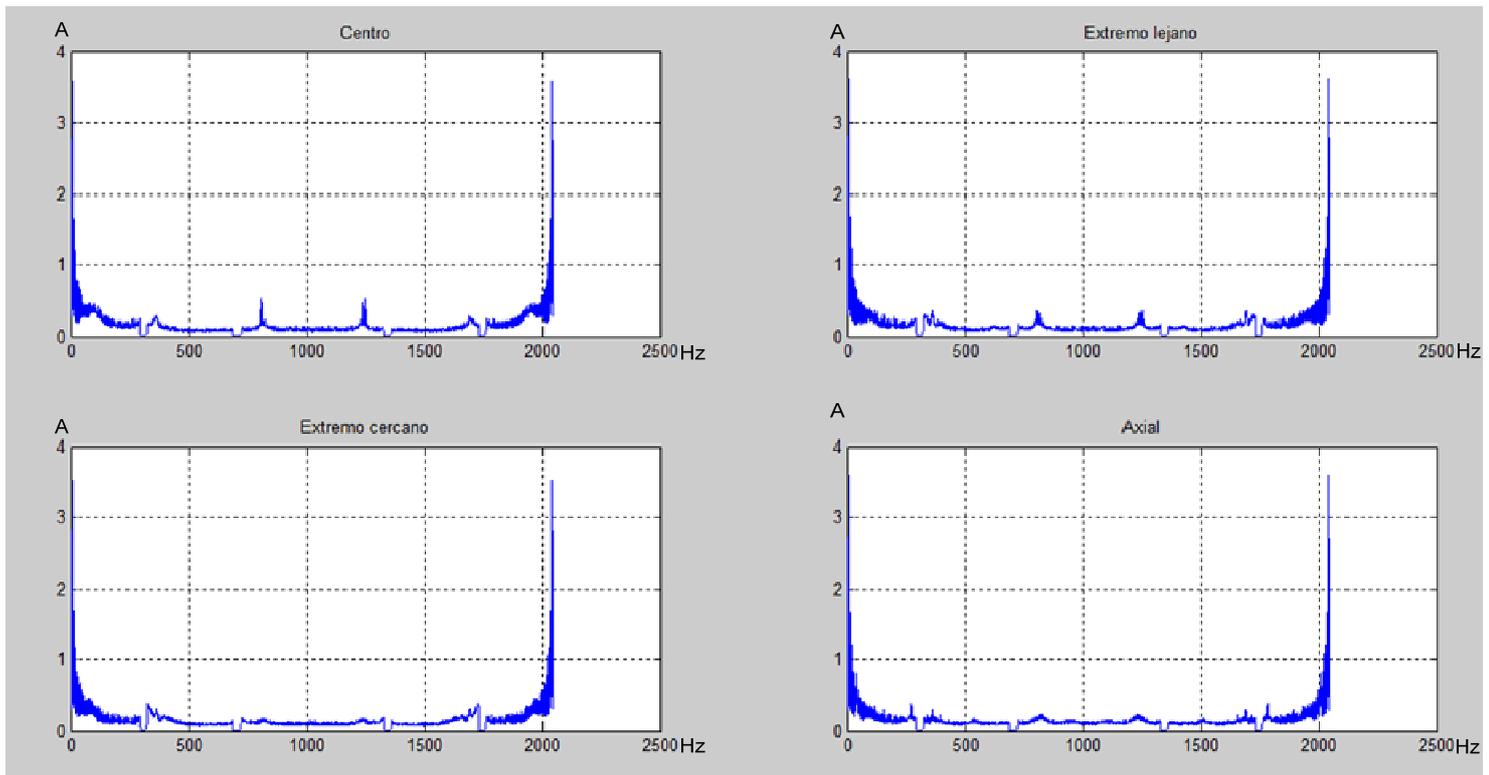


Imagen 49: Señales obtenidas al aplicarle el filtro de rechazo de banda.

5.1.4-APLICACIÓN DE DISTINTAS VENTANAS

Se han aplicado las ventanas de *Hamming*, *Blackman*, *Flat Top* y *Hanning*. No se detecta cambio significativo entre ellas. Se muestra a continuación el zoom de haberla aplicado en la gráfica del golpe central.

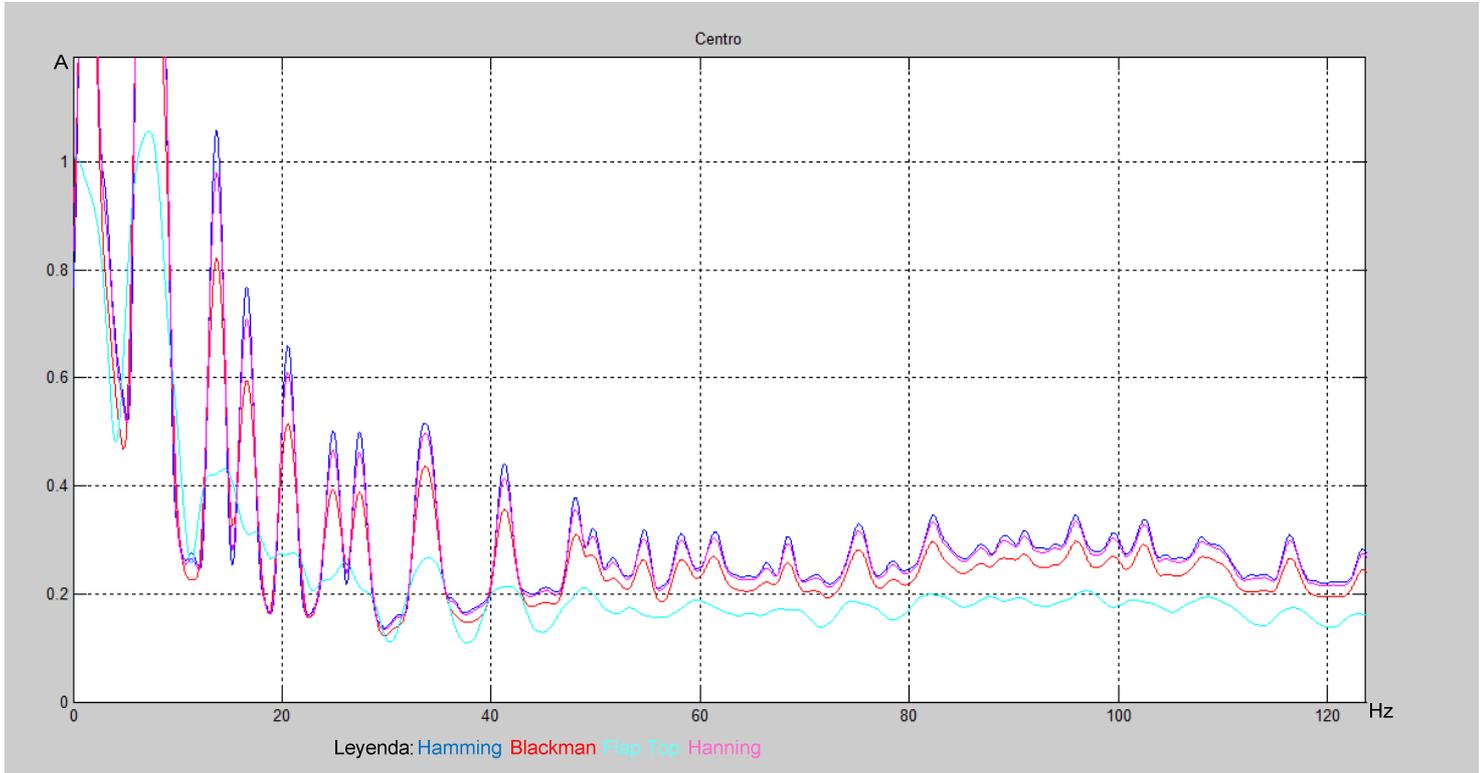


Imagen 50: Detalle de aplicar distintas ventanas al procesamiento de la señal producida al golpear centralmente el cilindro.

En la imagen se puede observar como la que tiene los menores lóbulos laterales es la *Flat Top*. No obstante los lóbulos principales están demasiado reducidos. Esta ventana no suele tener interés industrial excepto en aplicaciones muy particulares. Las ventanas de *Blackman*, *Hanning* y *Hamming* van por ese orden en cuanto a reducir los lóbulos laterales: *Blackman* es la que más los reduce frente a *Hamming* la que menos. La contrapartida de esto es el ancho del lóbulo principal: *Blackman* el más ancho (darse cuenta en la imagen 50 de que respecto a la altura es el que tiene más base) y *Hamming* el que menos.

Se concluye que la aplicación de una ventana de *Hamming* da buenos resultados y que no existe mejora significativa al emplear *Blackman* o *Hanning*. *Flat Top* se debe evitar.

5.1.5-SIMULACIONES REALIZADAS CON *SOLIDWORKS*

Según se explicó en el apartado 4.4 a fin de proveer de una base teórica a la frecuencia de resonancia obtenida se simuló el conjunto cilindro ampuesa en *SolidWorks*. El resultado de la simulación se observa en la imagen 51.

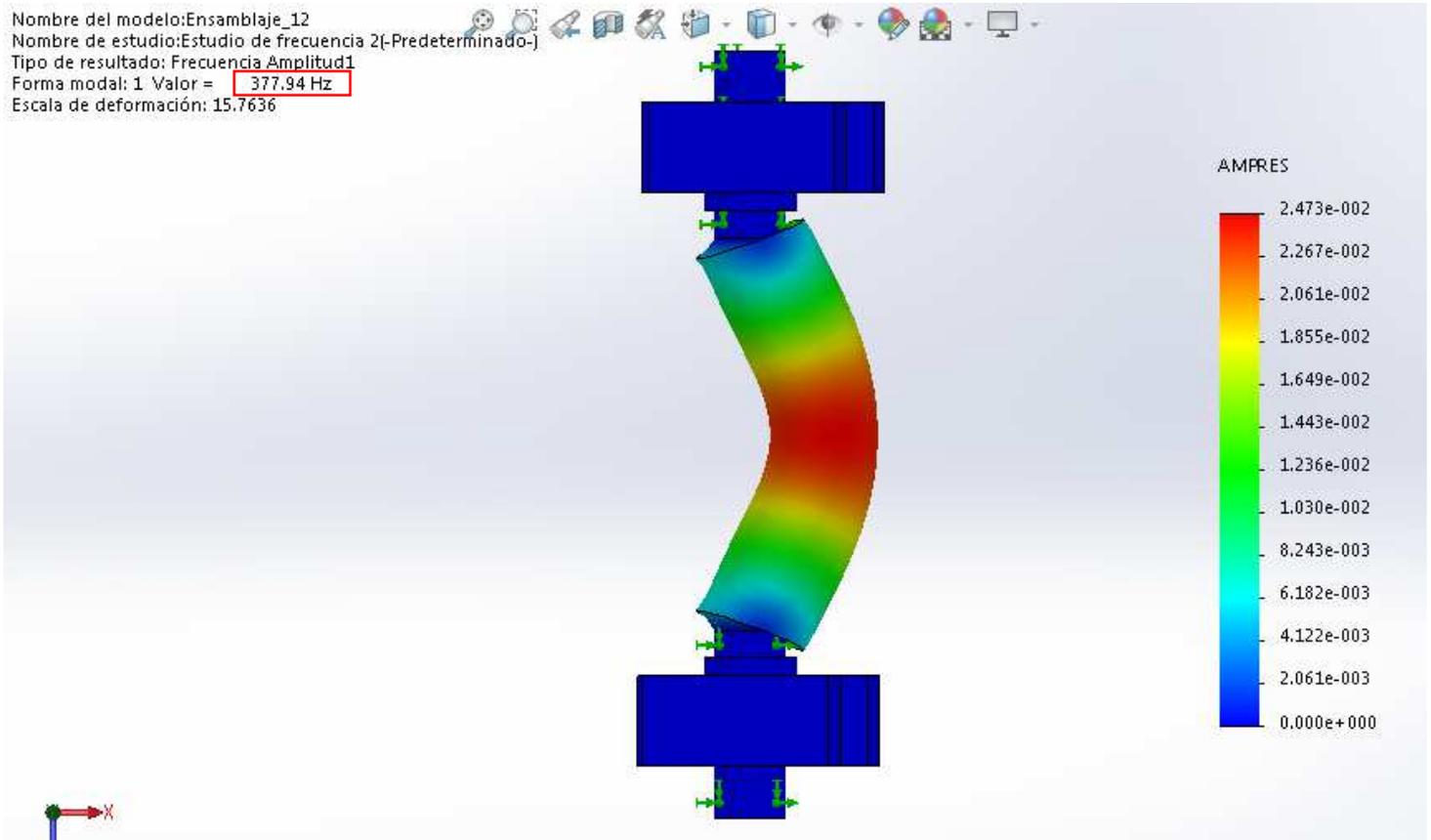


Imagen 51: Simulación en *SolidWorks* del conjunto cilindro ampuesa.

Se observa que **la frecuencia de resonancia toma el valor de 377,74 Hz lo que avala los datos obtenidos**. La simulación indica también cómo afectaría al cilindro las ondas en esa frecuencia mostrando su desplazamiento escalándolo según la leyenda de la derecha de la imagen.

Se realizó la simulación para el caso del cilindro desnudo a fin de comprobar si las ampuestas ejercen alguna influencia significativa en las mediciones.

Nombre del modelo: Cilindro_2
Nombre de estudio: Estudio de frecuencia 8 (-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Frecuencia Amplitud1
Forma modal: 1 Valor = 379.35 Hz
Escala de deformación: 15.2947

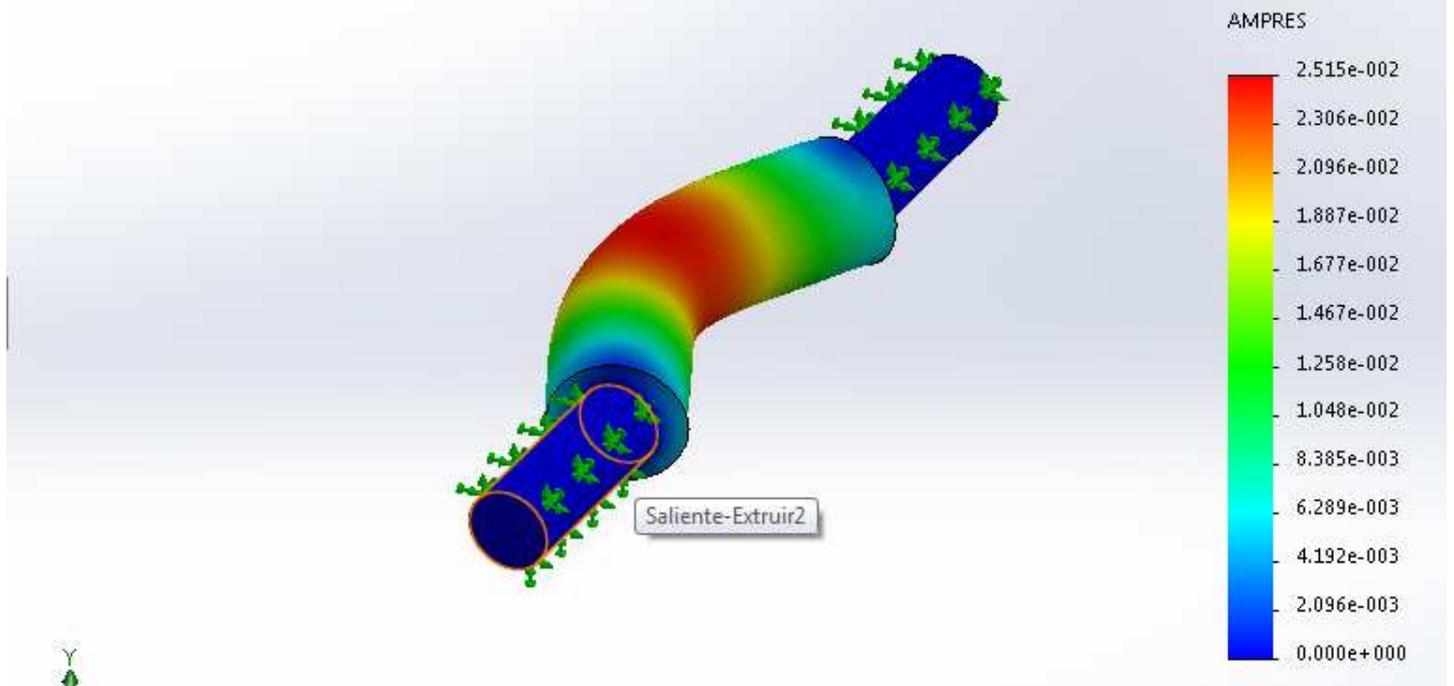


Imagen 52: Simulación en *SolidWorks* del cilindro desnudo.

La frecuencia de resonancia se sitúa en los 379.35 Hz con lo que, como se esperaba, las ampuestas no tienen influencia significativa en la frecuencia de resonancia del cilindro.

5.2-BOBINAS

5.2.1-RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS DEL BLOQUE I

Tras el diseño de los experimentos se pasó al análisis de los datos que arrojan los siguientes resultados:

-Para el impacto vertical:

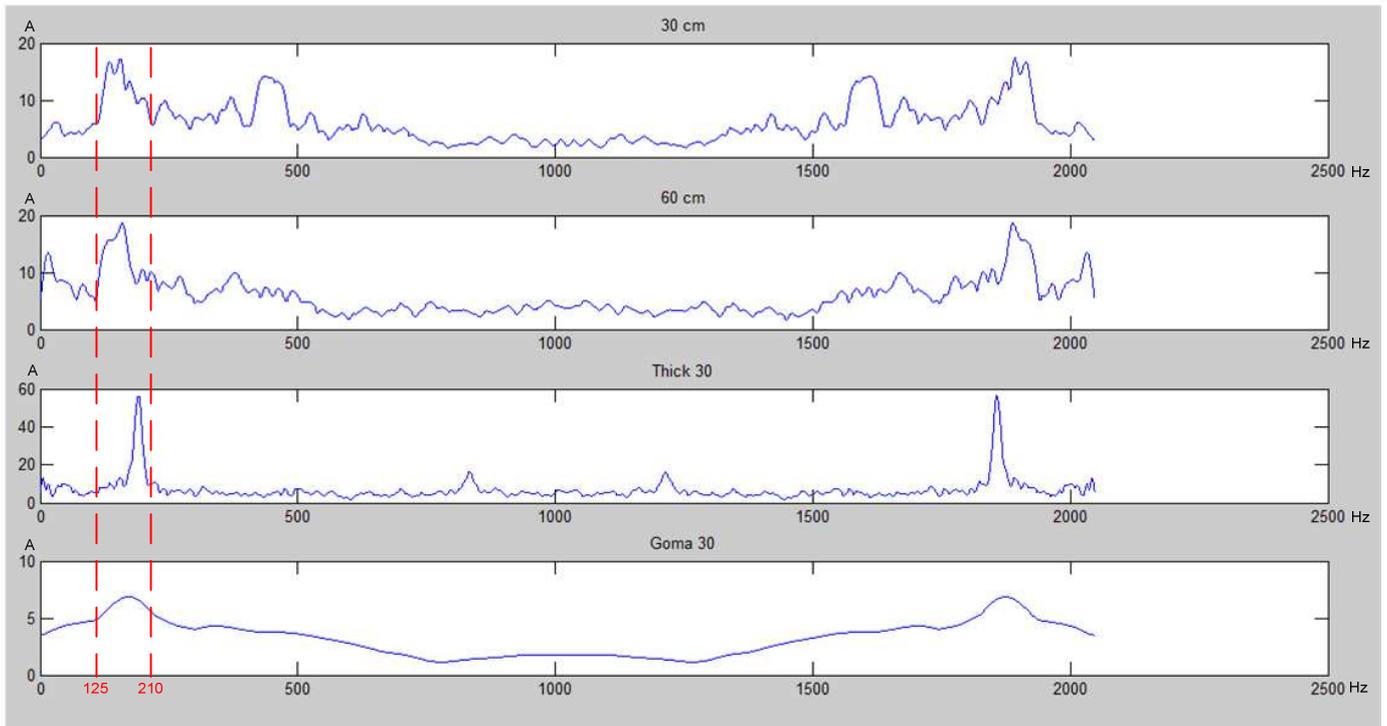


Imagen 53: Resultados tras el procesamiento frecuencial de las señales obtenidas en el experimento 1 del bloque I.

La zona de interés está en la banda de los 125-210 Hz.

-Para el impacto lateral se obtuvo:

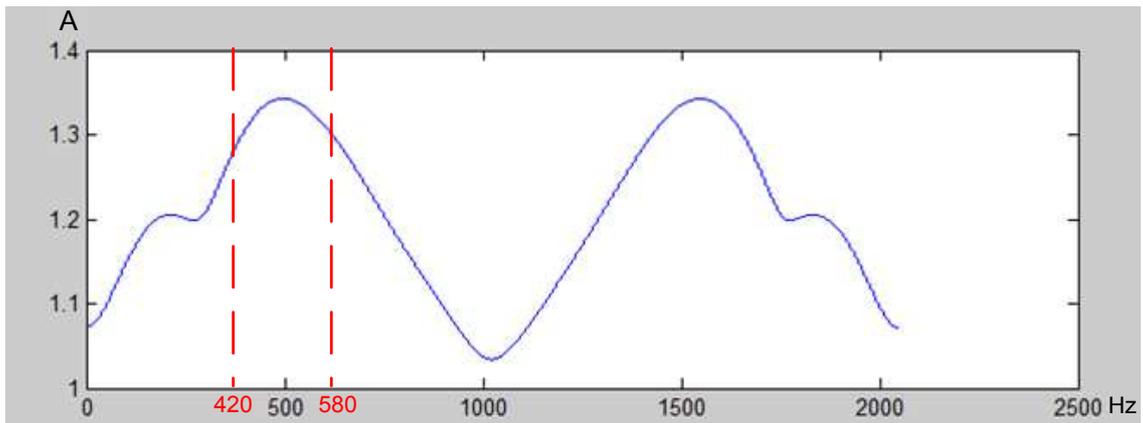


Imagen 54: Resultados tras el procesamiento frecuencial de las señales obtenidas en el experimento 2 del bloque I.

La zona de interés está en la banda de los 420-580 Hz.

-Suspensión: en la imagen 55 se ha aplicado un zoom en la zona de interés, razón por la cual la transformada no aparece simétrica.

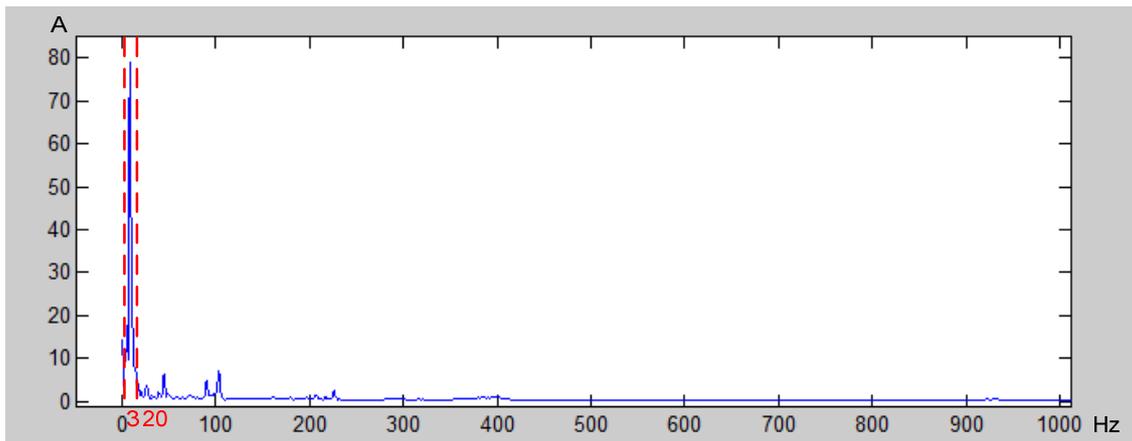


Imagen 55: Resultados tras el procesamiento frecuencial de las señales obtenidas en el experimento 2 del bloque I.

Como se puede ver se consiguió separar la dirección del impacto atendiendo a bandas frecuenciales. Estos resultados motivaron la realización de los experimentos del bloque II. No se han analizado en mayor profundidad ya que se trata de un paso previo siendo los resultados definitivos los que se comentan en el punto 5.2.2.

5.2.2-RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS DEL BLOQUE II

Se analizan a continuación las bandas frecuenciales obtenidas de impactar bobinas a escala lateralmente, verticalmente y al realizar una suspensión.

Impacto lateral

En el caso del golpe lateral de la bobina con el gacho se han obtenido los siguientes resultados.

Bobina pequeña:

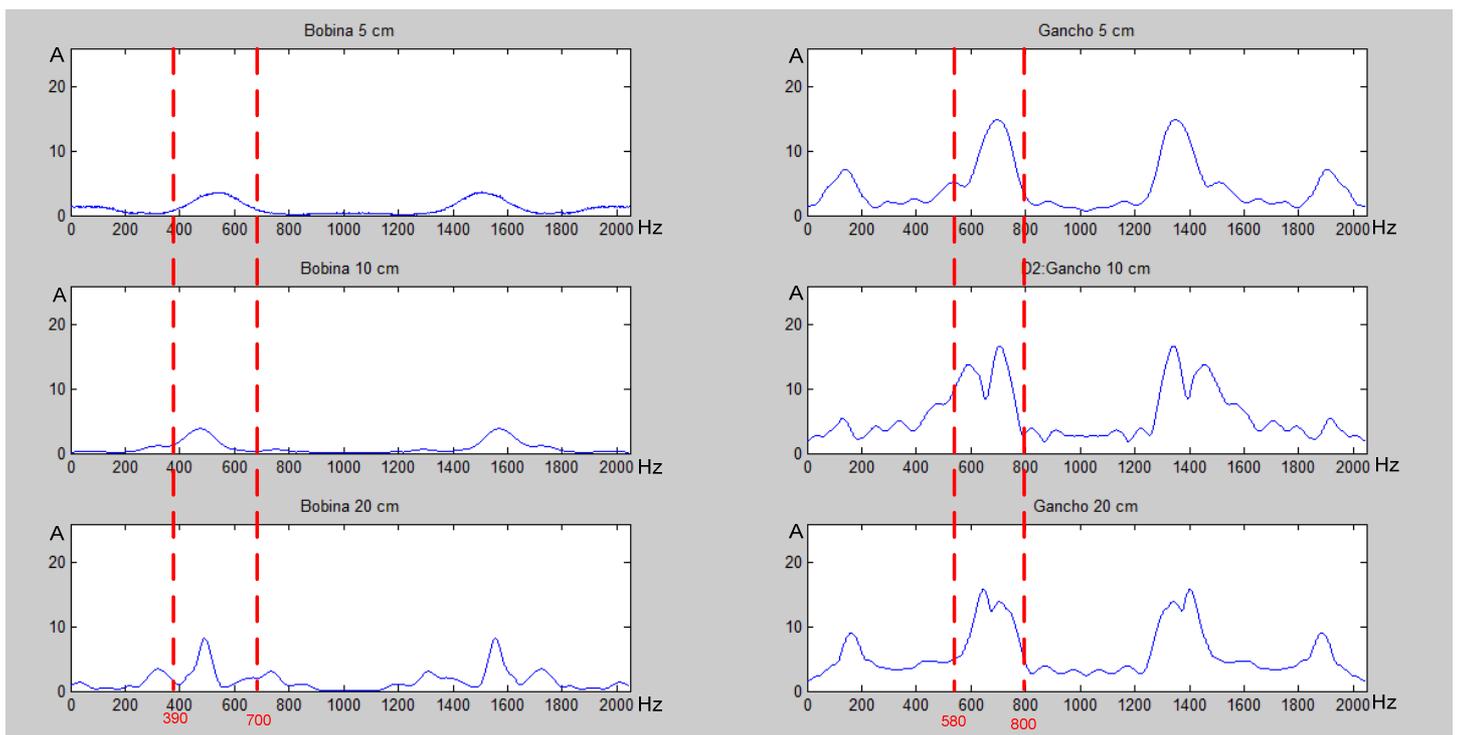


Imagen 56: Resultados de impactar la bobina pequeña lateralmente.

Las bandas frecuenciales destacadas se encuentran entorno a los 500-700Hz en función de que el sensor se ubique en la bobina o en el gancho. En el caso de la bobina se encuentran más centradas en los 500 Hz pero en el caso del gancho el pico se desplaza a los 700 Hz. La explicación de esto es que el gancho posee unas dimensiones más reducidas que la bobina.

Se observa además que en el caso del impacto registrado en la bobina cuanto mayor es la distancia más definida está la banda frecuencial lo que se debe a que, al tratarse de un impacto mayor las chapas que forman la bobina amortiguan menos el golpe con lo que, las senoides aparecen más definidas y al hacer la FTT se ve mejor.

Bobina grande:

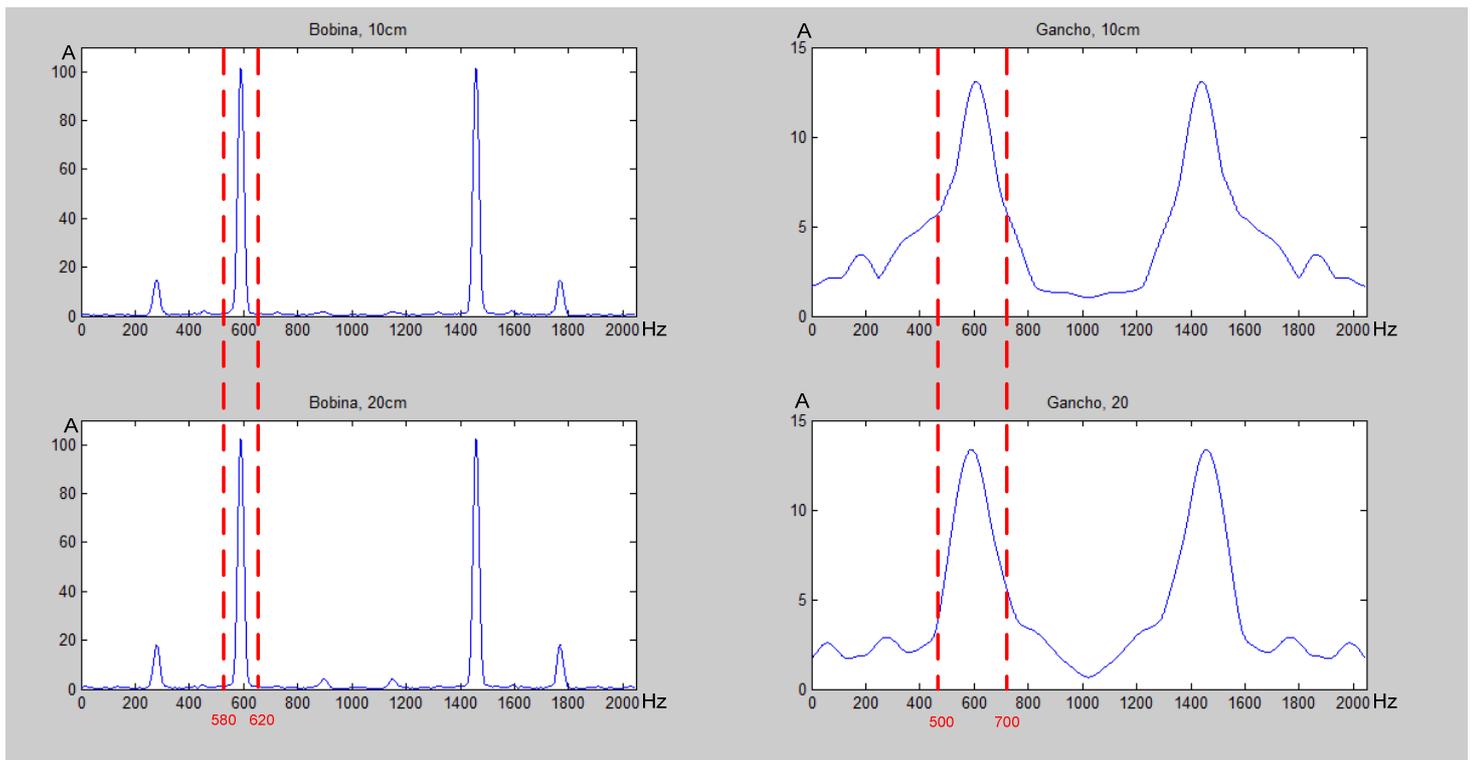


Imagen 57: Resultados de impactar la bobina grande lateralmente.

En este caso sólo se realizaron impactos a 10 y 20 cm por cuestiones de tiempo.

Las bandas frecuenciales se encuentran de forma clara en torno a los 600 Hz independientemente de que el sensor se posicionase en el gancho o el la bobina.

La mayor definición de los picos observada en este caso está relacionada con una menor amortiguación de los impactos ya que la bobina grande tiene las láminas considerablemente más compactadas que la pequeña.

Se puede observar que el tamaño de la bobina no afecta significativamente a las bandas frecuenciales. Se concluye, por tanto, que en este tipo de impactos las bandas se localizan alrededor de los 500-700Hz.

Suspensión

Para el caso de la suspensión, tras el procesado se obtuvieron los siguientes datos.

Bobina pequeña:

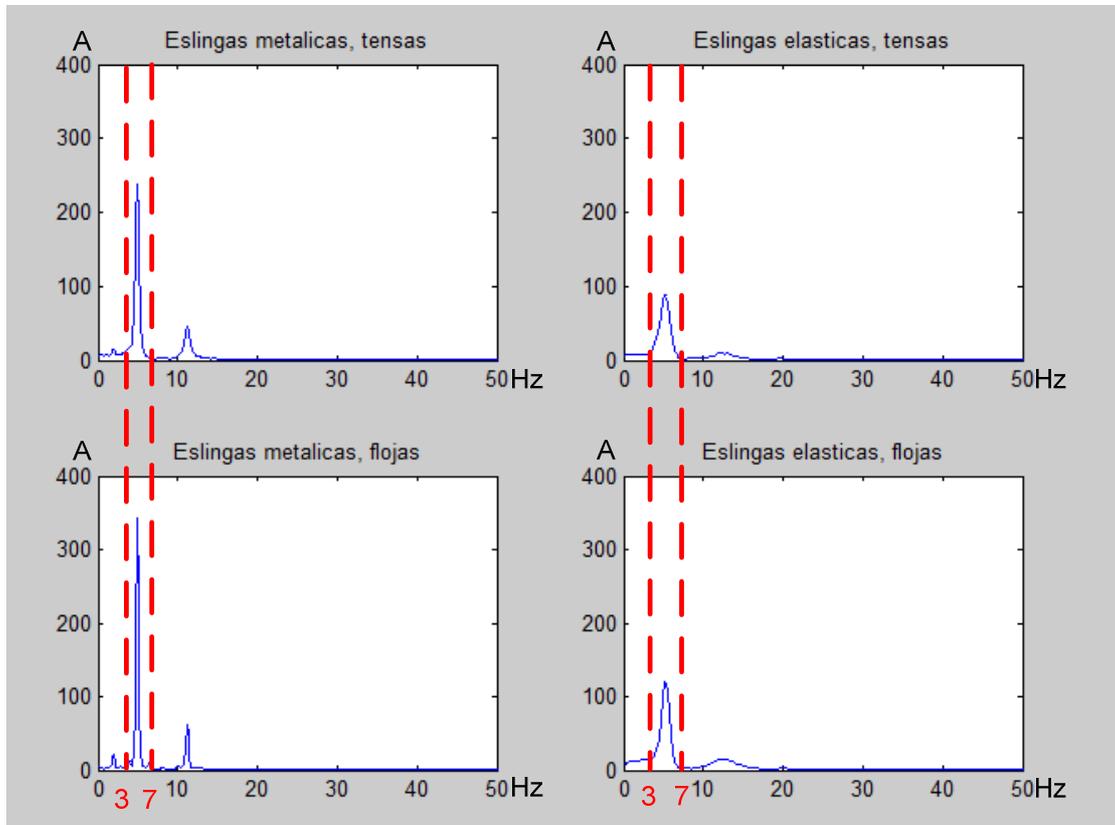


Imagen 58: Resultados de suspender la bobina pequeña.

Aparece un pico definido en torno a las bajas frecuencias (inferiores a 10 Hz). Esta banda se haya centrada en todos los casos en los 5 Hz.

Y en el caso de la bobina grande:

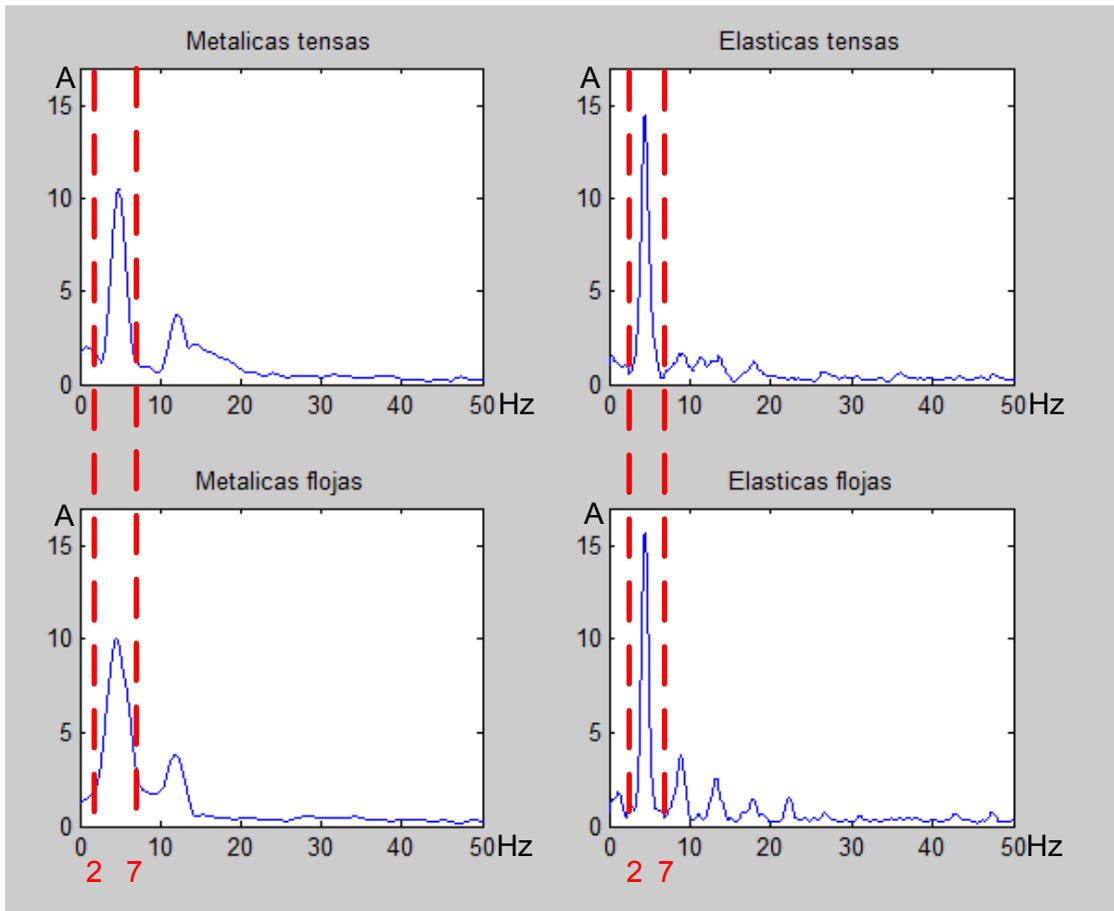


Imagen 59: Resultados de suspender la bobina grande.

Al igual que en el caso anterior existe una banda muy definida en bajas frecuencias centrada en los 5Hz. En este caso no existe variación con el tamaño de la bobina.

La única explicación que se encuentra al hecho de que en el caso de las bobinas pequeñas los picos sean mucho mayores es que puede entrar en un armónico (no el primer modo ya que este se identificó frecuentemente entorno a los 600Hz).

Golpe vertical

En este caso se decidió desechar los resultados de golpear a velocidad lenta. El motivo de esto es que no se pudo llegar a ninguna conclusión ya que al descender el gancho tan lentamente las diferentes capas de la bobina van amortiguando el impacto impidiendo que este llegue al sensor. Por tanto, no se podía distinguir el golpe en el espectro registrado.

Bobina pequeña:

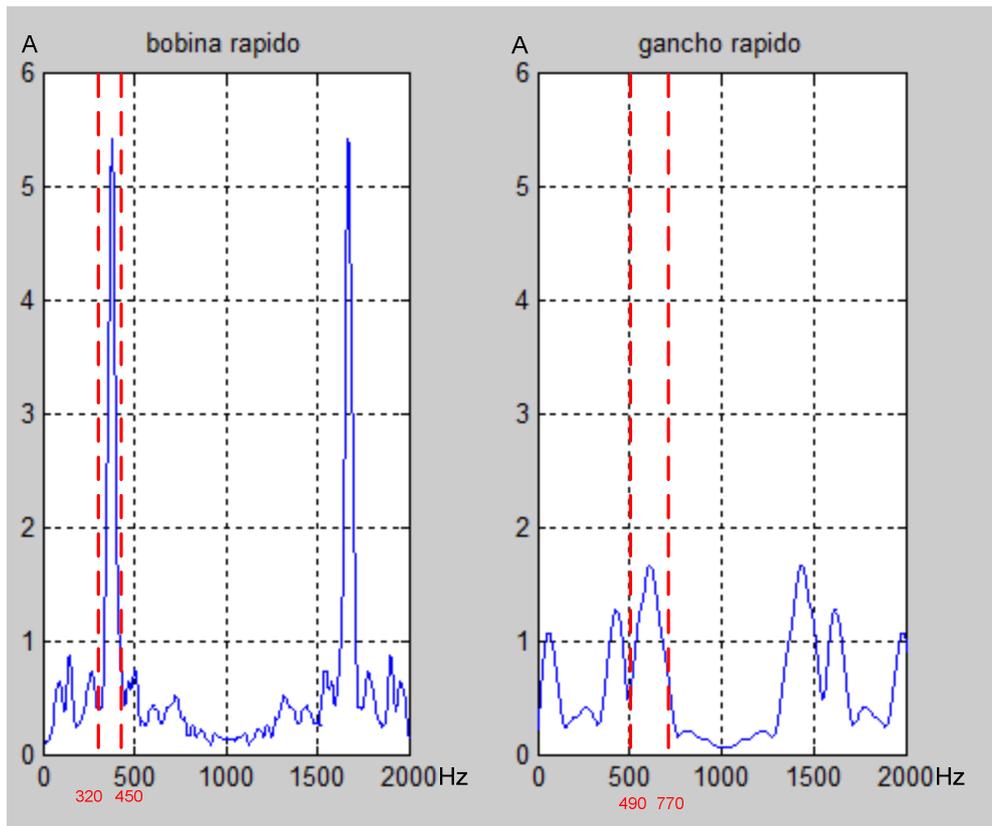


Imagen 60: Resultados de golpear verticalmente la bobina pequeña.

Existe cierta diferencia según el sensor se coloque en la bobina o en el gancho. En el primer caso la banda se sitúa en torno a los 400Hz y en el segundo caso entorno a los 600Hz. Este segundo caso no se ve tan claramente y la frecuencia se parece a la obtenida en el impacto lateral. No obstante, respecto a este último los espectros son muy distintos entre sí.

En la gráfica del sensor puesto en el gancho se aprecian una serie de picos a menores frecuencias. En realidad salen en todas las gráficas de golpe vertical lo que sucede es que en esta el pico principal tiene menor definición. Se piensa que se deben a todas las interferencias generadas cuando el gancho impacta verticalmente ya que en este caso el gancho que posee 2 grados de libertad se mueve sobre sus propios ejes generando interferencias.

Bobina grande:

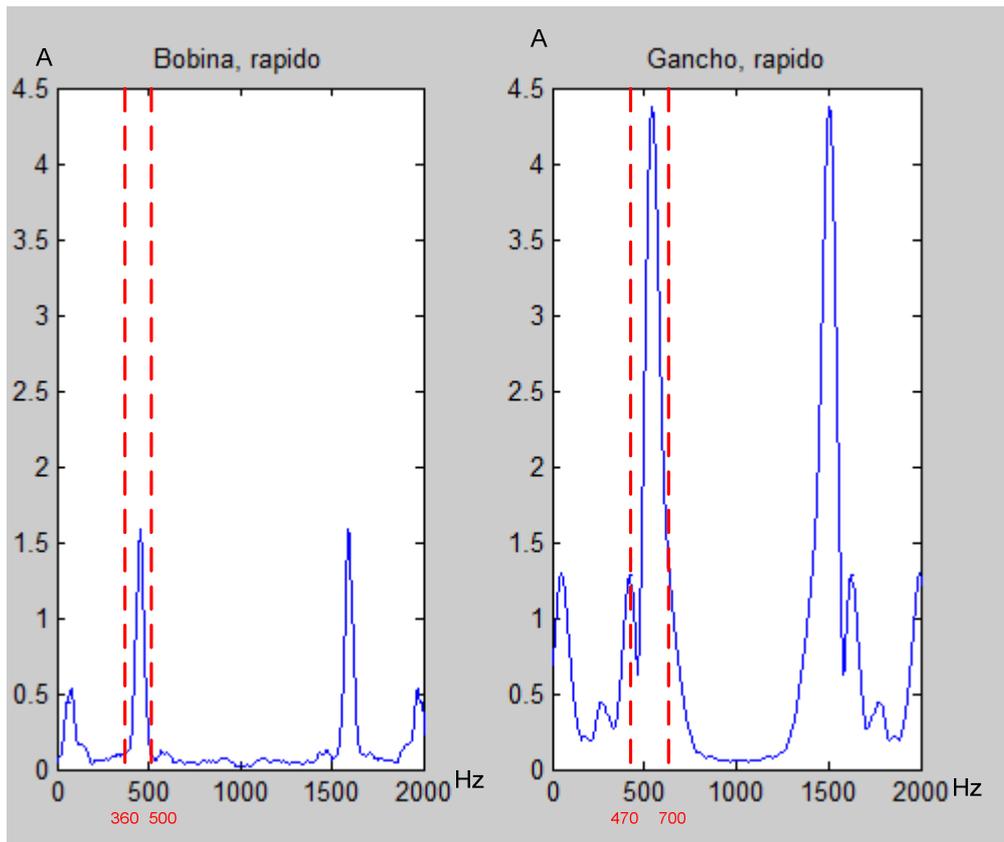


Imagen 61: Resultados de golpear verticalmente la bobina grande.

Aparecen bandas de frecuencia entorno a los 400Hz y 550 Hz. La forma de los espectros es muy parecida a la obtenida con la bobina pequeña.

5.2.3-RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS DEL BLOQUE III

Se pudo correlacionar un mayor impacto con una mayor media obtenida:

Impacto: 200mm -> Media: 0.2172

Impacto: 400mm -> Media: 0.4739

Impacto: 600mm -> Media: 0.6301

Impacto: 800mm -> Media: 1.0238

La aceleración debería de ser proporcional a la altura por la fórmula $E_p=mgh$. Esta proporcionalidad se mantiene en las tres primeras distancias y no se cumple en el último caso. Se piensa que esto puede ser debido a inexactitudes en la selección del tramo o problemas en la medida de los impactos (pese a las 4 tomas realizadas no se logró registrar más de dos golpes a esta altura ya que la comunicación se perdía).

6-CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Se ha conseguido delimitar la frecuencia de resonancia de los cilindros de forma práctica y contrastarlo con la hallada de forma teórica mediante la aplicación de un *software* de diseño mecánico. No se ha podido calcular dicha frecuencia en base a ecuaciones físicas ya que ha resultado demasiado complejo, no obstante, el programa de diseño se basa en una serie de algoritmos con un modelo matemático detrás. Además de los trabajos futuros (analizados en el punto 7) tratar de encontrar un algoritmo para resolver el problema puede ser un punto de interés en el que centrarse en los próximos meses.

Se han diseñado con éxito los experimentos correspondientes al análisis vibracional de las bobinas. Los resultados de los experimentos del bloque I fueron alentadores y permitieron continuar con el proyecto. Los datos han sido tratados delimitando unas bandas frecuenciales correspondientes a la dirección del impacto. Estas son especialmente claras en el impacto lateral y la suspensión. El impacto vertical fue el más difícil de tratar, llegando a desechar cualquier dato obtenido al golpear con el gancho a velocidad lenta, y se repitieron numerosas veces hasta obtener unos datos factibles. Se ha observado que no existe variación en función de las dimensiones de las bobinas. En este momento, se considera que se puede pasar a la siguiente fase del proyecto.

Se ha observado una correlación entre los datos obtenidos y la fuerza del impacto. Estos experimentos sólo se llevaron a cabo de forma controlada con materiales que simulaban el puente grúa y la bobina. Además, debido a limitaciones del sensor no se pudo llegar a aceleraciones elevadas. No se cree que no haber registrado aceleraciones elevadas suponga un problema ya que en la práctica no se van a tratar. Pero si sería interesante llevar el algoritmo desarrollado a la planta de bobinas.

Se han alcanzado todos los objetivos fijados en el proyecto y se ha podido desarrollar un análisis exhaustivo como refleja la presente documentación. El trabajo ha cubierto las expectativas inicialmente previstas y se han superado con éxito las dificultades existentes en su desarrollo.

Por último, todos los datos recogidos y las fuentes consultadas tienen una fiabilidad contrastable que aportan al presente documento una base teórica valiosa que puede servir de apoyo en posteriores investigaciones.

7-FUTUROS TRABAJOS

Se describe la aplicación que se quiere dar a los análisis desarrollados que conforman dos proyectos por separado en los que se prevé trabajar durante los próximos meses.

7.1-CILINDROS

Se pretende desarrollar un *software* específico que aisle una banda frecuencial en torno a la frecuencia de resonancia (se ha pensado que vaya desde los 340 hasta los 440 Hz). Acotar esas frecuencias permite ser más eficiente, pues el volumen de datos a analizar se reduce a una décima parte. También evita que los ruidos que se puedan generar en otras frecuencias alteren los resultados.

Aislada la zona de interés, se intenta diseñar un contador de picos que sea capaz de registrar las veces que se ha sobrepasado un determinado umbral. La búsqueda del umbral a partir de la experiencia práctica es el siguiente paso a desarrollar.

Una vez que se pueda contar el número de picos que hay en la banda de frecuencias, se pretende fijar el momento en el que el cilindro es seguro, es decir, que no se han producido picos por encima del umbral en un tiempo determinado. La búsqueda de ese tiempo, a partir del cual se garantiza la seguridad, es uno de los objetivos más problemáticos. Sería muy interesante que exista colaboración entre la planta de Arcelor Mittal Avilés y otras plantas que puedan estar interesadas en el desarrollo del proyecto.

Saber a partir de qué momento el cilindro es estable, incrementa la seguridad respecto a lo existente en la actualidad que, como ya se ha explicado, se basa en esperar un tiempo que empíricamente suele ser el adecuado pero, por desgracia, es insuficiente en algunos casos. También incrementa la eficiencia pues se cree que en muchos casos se podrá reducir el tiempo de espera.

7.2-BOBINAS

El proyecto de las bobinas se encuentra en una fase más inicial que el de los cilindros. Se pretende crear un sistema que a partir del análisis de bandas frecuenciales, identifique el impacto recibido. Se ha pensado en investigar sólo las bandas frecuenciales que se han obtenido a partir de este proyecto de forma que, al igual que en el caso de los cilindros, se gane eficiencia y se eviten ruidos.

Se pretende buscar un umbral en el plano temporal que sea indicativo de un impacto que puede deteriorar la bobina. En este caso se necesita instalar un equipo que registre los datos obtenidos en las bandas frecuenciales en el parque de bobinas real y que coteje los impactos con los daños en las bobinas. Este paso requiere la colaboración de la acería de Avilés.

Conociendo el umbral, se pretende obtener un sistema de alarma que avise de qué bobina puede haber resultado dañada para su inspección en profundidad antes del envío al cliente. Esto evitaría las devoluciones y ahorraría pérdidas económicas además de la consiguiente mejora de la imagen empresarial.

8-BIBLIOGRAFÍA

Libros

Tipler, Paul A. y Mosca, Gene: *“Física para la ciencia y la tecnología”*, 6ª Edición, 2010 Reverté.

Smith, Steven W.: *“The Scientist and Engineer’s Guide to Digital Signal Processing”*, 1997 Hardcover.

Pérez Fonollosa, M^a Aranzazu y otros: *“El Proceso Siderúrgico”*, Grafinsa 2007.

Pérez García, Miguel Ángel, *“Instrumentación electrónica”*, Paraninfo 2014.

Rodríguez Danta, Marcelo, *“Mecánica”*, Universidad de Sevilla – Secretariado de Publicaciones 2013.

Páginas web

<http://www.guemisa.com/articul/pdf/vibraciones.pdf>

<http://www.energiza.org/mantenimiento-de-plantas/19-mantenimiento-de-plantas/516-analisis-de-vibraciones-una-tecnologia-clave-del-mantenimiento-predictivo>

<http://www.bdigital.unal.edu.co/4195/1/7109002.2011.pdf>

http://campus.fi.uba.ar/pluginfile.php/117599/mod_resource/content/1/VelocidadCritica%20Mayer.pdf

http://www.ehu.es/daq_tutorial/Doc/Castellano/Tema%205.htm

Artículos

Rivas, E. y Laniado, E. *“Metodología para determinar los Modos de Vibración del Modelo Numérico de un CTC dentro de la Señal del Conmutador bajo Operación”*

