

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



"PLAN DE MANTENIMIENTO
PREDICTIVO EN UNA PLANTA DE
PROCESADO DE PAPEL"

TRABAJO FIN DE GRADO

Febrero -2025

AUTOR: Andrés Pineda Box

DIRECTOR/ES: Ramón Peral Orts

Agradecimientos

Al finalizar esta etapa tan significativa en mi vida, me gustaría expresar mi más profundo agradecimiento a todas aquellas personas que, de una u otra manera, han sido parte fundamental de este proceso.

En primer lugar, quiero dedicar un agradecimiento especial a mi familia, cuyo apoyo incondicional ha sido el pilar sobre el que me he sostenido durante estos años. A mis padres, en particular, por su infinita paciencia, por cada palabra de aliento y por brindarme la confianza necesaria para seguir adelante incluso en los momentos más desafiantes.

A mis profesores, quienes con su conocimiento y dedicación han contribuido a mi formación académica y personal. En especial, a mi tutor de TFG, Ramón Peral Orts, por su orientación, sus valiosos consejos y por guiarme con paciencia y profesionalismo a lo largo de la realización de este trabajo.

A mis compañeros de clase, con quienes he tenido el placer de compartir este camino. Gracias por las horas de estudio, los debates enriquecedores y, sobre todo, por el compañerismo y la amistad que hemos construido juntos.

Y, por último, pero no menos importante, a mi novia, quien ha tenido la paciencia de soportarme durante estos años de esfuerzo, estrés y largas jornadas de estudio. Su amor y comprensión han sido un refugio imprescindible en este viaje.

A todos ustedes, gracias de corazón. Sin su apoyo, este logro no habría sido posible.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	DEFINICIÓN Y NECESIDAD DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO.	2
1.2.	TIPOS DE MANTENIMIENTO.....	3
1.2.1.	MANTENIMIENTO CORRECTIVO O FUNCIONAMIENTO HASTA EL FALLO.....	3
1.2.2.	MANTENIMIENTO PREVENTIVO.	4
1.2.3.	MANTENIMIENTO PREDICTIVO.....	6
1.2.4.	MANTENIMIENTO PROACTIVO.....	7
1.3.	METODOLOGÍAS DE MANTENIMIENTO.....	8
2.	ANTECEDENTES.....	10
2.1	AUDITORIA DE MANTENIMIENTO.....	10
2.2.	DIAGRAMA DE FLUJOS.....	11
2.3.	HISTÓRICO DE AVERÍAS.....	13
3.	OBJETIVOS.....	15
4.	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS EQUIPOS.....	17
4.1.	RESMADORAS.....	17
4.2.	THIMON.....	18
5.	INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA Y SUS CARACTERÍSTICAS.....	20
5.1.	ACELERÓMETRO.....	20
5.2.	SOFTWARE DE ANÁLISIS DE VIBRACIONES: WISER Vibe.....	22
5.3.	CÁMARA TÉRMICA.....	22

6.	ELEMENTOS MONITORIZADOS	24
6.1.	ENGRANAJES.....	24
6.1.1.	FRECUENCIAS PROPIAS DE UN ENGRANAJE.....	24
6.1.2.	FACTORES DETERMINANTES EN LAS LECTURAS DE VIBRACIONES.....	26
6.1.3.	DIAGNÓSTICO DE AVERÍAS EN ENGRANAJES.....	27
6.2.	RODAMIENTOS.....	28
6.2.1.	ANÁLISIS ESPECTRAL Y DE LA ONDA EN EL TIEMPO.....	29
6.2.2.	SEVERIDAD DEL DETERIORO EN RODAMIENTOS.....	31
6.2.3.	DEFECTOS TÍPICOS EN RODAMIENTOS Y SU IDENTIFICACIÓN.....	31
6.2.4.	OTROS ELEMENTOS MECÁNICOS.....	32
7.	IDENTIFICACIÓN DE CAUSAS DE VIBRACIONES.....	33
7.1.	DESEQUILIBRIO.....	34
7.2.	EXCENRICIDAD.....	35
7.3.	EJE DEFORMADO	36
7.4.	DESALINEACIÓN.....	37
7.4.1.	TIPOS DE DESALINEACIONES	38
7.5.	HOLGURAS.....	39
7.5.1.	HOLGURAS ESTRUCTURALES.....	41
8.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO (PMP). ...	42
8.1.	TÉCNICAS DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO.....	43
8.1.1.	ANÁLISIS DE VIBRACIONES. CONCEPTOS BÁSICOS.....	43
8.2.	ANÁLISIS DE ACEITES LUBRICANTES.....	45

8.3.	TERMOGRAFÍA.....	46
8.4.	ULTRASONIDOS.....	47
9.	SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MEDIDA.....	49
9.1.	RESMADORAS.....	49
9.1.1.	GRUPO A: DESBOBINAJE.....	51
9.1.2.	GRUPO B: ENTRADA.....	54
9.1.3.	GRUPO C: CORTE LONGITUDINAL Y SINCRONIZADO.....	55
9.1.4.	GRUPO D: SALIDA.....	60
9.1.5.	GRUPO E: APILADO.....	64
9.2.	THIMON.....	65
10.	PUESTA EN MARCHA.....	66
10.1.	DATOS CARACTERÍSTICOS.....	66
10.2.	TOMA DE DATOS.....	67
10.2.1.	THIMON.....	67
10.2.2.	RESMADORA.....	69
11.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	76
11.1.	THIMON.....	77
11.2.	RESMADORA.....	77
11.2.1.	RODILLO DE TRACCIÓN O PRENSA,.....	77
11.2.2.	MOTORES DE LAS CUCHILLAS.....	82
11.2.3.	MOTOR DE LA CINTA RÁPIDA (MCR).....	91
11.2.4.	MOTOR DE LA CINTA LENTA.....	93

12.	PERIODICIDAD DE LAS MEDICIONES.....	95
13.	INFORME DE MEDIDAS.....	96
13.1.	INFORME DE MONITORIZACIÓN DEL MOTOR DEL RODILLO DE TRACCION DE LA RESMADORA	96
13.2.	INFORME DE ORDEN DE TRABAJO	98
13.3.	RETROALIMENTACIÓN DEL SISTEMA	99
14.	CONCLUSIONES.....	100
15.	BIBLIOGRAFÍA.....	101



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Diagrama de flujo de la planta de producción (imagen creada como representación visual).....	12
Ilustración 2. Cámara térmica (imagen obtenida de la web zofti).....	23
Ilustración 3. Fases en relación de engranajes.....	25
Ilustración 4. Despiece rodamiento (Imagen obtenida de la asignatura de Mantenimiento Predictivo II).....	28
Ilustración 5. Elementos con excentricidad.....	35
Ilustración 6. Desbalanceo/excentricidad (Imagen obtenida de la asignatura de Mantenimiento Predictivo I).....	36
Ilustración 7. Eje deformado (Imagen obtenida de la asignatura de Mantenimiento Predictivo I).....	37
Ilustración 8. Desalineación angular (Imagen obtenida de la asignatura de Mantenimiento Predictivo I).....	38
Ilustración 9. Desalineación radial (Imagen obtenida de la asignatura de Mantenimiento Predictivo I).....	39
Ilustración 10. Holgura estructural (Imagen obtenida de la asignatura de Mantenimiento Predictivo I).....	41
Ilustración 11. Plano conjunto resmadora.....	50
Ilustración 12. Plano desbobinaje.....	51
Ilustración 13. Plano eje de volteo.....	52
Ilustración 14. Plano eje de desenrollamiento.....	53
Ilustración 15. Plano brazo central.....	54
Ilustración 16. Plano grupo entrada.....	54
Ilustración 17. Plano corte longitudinal y sincronizado.....	55
Ilustración 18. Plano cuchillas longitudinales superiores.....	56
Ilustración 19. Plano cuchillas longitudinales inferiores.....	56
Ilustración 20. Plano presa de arrastre y accionamiento.....	57
Ilustración 21. Plano transmisión del motor a rodillo de traccion.....	58
Ilustración 22. Plano corte transversal sincronizado.....	59
Ilustración 23. Despiece corte transversal sincronizado.....	59
Ilustración 24. Plano salida del corte.....	60
Ilustración 25. Plano despiece cinta rápida.....	61
Ilustración 26. Plano caja aspirante de correa perforada.....	62
Ilustración 27. Plano grupo superposición.....	62
Ilustración 28. Plano conjunto cinta lenta.....	63
Ilustración 29. Plano motor cinta lenta.....	63
Ilustración 30. Plano grupo apilado.....	64
Ilustración 31. Plano despiece rodillo de torsión.....	65
Ilustración 32. Plano horno.....	65
Ilustración 33. Plano puerta horno.....	65
Ilustración 35. Entrada.....	67
Ilustración 34. Salida.....	67
Ilustración 36. Lado izquierdo desde la salida.....	68
Ilustración 37. Lado izquierdo desde la entrada.....	68
Ilustración 38. Lado derecho.....	68
Ilustración 39. Motor de prensa y arrastre de accionamiento.....	70
Ilustración 40. Lado acoplado.....	70
Ilustración 41. Lado libre.....	70

Ilustración 42. Apoyo 2	71
Ilustración 43. Apoyo 1	71
Ilustración 44. Lado acoplado	72
Ilustración 45. Lado libre.....	72
Ilustración 46. Imagen motor cuchilla.....	72
Ilustración 47. Imagen motor cuchilla.....	73
Ilustración 48. Lado acoplado motor cuchilla	73
Ilustración 49. Lado libre motor cuchilla	73
Ilustración 50. Imagen motor cinta rápida.....	74
Ilustración 51. Lado acoplado	74
Ilustración 52. Lado libre.....	74
Ilustración 53. Imagen motor cinta lenta	75
Ilustración 54. Lado acoplado	75
Ilustración 55. Lado libre.....	75
Ilustración 56. Monitorizado motor rodillo de tracción lado acoplado	78
Ilustración 57. Monitorizado motor rodillo de tracción lado libre	79
Ilustración 58. Monitorizado apoyo 1	80
Ilustración 59. Monitorizado apoyo 2	81
Ilustración 60. Monitorizado motor cuchilla 1 lado acoplado. Espectro reducido.....	83
Ilustración 61. Monitorizado motor cuchilla 1 lado acoplado. Amplio espectro	84
Ilustración 62. Monitorizado motor cuchilla 1 lado libre. Espectro reducido.....	85
Ilustración 63. Monitorizado motor cuchilla 1 lado libre. Amplio espectro	86
Ilustración 64. Monitorizado motor cuchilla 2 lado libre. Espectro reducido.....	88
Ilustración 65. Monitorizado motor cuchilla 2 lado libre. Amplio espectro	89
Ilustración 66. Monitorizado motor cuchilla 2 lado acoplado. Espectro reducido.....	90
Ilustración 67. Monitorizado motor cuchilla 2 lado acoplado. Amplio espectro	90
Ilustración 68. Monitorizado motor cinta rápida lado acoplado.....	92
Ilustración 69. Monitorizado motor cinta rápida lado libre.....	92
Ilustración 70. Monitorizado motor cinta lenta lado acoplado.....	94
Ilustración 71. Monitorizado motor cinta lenta lado libre	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Averías en el cabezal de corte y desbobinado de las resmadoras y horno de la Thimon	13
Table 2. Especificaciones técnicas	21
Tabla 3. Periodicidad de las mediciones	95
Tabla 4. Historial completo de averías	102
Tabla 5. Glosario de frecuencias características.....	115
Tabla 6. Velocidades de giro y características mecánicas de los elementos que componen el motor rodillo de tracción.....	117
Tabla 7. Frecuencia de los defectos en el eje y/o apoyos en el motor de rodillo de tracción	118
Tabla 8 .Frecuencias de los defectos en los engranajes en el motor de rodillo de tracción	118
Tabla 9 Frecuencias de los defectos en los rodamientos del motor de rodillo de tracción	119
Tabla 10 Velocidades de giro y características mecánicas de los elementos que componen de los apoyos.....	120
Tabla 11. Frecuencias de los defectos en los rodamientos de los apoyos	121
Tabla 12. Velocidades de giro y características mecánicas de los elementos que componen la cuchilla 1 fecha 15-11-24.....	121
Tabla 13. Frecuencia de los defectos en el eje y/o apoyos en la cuchilla 1 fecha 15-11-24	122
Tabla 14. Frecuencias de los defectos en los engranajes en la cuchilla 1 fecha 15-11-24	122
Tabla 15. Frecuencias de los defectos en los rodamientos en la cuchilla 1 fecha 15-11-24	123
Tabla 16. Velocidades de giro y características mecánicas de los elementos que componen la cuchilla 1 fecha 20-12-24.....	123
Tabla 17. Frecuencia de los defectos en el eje y/o apoyos en la cuchilla 1 fecha 20-12-24	124
Tabla 18. Frecuencias de los defectos en los engranajes en la cuchilla 1 fecha 20-12-24	125
Tabla 19. Frecuencias de los defectos en los rodamientos en la cuchilla 1 fecha 20-12-24	125
Tabla 20. Velocidades de giro y características mecánicas de los elementos que componen la cuchilla 2 fecha 15-11-24.....	126
Tabla 21. Frecuencia de los defectos en el eje y/o apoyos en la cuchilla 2 fecha 15-11-24	127
Tabla 22. Frecuencias de los defectos en los engranajes en la cuchilla 2 fecha 15-11-24	127
Tabla 23. Frecuencias de los defectos en los rodamientos en la cuchilla 2 fecha 15-11-24	128
Tabla 24. Velocidades de giro y características mecánicas de los elementos que componen la cuchilla 2 fecha 20.12.24	129
Tabla 25. Frecuencia de los defectos en el eje y/o apoyos en la cuchilla 2 fecha 20-12-24	130
Tabla 26. Frecuencias de los defectos en los engranajes en la cuchilla 2 fecha 20-12-24	130

Tabla 27. Frecuencias de los defectos en los rodamientos en la cuchilla 2 fecha 20-12-24	131
Tabla 28. Velocidades de giro y características mecánicas de los elementos que componen el motor de cinta lenta fecha 15-11-24	132
Tabla 29. Frecuencia de los defectos en el eje y/o apoyos en el motor de cinta lenta fecha 15-11-24.....	133
Tabla 30. . Frecuencias de los defectos en los engranajes en el motor de cinta lenta fecha 15-11-24	133
Tabla 31. Frecuencias de los defectos en los rodamientos en el motor de cinta lenta fecha 15-11-24.....	134
Tabla 32. Frecuencia de fallo en las correas en el motor de cinta lenta fecha 15-11-24	134
Tabla 33. Velocidades de giro y características mecánicas de los elementos que componen el motor de cinta lenta fecha 20-12-24	135
Tabla 34. Frecuencia de los defectos en el eje y/o apoyos en el motor de cinta lenta fecha 20-12-24.....	136
Tabla 35. Frecuencias de los defectos en los engranajes en el motor de cinta lenta fecha 20-12-24	136
Tabla 36. Frecuencias de los defectos en los rodamientos en el motor de cinta lenta fecha 20-12-24.....	137
Tabla 37. Frecuencia de fallo en las correas en el motor de cinta lenta fecha 20-12-24	137
Tabla 38. Velocidades de giro y características mecánicas de los elementos que componen el motor de cinta rápida.....	138
Tabla 39. Frecuencia de los defectos en el eje y/o apoyos en el motor de cinta rápida	139
Tabla 40. Frecuencias de los defectos en los rodamientos en el motor de cinta rápida	139

1. INTRODUCCIÓN.

En el día a día de cualquier planta de producción, los gastos de mantenimiento pueden parecer simplemente otra línea en el presupuesto, oscilando entre el 15 y el 40% del costo total de los bienes que se fabrican. Pero hay mucho más detrás de estos números, ya que bajo el concepto de "mantenimiento" a menudo se incluyen gastos que no están directamente relacionados con reparaciones o labores de conservación, es más, algunas modificaciones que se hacen a las máquinas, impulsadas por cambios en las demandas del mercado o el lanzamiento de nuevos productos, terminan registrándose como costos de mantenimiento. Claramente, eso no es mantenimiento real.

A pesar de estas inconsistencias, no se puede negar que el mantenimiento tiene un peso importante y afecta directamente a la rentabilidad de cualquier planta a corto plazo.

Esto realmente hace pensar en lo crucial que es tener una buena gestión en esta área, no solo para evitar gastos innecesarios sino también para asegurar que la calidad y cantidad de la producción no se vean comprometidas. La verdadera raíz del problema, parece ser la falta de información clara y objetiva que ayude a los responsables a decidir cuándo y cómo es necesario realizar el mantenimiento de las máquinas.

Hoy en día, gracias a los avances tecnológicos e informáticos, esta percepción está cambiando. Se ha llegado a un punto en que es posible reducir o incluso eliminar reparaciones innecesarias, prevenir fallos graves antes de que ocurran y, en general, reducir los efectos negativos del mantenimiento sobre la rentabilidad de las plantas. En una planta en la que se empiece a usar herramientas de diagnóstico avanzadas y software de gestión del mantenimiento, no solo reduciremos los costos significativamente, sino que también mejoraremos la producción en términos de cantidad y calidad.

Es un mundo completamente diferente al de hace 20 o 30 años, entender el mantenimiento como una estrategia proactiva y no solo como una respuesta a los problemas cuando ya es demasiado tarde, es clave para el éxito y la sostenibilidad a largo plazo en la industria manufacturera.

Son estos los principios en los que se rige el presente trabajo. En este proyecto se nos plantea la mejora de la eficiencia y con ello la productividad de una planta de procesado de papel. Para ello se va a realizar la puesta en marcha de un plan de mantenimiento predictivo con el que se espera reducir las paradas no programadas y aumentar la planificación de las labores de mantenimiento, así como detectar indicios de posibles fallos y actuar sobre ellos antes de que acaben derivado en grandes averías que comprometan la producción.

1.1. DEFINICIÓN Y NECESIDAD DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO.

Es bien sabido que las empresas necesitan tener siempre ventajas competitivas que las hagan colocarse por encima de sus competidores.

Existen muchos tipos de ventajas competitivas, una de las principales es la de bajos costes de producción. En este sentido, una de las estrategias a la hora de buscar estos bajos costes y una de las más efectivas es invertir el mínimo tiempo y recursos en reparaciones que puedan entorpecer la producción. Es aquí donde cobra importancia un buen plan de mantenimiento, ya que los responsables de la gestión industrial son más conscientes del volumen de pérdidas tanto económicas y recursos malgastados que conlleva una mala gestión de este aspecto fundamental de la empresa.

La empresa “Serpac”, ubicada en Molina de Segura, en la Región de Murcia, en la que se va a realizar este plan de mantenimiento, se enmarca en el sector del procesado de papel, especializada en la distribución de cartón para soluciones de embalaje, cuenta con un centro de corte de precisión y en los últimos años ha experimentado un crecimiento notable.

El presente proyecto se enmarca en la finalización de estudios del grado en ingeniería mecánica en la Universidad Miguel Hernández de Elche y servirá, como precedente para la creación de un plan de mantenimiento predictivo que acabará abarcando todo el órgano productivo de la empresa.

1.2. TIPOS DE MANTENIMIENTO.

Para entender la necesidad de un programa de mantenimiento predictivo es necesario entender los planes de mantenimiento más usados hasta la fecha. Las plantas industriales normalmente emplean dos tipos de mantenimiento: mantenimiento correctivo o funcionamiento hasta el fallo y mantenimiento preventivo. Hoy en día otras filosofías de mantenimiento, que nos permiten anticiparnos a las averías, están empezando a coger fuerza debido al importante ahorro tanto económico como de recursos que pueden ofrecer. Estos programas son el mantenimiento predictivo y aunque menos usado el mantenimiento defectivo. A continuación, se explican más detalladamente todos estos programas de mantenimiento.

1.2.1. MANTENIMIENTO CORRECTIVO O FUNCIONAMIENTO HASTA EL FALLO.

El principio del mantenimiento correctivo es relativamente sencillo: reparar el equipo cuando se avería. Dado que las reparaciones aparecen en cualquier momento, es un buen método para los equipos que no son esenciales para las operaciones o que tienen un coste menor.

Por otro lado, si este tipo de mantenimiento no se utiliza de forma estratégica, puede dar lugar a paradas imprevistas cuando falle un equipo crítico. En otras palabras, una estrategia basada únicamente en el mantenimiento correctivo implica un mayor tiempo de inactividad y mayores costes de mantenimiento.

Este tipo de mantenimiento en el que las máquinas se arreglan una vez averiadas se trata de la manera más costosa de gestionar el mantenimiento siendo la gestión más cercana al no-mantenimiento. Muy pocas plantas serían capaces de basar todo su plan de mantenimiento en este tipo de organización, ya que las paradas por inactividad acabarían engrosando demasiado los costes por averías. Aunque también encontraremos situaciones en la que nos veamos obligados a actuar de esta manera, ya que es imposible anticiparse

a todos los fallos y averías, la base del desarrollo de los planes de mantenimiento se basa en usar este método lo menos posible.

Además de los tiempos de inactividad otros gastos derivados de este tipo de mantenimiento son los asociados a las grandes cantidades de repuestos en inventario, el coste de la mano de obra y la baja capacidad de producción. Otros problemas pueden venir derivados de la dependencia de personal y repuestos, ya que en todo momento los mecánicos encargados de las diferentes averías deben saber identificar rápidamente el problema y como solucionarlo o la dependencia de los proveedores que se ve agravada cuando el tiempo que una máquina está parada depende del tiempo que tardan en llegar los repuestos.

Al no existir una protección y un cuidado de los equipos de manera preventiva, aumenta la posibilidad de que se produzcan averías o fallos graves, lo que repercute negativamente en la productividad y el grado de severidad de las averías, ya que una ligera anomalía detectada a tiempo puede evitar un gran problema si es atendida.

1.2.2. MANTENIMIENTO PREVENTIVO.

El mantenimiento preventivo industrial es una estrategia que busca evitar fallas y asegurar la operatividad de las máquinas y equipos en la industria. Es una herramienta fundamental para garantizar la seguridad de los trabajadores y aumentar la eficiencia productiva. Se trata de una serie de actividades planificadas y programadas con el objetivo de prevenir fallas, reducir el tiempo de inactividad y aumentar la vida útil de los equipos.

Se centra en la realización de inspecciones periódicas, limpieza, ajustes y reemplazo de piezas en los equipos antes de que se produzcan fallas. De esta forma, se evitan costosas reparaciones y se asegura la continuidad de la producción. El mantenimiento preventivo industrial es una práctica esencial para garantizar la eficiencia y productividad de una empresa. La realización de mantenimiento preventivo de forma regular puede ahorrar tiempo y dinero a largo plazo, y asegurar que los equipos y maquinarias estén en óptimas condiciones de trabajo. No se trata solo de reparar lo que está roto, sino de prevenir el

deterioro y el desgaste de los equipos y maquinarias. Para llevar a cabo el mantenimiento preventivo en la industria, es necesario seguir una serie de pasos clave:

Planificación: se debe crear un plan de mantenimiento que incluya la programación de inspecciones y mantenimiento regular, así como la identificación de piezas críticas y su frecuencia de reemplazo.

Inspección: se deben realizar inspecciones periódicas para detectar piezas desgastadas o en mal estado y programar su reemplazo antes de que fallen.

Reemplazo: se deben reemplazar las piezas desgastadas antes de que fallen para evitar tiempos de inactividad imprevistos y/o averías mayores derivadas de la rotura total de estas piezas.

Registro: se debe llevar un registro detallado de las inspecciones, reparaciones y reemplazos realizados para evaluar la efectividad del plan de mantenimiento y realizar mejoras continuas.

La práctica de este tipo de mantenimiento es un aspecto importante que las empresas pueden implementar para proteger su inversión y garantizar la eficacia de sus equipos y maquinarias. A continuación, se explican algunas de las ventajas anteriormente mencionadas de aplicar el mantenimiento preventivo:

Reducción de costes: evitaremos gastos innecesarios derivados de reparaciones y reemplazos de equipos, ya que permite detectar problemas antes de convertirse en averías mayores.

Aumento de la eficiencia: Garantizando que los equipos y maquinarias funcionen correctamente aumentamos la capacidad productiva de la empresa.

Aumento de la vida útil: Podemos evitar el desgaste prematuro de los equipos y maquinaria manteniéndolos en óptimas condiciones.

Mejora de la seguridad: Permite reducir el riesgo de accidentes laborales normalizando los procesos que ayudan a identificar y corregir posibles riesgos de seguridad.

Mejora de la calidad: El mantenimiento preventivo ayuda a evitar fallos en la producción aumentando así la calidad del producto final.

En resumen, el mantenimiento preventivo en la industria es crucial para garantizar la fiabilidad, eficiencia y seguridad de los equipos y maquinarias utilizados en los procesos productivos. Al realizar inspecciones periódicas, ajustes, lubricación y reemplazo de piezas desgastadas, se pueden evitar costosos paros de producción, reparaciones urgentes y accidentes laborales.

1.2.3. MANTENIMIENTO PREDICTIVO.

El mantenimiento predictivo consiste en la inspección periódica y a intervalos regulares tomando acción cuando sea necesario para prevenir las fallas o evitar las consecuencias de estas según condición, incluyendo tanto las inspecciones objetivas (con instrumentos) como subjetivas (con los sentidos). Es una forma de mejorar la productividad, la calidad del producto y sobre todo la efectividad de las plantas de producción.

La termografía, el análisis de vibraciones, el análisis de lubricantes, entre otras técnicas de mantenimiento predictivo permiten hallar anomalías en el funcionamiento de los mecanismos que componen las máquinas, anticipándonos así a las posibles averías en las que podrían derivar de estas anomalías. Pero el mantenimiento predictivo no es solo esto, se trata de una filosofía de trabajo en la que el objetivo es conseguir la mayor eficiencia posible mediante el uso optimizado de los recursos con la intención de prevenir los posibles fallos y averías.

Incluir un plan de mantenimiento predictivo en la gestión del mantenimiento optimiza la disponibilidad de la maquinaria y reduce en gran medida los costes de mantenimiento. Además, también mejora la calidad del producto, la productividad y en definitiva la rentabilidad de las plantas en las que se incorpora.

Para la implantación de un sistema de mantenimiento predictivo resulta imprescindible establecer un programa y una organización que aseguren el seguimiento constante y riguroso de los elementos que componen la empresa. Aunque el mantenimiento predictivo se podría aplicar a todos los ámbitos de la empresa, como sistemas eléctricos, sistemas de ventilación y acondicionamiento, etc. Nosotros nos vamos a centrar en el aspecto mecánico, del cual depende directamente la producción.

Es posible que el mantenimiento predictivo se pueda llegar a confundir en algún momento con el preventivo debido a que ambos pretenden anticiparse a los fallos mecánicos. Sin

embargo, el mantenimiento predictivo lleva esta noción un paso más allá. Pongamos que hablamos de las máquinas concretas sobre las que haremos nuestro estudio predictivo. Si le aplicáramos técnicas de mantenimiento preventivo, utilizaríamos información general dada por el fabricante de la máquina para calcular aproximadamente cuándo convendría llevar a cabo el mantenimiento normal. Así sabríamos más o menos cuándo sería preciso hacer el mantenimiento.

En cambio, el mantenimiento predictivo es sustancialmente más preciso requiriendo un mayor volumen de datos. Por tanto, se combina la información relativa a la vida útil prevista de dicho modelo con los datos históricos sobre el rendimiento particular de esa unidad. Teniendo en cuenta estos datos complementarios, los modelos de mantenimiento predictivo generan rápidamente una serie de pronósticos de gran valor con los que podremos saber con certeza cuándo se producirá una anomalía en el sistema. Además, en el mantenimiento predictivo, las reparaciones planificadas se efectúan justo antes de que sean necesarias (en lugar de realizarse según un calendario general). Por tanto, como no se hacen reparaciones innecesarias, se mantiene el presupuesto bajo control.

1.2.4. MANTENIMIENTO PROACTIVO.

El mantenimiento proactivo se distingue por ser más que un simple plan o programa; es una filosofía de trabajo enfocada en detectar y prevenir la causa raíz de los fallos antes de que estos ocurran. Esta aproximación es esencial para el desarrollo de programas de mantenimiento que no solo previenen, sino que también predicen problemas antes de que se manifiesten.

El objetivo del mantenimiento proactivo es efectuar intervenciones de mantenimiento únicamente cuando son necesarias, basándose en un análisis meticuloso de datos. Este enfoque permite a las organizaciones identificar las causas de los fallos en las máquinas, resolver problemas antes de que se transformen en averías significativas, extender la vida útil de la maquinaria y reducir las paradas no programadas. Los pilares del mantenimiento proactivo son: la recolección inicial de datos, el seguimiento constante de tendencias y el análisis de los datos para implementar medidas correctivas después de detectar indicios

de fallo. De esta manera, el mantenimiento proactivo funciona como un nexo que fortalece y unifica los programas de mantenimiento existentes.

Para llevar a cabo un mantenimiento proactivo efectivo, es crucial realizar tareas preventivas esenciales, como el cambio de aceite y la limpieza de filtros, que garanticen el buen funcionamiento de las máquinas. El monitoreo constante es fundamental para actuar antes de que ocurran los fallos. Esto se puede alcanzar a través de técnicas de mantenimiento predictivo, estableciendo parámetros normales para la temperatura, vibración y sonido, y respondiendo adecuadamente al detectar cualquier anomalía que sugiera un fallo inminente. Es igualmente importante subrayar la importancia del mantenimiento correctivo dentro de cualquier programa de mantenimiento, puesto que sería inútil detectar comportamientos anormales en las máquinas, indicativos de un posible fallo, si no se actúa para corregirlos y evitarlos.

Como se ha mencionado anteriormente, el mantenimiento proactivo es una filosofía de trabajo, por lo tanto, no bastará con llevar a cabo las tareas programadas para el buen funcionamiento de las máquinas y evitar los fallos, sino que toda la plantilla de la empresa y en especial el personal de mantenimiento deberá conocer y aplicar esta forma de actuar para conseguir el objetivo de adelantarnos a los fallos.

1.3. METODOLOGÍAS DE MANTENIMIENTO.

En el mundo industrial, las metodologías de mantenimiento son fundamentales para garantizar la eficiencia operativa y la seguridad. Se considera la importancia de estos métodos desde la perspectiva de quien tiene la responsabilidad de mantener operativa una planta industrial. Estas prácticas están cuidadosamente diseñadas para minimizar fallos y prolongar la vida útil de equipos y sistemas, asegurando que todo funcione en condiciones óptimas.

La implementación efectiva de estas metodologías de mantenimiento puede marcar una diferencia sustancial. No solo previenen interrupciones inesperadas que podrían impactar severamente la producción y las finanzas, sino que también promueven la optimización de recursos. Esto, a su vez, se traduce en una reducción de costos operativos y en un incremento de la competitividad en el mercado. Un enfoque proactivo en el

mantenimiento es, por lo tanto, crucial; no solamente mantiene la maquinaria en movimiento, sino que también refuerza la posición de la empresa en un entorno industrial cada vez más competitivo. Actualmente, las dos metodologías de mantenimiento más recurridas son:

1.- Mantenimiento Productivo Total (TPM, por sus siglas en inglés).

Se trata de filosofía de mantenimiento que busca mejorar la eficiencia de los equipos de producción en una fábrica o instalación industrial. El objetivo principal del TPM es aumentar la productividad minimizando el tiempo de inactividad del equipo, lo cual se logra a través del mantenimiento preventivo y la implicación de todos los empleados, desde la alta gerencia hasta los operadores de piso.

2.- Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés de "Reliability Centered Maintenance").

Estrategia de mantenimiento utilizada en la ingeniería industrial que se centra en la prevención de fallos y en garantizar que los sistemas y máquinas operen de forma fiable y eficiente dentro de su contexto operativo. Es particularmente útil en industrias donde la seguridad y la confiabilidad son críticas, como la aviación, la manufactura, y las plantas de energía.

La idea principal es conseguir mantener la función que realizan las máquinas, más que las propias máquinas. Al fin y al cabo, la productividad de una planta está en la funcionalidad de sus equipos. Esto implica que no se busca que los equipos estén como nuevos, sino que cumplan bien su función. Para esto es muy importante conocer al detalle la función de la máquina, así como los factores que impiden que la cumpla.

El RCM es especialmente efectivo en entornos complejos y de alto riesgo porque se centra en la prevención de fallos y en la optimización de la seguridad y la eficiencia operativa. Es una metodología que requiere un análisis profundo y detallado, pero que puede proporcionar beneficios significativos en términos de confiabilidad y costos operativos reducidos.

2. ANTECEDENTES.

La planta objeto de estudio, tradicionalmente ha producido en un solo turno. El mantenimiento que se ha llevado a cabo hasta ahora ha sido casi siempre de carácter correctivo, a excepción de alguna máquina a la que se le ha llegado a hacer un plan preventivo. Sin embargo, como consecuencia de un aumento de la producción, la gerencia de la empresa se ha planteado la posibilidad de aumentar el número de horas de producción, trabajando dos turnos de 8 horas de manera temporal. Es precisamente en estas circunstancias, cuando cobra especial relevancia un buen sistema de mantenimiento que nos permita anticiparnos a las averías ya que, en estas condiciones, cualquier fallo en una máquina que paralice o ralentice la producción repercutirá mucho más en la eficiencia de la planta.

Es por esto por lo que se requiere un plan de mantenimiento que evite, en la medida de lo posible, las paradas no programadas al menos en las máquinas que actúan como cuello de botella. Máquinas, en cuya ausencia la producción se paralizaría o se reduciría muy significativamente.

Los pasos que se seguirán en la realización de este plan de mantenimiento predictivo son:

- Auditoria de mantenimiento.
- Descripción de los equipos y recabación de información técnica.
- Selección del sensor.
- Medidas de campo y análisis.
- Periodicidad de medida.
- Informes de medidas.
- Ordenes de trabajo y retroalimentación.

2.1 AUDITORIA DE MANTENIMIENTO.

El primer paso para seguir antes de tomar cualquier decisión acerca de la implementación de un PMP (Plan de Mantenimiento Predictivo) es realizar una auditoría del departamento

con el objetivo de conocer sus necesidades, así como los medios humanos y técnicos de los que dispone.

Siguiendo lo mencionado, durante la auditoría realizada hemos podido advertir que el departamento de mantenimiento de la empresa cuenta con una ingeniera mecánica y un mecánico, cualificados, pero no numeroso. Al tratarse de un departamento con personal reducido presenta una alta flexibilidad y facilidad de adaptación ante nuevas técnicas o ante la implantación de un nuevo sistema de mantenimiento. En cuanto a recursos económicos y tecnológicos, en este departamento se ha invertido siempre en función a las necesidades marcadas por las diferentes averías y sus correspondientes reparaciones, sin embargo, se conoce la necesidad de una inversión en herramientas que permitan a este departamento ser más proactivo.

En una reunión en la que estaba presente el gerente se habló sobre esta idea de tratar de anticiparse (en la medida de lo posible) a las averías de los elementos más críticos, llegando a la conclusión de que es conveniente probar este sistema de mantenimiento en las máquinas más críticas, estudiar el rendimiento y beneficio de este plan de mantenimiento.

2.2. DIAGRAMA DE FLUJOS.

En el diagrama de flujos, se ha separado por colores las diferentes etapas por las que pasa el papel desde que llega a las bobinas hasta convertirse en los palés de papel cortado y flejado o bien, rebobinado en bobinas con las dimensiones y especificaciones demandadas por el cliente.

- Indica las bobinas de papel que van a pasar por las máquinas resmadoras que cortarán el papel en las dimensiones indicadas y lo apilarán
- Indica las bobinas que van a pasar por las máquinas rebobinadoras, que rebobinan el papel según las medidas indicadas por el cliente o según las dimensiones admitidas en las máquinas resmadoras.
- Indica los palés de papel cortado y apilado procedente de las resmadoras.
- Indica los palés de papel que han abandonado la máquina flejadora conocida como Thimon como producto terminado.

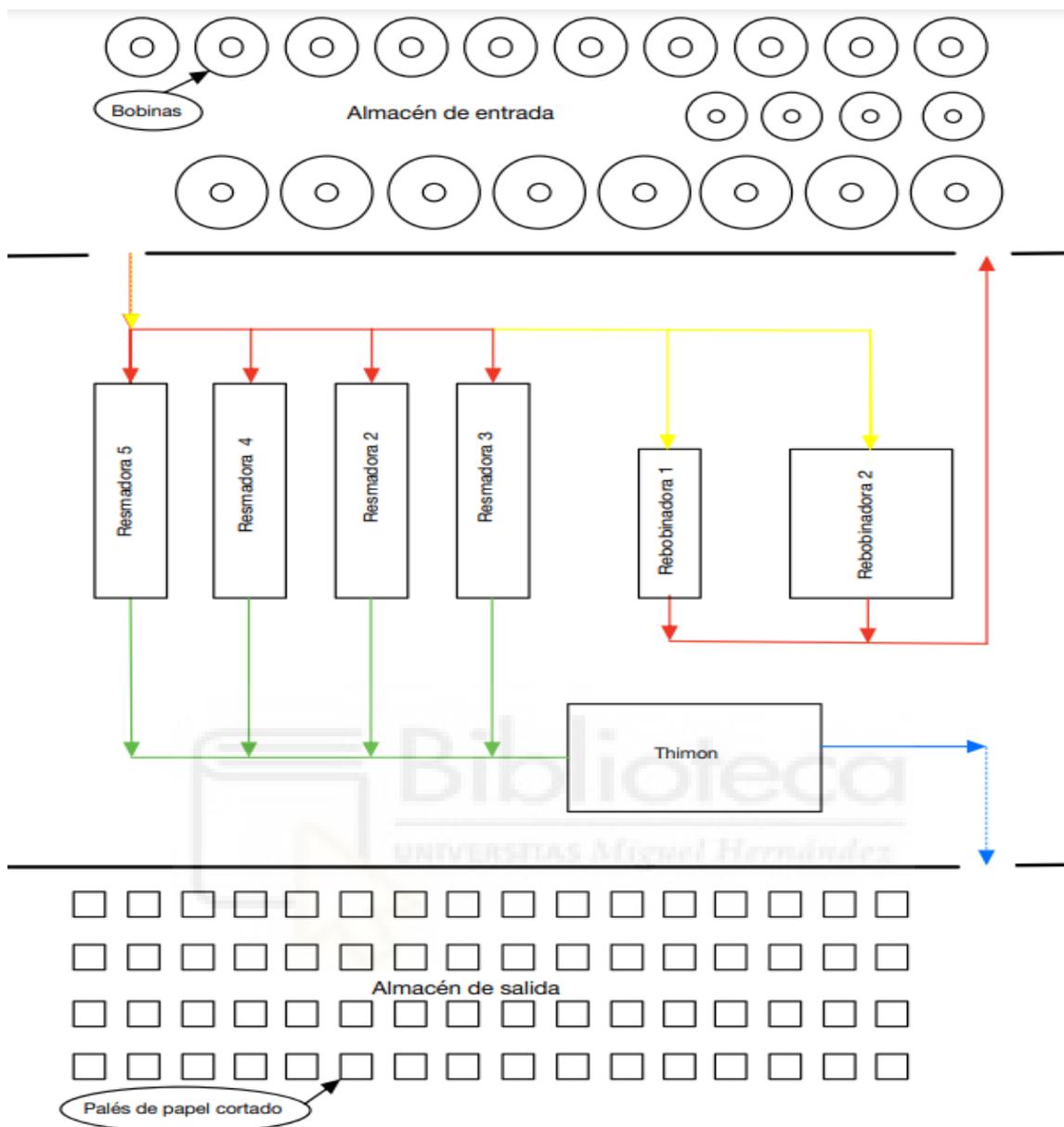


Ilustración 1. Diagrama de flujo de la planta de producción (imagen creada como representación visual)

Se puede observar que el grueso de la producción recae en las máquinas conocidas como resmadoras y la flejadora Thimon por la que pasa todo el producto terminado.

2.3. HISTÓRICO DE AVERÍAS.

Se ha realizado en este proyecto un estudio del histórico de averías con la intención de decidir las máquinas de la empresa donde puede ser más útil o necesario realizar este tipo de mantenimiento. Esto puede estar influenciado por el número de averías, la seguridad, el tiempo invertido en las reparaciones o su criticidad.

En el Anexo I se muestran los valores correspondientes a todas las averías y reparaciones con carácter correctivo o preventivo. Estas, están filtradas a partir de un listado de las tareas de mantenimiento que han sido realizadas en la empresa desde el año 2020.

En la tabla 1 se muestran los datos de las averías de los grupos correspondientes al cabezal de corte y rebobinado de las resmadoras, y las correspondientes al horno de la flejadora Thimon por ser estos los grupos más importantes en las máquinas objeto de estudio de este trabajo. En este histórico se puede apreciar que el grueso de las averías en las máquinas resmadoras se producen en las partes de las máquinas referidas al cabezal de corte y el desbobinado.

Tabla 1. Averías en el cabezal de corte y desbobinado de las resmadoras y horno de la Thimon

RECURSO	GRUPO	TIPO	BLOQUEANTE	ESTADO	TIEMPO (mins)
RM-2	DESBOBINADO	MEJORA	NO	PENDIENTE	
RM-2	DESBOBINADO	CORRECTIVO	NO	PENDIENTE	
RM-2	CABEZAL DE CORTE	PREVENTIVO	NO	PENDIENTE	
RM-2	CABEZAL DE CORTE	PREVENTIVO	SI	SOLUCIONADO	
RM-2	DESBOBINADO	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-2	DESBOBINADO	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	
RM-2	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO		SOLUCIONADO	
RM-2	DESBOBINADO	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	
RM-2	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	
RM-2	DESBOBINADO	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-2	CABEZAL DE CORTE	PREVENTIVO	SI	SOLUCIONADO	
RM-2	DESBOBINADO	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	25.0
RM-2	DESBOBINADO	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	180.0
RM-2	DESBOBINADO	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	

RECURSO	GRUPO	TIPO	BLOQUEANTE	ESTADO	TIEMPO (mins)
RM-2	CABEZAL DE CORTE	PREVENTIVO	SI	SOLUCIONADO	400.0
RM-2	CABEZAL DE CORTE	PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	180.0
RM-2	CABEZAL DE CORTE / COMPUERTA	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	60.0
RM-2	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	480.0
RM-2	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	30.0
RM-2	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-2	DESBOBINADO	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	220.0
RM-2	DESBOBINADO	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	180.0
RM-2	CABEZAL DE CORTE			SOLUCIONADO	720.0
RM-2	CABEZAL DE CORTE	PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-3	CABEZAL DE CORTE	AJUSTE	SI	SOLUCIONADO	30.0
RM-4	CABEZAL DE CORTE	PREVENTIVO	SI	SOLUCIONADO	280.0
RM-4	DESBOBINADO	CORRECTIVO	NO	PENDIENTE	
RM-3	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	NO	PENDIENTE	
RM-4	CABEZAL DE CORTE	PREVENTIVO	SI	EN PROCESO	
RM-4	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-4	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-4	DESBOBINADO	CORRECTIVO		SOLUCIONADO	
RM-3	CABEZAL DE CORTE	PREVENTIVO	SI	SOLUCIONADO	
RM-3	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO		SOLUCIONADO	
RM-3	DESBOBINADO	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-3	CABEZAL DE CORTE - OPERARIO	-		SOLUCIONADO	
RM-3	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	30.0
RM-3	CABEZAL DE CORTE	PREVENTIVO	SI	SOLUCIONADO	400.0
RM-3	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	90.0
RM-3	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	60.0

RECURSO	GRUPO	TIPO	BLOQUEANTE	ESTADO	TIEMPO (mins)
RM-3	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	200.0
RM-3	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-5	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	NO	PENDIENTE	
RM-5	CABEZAL DE CORTE	PREVENTIVO	SI	SOLUCIONADO	
RM-5	CABEZAL DE CORTE	PREVENTIVO	SI	SOLUCIONADO	
RM-5	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO		SOLUCIONADO	
RM-5	CABEZAL DE CORTE	PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	220.0
RM-5	CABEZAL DE CORTE	INSTALACION	NO	SOLUCIONADO	180.0
RM-5	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-5	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	
THIMON	HORNO	PREVENTIVO	SI	SOLUCIONADO	30.0
THIMON	HORNO	PREVENTIVO	SI	SOLUCIONADO	120.0
THIMON	HORNO	PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	360.0
THIMON	HORNO	PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	560.0
THIMON	HORNO	PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	
THIMON	HORNO	PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	

3. OBJETIVOS.

El objetivo principal de este Trabajo Final de Grado será crear un sistema de mantenimiento predictivo para las máquinas que actúan como cuello de botella en una planta de procesamiento de papel y cartón.

Después de haber estudiado detenidamente la cadena cinemática del proceso de fabricación podremos asegurarnos que la máquina flejadora "Thimon" y las máquinas resmadoras se tratan de las únicas máquinas cuya ausencia paralizaría la producción en

la planta ya que la "Thimon" es una compleja máquina que no solo fleja los palés de material ya cortado y apilado, sino que pesa, dimensiona y a partir de estos datos clasifica los pales destinados a los diferentes clientes. Por otro lado, las máquinas conocidas como "resmadoras" van a suponer el principal órgano productivo de la empresa, convirtiendo el material bruto (las bobinas de papel) en el producto final (papel cortado a medida y apilado).

Otro de los objetivos que se plantean en este proyecto es el de mostrarle a los encargados del mantenimiento en la empresa las ventajas que tiene este tipo de mantenimiento y a que a raíz de esto se consiga implantar este plan para el resto de las máquinas y en general toda la planta de producción.

Con la implantación completa y correcta de este plan de mantenimiento predictivo se consigue:

- 1.- **Reducir el número de paradas no programadas** derivadas de averías que entorpecen la producción o el flujo de palés, aumentando así la disposición de las máquinas.
- 2.- **Mejorar la planificación de los trabajos**, utilizando los datos que nos proporcionan los análisis predictivos, concretando estados de la maquina y de sus elementos.
- 3.- **Mejora de la calidad del producto final**, debido a que al ocurrir menos fallos habrá menos probabilidades de que el producto final tenga algún defecto.
- 4.- **Mejora de la seguridad e higiene**, ya que el trabajo estará mejor planificado y con tiempo suficiente para tomar todas las medidas necesarias para conservar la salud y seguridad de los operarios.

La combinación de todos estos objetivos nos dará como resultado una mejora en la eficiencia general de la maquinaria, lo que le retribuirá a la empresa beneficios económicos.

4. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS EQUIPOS.

A continuación, se mencionan los criterios que se han seguido para la elección de los equipos sobre los que se va a implantar el plan de mantenimiento.

- Influencia en la productividad del resto de la planta.
- Seguridad operativa y de los operarios.
- Tiempo invertido en las reparaciones.
- Coste de las reparaciones.
- Disponibilidad de repuestos en el almacén.

Teniendo en cuenta estos criterios, las máquinas que van a ser objeto de estudio son la resmadora 4, ya que es la única de la planta capaz de admitir ciertos anchos de bobina por su gran tamaño y la flejadora "Thimon", porque todo el producto final pasa por ella.

En este apartado se hará una breve descripción de los diferentes equipos que siguiendo los criterios anteriormente mencionados he decidido incluir en este PMP.

4.1. RESMADORAS.

Aunque las diferentes máquinas resmadoras se hayan ido adquiriendo progresivamente los conjuntos mecánicos que las componen son prácticamente iguales, así como las funciones que realizan. Debido a su complejidad, para el análisis de estas máquinas las dividiremos en cinco subconjuntos mecánicos.

Grupo A (Desbobinaje): En este subconjunto se coloca la bobina y se eleva mediante pistones hidráulicos para posteriormente hacerla girar hacia las cintas que en grupos posteriores transportarán el papel.

Grupo B (Entrada): En esta parte de la máquina se hace pasar el papel proveniente de la bobina por un conjunto de rodillos que, aplicando tensión al papel, consiguen eliminar la forma curva con la que sale de la bobina. En esta parte además encontramos enderezadores móviles que permiten corregir la posición del papel y centrarlo en función

de las necesidades del ancho de bobina y las dimensiones finales específicas para cada cliente. También tenemos un empalmador que permite unir líneas de papel cuando se cambia una bobina para así no interrumpir el trabajo.

Grupo C (Corte): En esta parte de la máquina se producirán el corte tanto longitudinal para adaptar el ancho del papel como transversal ambos en función de las especificaciones del cliente. El corte longitudinal se consigue mediante unas cuchillas circulares que cortan la línea del papel de manera ininterrumpida y a la velocidad lineal de la cinta que transporta el mismo. Acto seguido se hace pasar el papel por unas cuchillas acopladas a dos rodillos situados encima y bajo el papel que de manera sincronizada realizan el corte transversal a modo de cizalla.

Grupo D (Salida): Esta sección de la máquina se transporta el papel desde la salida de las cuchillas hasta la zona de apilado. En esta zona, mediante el paso por varias cintas con diferente velocidad lineal, el papel se coloca superpuesto para facilitar el posterior apilado. En esta sección también se descartan los rechazos de los cortes, ya que cuando se cambia de bobina, al tener que pasar manualmente el papel por varios de los rodillos hasta llegar al grupo de corte, los primeros cortes de papel deben ser rechazados debido a arrugas que derivan en la falta de calidad. También se rechazan los recortes sobrantes del corte longitudinal que son aspirados hacia la zona de reciclado.

Grupo E (Apilado): Esta es la sección final de la máquina, en esta zona el papel ya cortado es apilado sobre un palé. Se alinea perfectamente uno sobre otro mediante unos topes metálicos. En esta zona tenemos unos sensores de distancia muy precisos y una mesa elevadora que sube o baja el pale para permitir que se apilen las hojas.

4.2. THIMON.

Como se ha mencionado anteriormente, se trata de una compleja máquina flejadora en la que también podremos distinguir nueve partes bien diferenciadas.

Centrado: En esta sección se centrará el palé en la cinta mediante unos sensores de distancia y unos empujadores, estos sensores de distancia miden el ancho del palé centrado y un sensor colocado en el final de carrera del transporte del centrado permite medir la longitud de este. Esto se debe a que los pales serán de diferente tamaño dependiendo del cliente. En esta parte hay también una báscula que pesa el palé con su contenido.

TOP-PAL: En esta parte de la máquina se coloca un trozo de plástico retráctil en la parte superior de la columna de papel alineado sobre el palé. El TOP-PAL también está provisto de sensores de distancia que permiten calcular la altura del palé

DRA-PAL: En esta parte se rodea la columna de papel y el palé de plástico retráctil.

Plegadora: Se cierran unas compuertas que en la parte de contacto con el plástico tienen una resistencia a alta temperatura recubierta de fibra de vidrio que corta el plástico una vez que este ha rodeado por completo la pila de papel y a su vez empalma los extremos que se han separado tras el corte.

Retorno: Se encarga de mover el DRA-PAL para que el plástico rodee al papel y devolverlo a su posición de espera una vez ha colocado el plástico.

Devanadora: En esta parte de la máquina se colocan las bobinas de plástico retráctil. Tendremos dos devanadoras, una a cada lado de la máquina, el plástico de cada una es unido por la resistencia cubierta por una capa de fibra de vidrio previamente mencionada que pertenece a la plegadora.

Horno: En esta parte de la máquina, los palés cubiertos del plástico retráctil se calientan haciendo que este se pegue al contorno del palé y de su contenido. Se trata de la parte más crítica de la máquina, ya que, al estar trabajando con papel, un material altamente inflamable, es necesario controlar todos los factores relacionados tanto con la apertura y cierre de las compuertas como la temperatura que se alcanza y el tiempo que permanecen los palés en el interior.

Prensa: Una vez el palé ha abandonado el horno, el plástico sigue siendo maleable y es en este momento cuando una prensa comprime la parte superior del palé ya flejado haciendo que el plástico de la parte superior que de otra manera quedaría holgado sobre las últimas hojas de papel se amolde completamente al contorno de estas.

Transportador de cinta modular: En esta última sección, el palé ya flejado pasa por una cinta transportadora que le hace avanzar hasta la posición de recogida.

Para esta máquina la ficha técnica que nos ofrece el fabricante detalla muy bien todas las actividades a desarrollar para llevar a cabo un correcto mantenimiento preventivo. Así pues, nos centraremos en el monitorizado de la parte más crítica de la máquina, que como ya se ha mencionado antes y por razones de seguridad es el horno.

5. INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA Y SUS CARACTERÍSTICAS.

En este apartado se mencionan los aparatos que usaremos para el monitorizado de los elementos críticos de las máquinas que incluiremos en este plan de mantenimiento.

5.1. ACELERÓMETRO.

Para poder localizar el mayor número de defectos posible se ha considerado conveniente usar un acelerómetro triaxial, que nos permite recoger el espectro de vibración en tres ejes diferentes a la vez, dos axiales y uno radial al eje de giro del motor.

Un acelerómetro inalámbrico es un dispositivo que convierte el movimiento o vibración en una señal de voltaje que luego transmite a un receptor usando un protocolo inalámbrico. Los acelerómetros inalámbricos son usados en la industria para evitar el uso de cables que pueden ser caros o difíciles y peligrosos de instalar. WiSER 3x es un acelerómetro Inalámbrico de 3 ejes especialmente diseñado para el análisis de vibraciones, compatible con cualquier analizador de vibraciones disponible en el

mercado. WiSER 3x envía datos de vibración de 3 ejes + 1 canal adicional de forma simultánea. Además, WiSER 3x es un acelerómetro inalámbrico de ultra bajo ruido con un ancho de banda de 10 kHz que supera las características de la mayoría de los acelerómetros convencionales.

Table 2. Especificaciones técnicas

MEDICIÓN	
Sensor interno	Sensor MEMS de bajo ruido
Sensibilidad (X, Y, Z)	100 mV/g
Rango de frecuencias \pm 3dB	0.5 Hz a 10 kHz
Rango Dinámico	\pm 20 g
Frecuencia de resonancia	>25 kHz
Tasa de muestreo	48 kHz
ADC	24 bits
Ruido Espectral (10 Hz)	67 μ g/ \sqrt Hz
CONECTIVIDAD Y SOFTWARE	
Protocolo inalámbrico	Wi-Fi 802.11 (No necesita receptor)
Dispositivos compatibles	Dispositivos iOS, Android, Windows 10 y WURX3
Software Compatible	DigiVibeMX®, WiSER™VIBE PRO
Distancia de operación	15 m línea de vista
ENERGÍA	
Fuente de alimentación	2 baterías recargables Li-Ion CR123 3.7 V 800mAh
Duración de batería	6 h uso continuo Modo de espera 30 seg después de no detectar conexión
Adaptador AC	Entrada 100 a 240 V CA, 50/60 Hz Salida 5 V CD, 2A
Conectores	Conector LEMO 5 pines Centro de carga, sensor óptico, acelerómetro de referencia
DIMENSIONES Y FABRICACIÓN	
Dimensiones (l \times a)	99 \times 49 mm con base mag. / 82 \times 48.9 mm sin base mag.
Resistencia a impactos	5,000 g
Peso	425 gramos base mag. / 250 gramos sin base mag.
Protección	Hermético a presión de polvo y agua IP67
Material de carcasa	ABS, acero inoxidable
Fijación	Prisionero 1/4-28 UNF
CONDICIONES AMBIENTALES	
Temperatura de Operación	-20 a 60 °C (-4 a 140 °F)
Temperatura de almacenamiento	-20 a 85 °C (-4 a 185 °F)

5.2. SOFTWARE DE ANÁLISIS DE VIBRACIONES: WiSER Vibe.

WiSER Vibe es una aplicación multiplataforma compatible con dispositivos iOS y Android, que permite transformar smartphones o tablets en analizadores de vibraciones portátiles. Esta herramienta se combina con acelerómetros inalámbricos, como el WiSER 3X y Phantom, facilitando el diagnóstico predictivo de maquinaria sin necesidad de cables. Para el análisis de los espectros de vibraciones en el ordenador usaremos la versión para Windows, con el nombre de DigivibeMX Phantom

El software está diseñado para cumplir con los estándares de mantenimiento predictivo en la industria, garantizando una medición precisa y un análisis avanzado de señales de vibración, clave para prevenir paradas no programadas y reducir costos operativos.

Tanto el acelerómetro como el software se tratan de herramientas muy potentes en el estudio de vibraciones para el análisis predictivo, más aún cuando se aplica en máquinas rotativas como la nuestra. Aunque el software cuenta con multitud de aplicaciones como hemos comentado anteriormente en nuestro estudio y dado que no contaremos con el equipo durante un periodo indefinido, vamos a usarlo únicamente para la toma de medidas de los diferentes puntos de interés en la máquina.

5.3. CÁMARA TÉRMICA.

Contaremos además con un smartphone CAT S60 con cámara térmica que nos permitirá tomar fotos y videos en alta resolución de las partes de las máquinas susceptibles de variar su temperatura debido al roce con otros elementos o en los cuadros eléctricos donde nos va a permitir detectar fugas eléctricas o deterioros de los cables aislantes, problemas que pueden tener graves consecuencias tanto para el personal como para las máquinas.

El teléfono inteligente S60 ha sido diseñado para su uso en exteriores y dispone de características para funcionar en los entornos más exigentes. Equipado con una cámara térmica FLIR integrada, el S60 proporciona imágenes térmicas claras y varios sensores de puntos que le permitirán precisar retroactivamente una temperatura de la imagen.

Cuenta con la certificación de resistencia más alta del sector, IP68, por lo que puede soportar profundidades de hasta 5 metros durante 60 minutos además de tomar fotografías y grabar vídeo bajo el agua. Admite una pantalla táctil compatible con guantes y dedos húmedos. El cristal es resistente a los arañazos, el polvo y las caídas desde una altura de 1,8m.



Ilustración 2. Cámara térmica (imagen obtenida de la web zofti)

6. ELEMENTOS MONITORIZADOS

A continuación, se describen los diferentes elementos que monitorizaremos para conocer el estado de las máquinas de las que forman parte y las frecuencias asociadas a los fallos en los elementos que las componen.

6.1. ENGRANAJES.

Los engranes son elementos mecánicos que se caracterizan por generar gran cantidad de frecuencias vibratorias propias, dificultando su análisis espectral. Estas frecuencias vibratorias están asociadas con los ejes de giro y sus armónicos, el engrane entre dientes y sus armónicos, bandas laterales de la frecuencia de engrane, frecuencias de fallo de los rodamientos y frecuencias del equipo que lo acciona y del equipo accionado.

6.1.1. FRECUENCIAS PROPIAS DE UN ENGRANAJE.

Frecuencias de engrane (GMF). Son propias de cada engranaje y aparecen en el espectro de frecuencia independientemente del estado del engrane. Su amplitud depende significativamente de la carga en el momento de la lectura. Se calculan mediante la siguiente fórmula:

$$GMF = Z_p \times RPM_p = Z_c \times RPM_c$$

Donde, Z_p es el número de dientes del piñón y Z_c es el número de dientes de la corona. RPM_p es la velocidad de giro de la rueda dentada correspondiente al piñón y RPM_c es la velocidad de giro de la rueda dentada correspondiente a la corona.

Bandas laterales. Son frecuencias equidistantes de la frecuencia de engrane. Estas bandas laterales corresponden con la frecuencia de giro del piñón y de la corona. Son muy importantes en el diagnóstico del engrane, ya que indican si la corona o el piñón se encuentran en mal estado.

Frecuencia de repetición de diente (FRD). Para su cálculo hay que calcular previamente el número de fases de ensamblaje (NE) tal y como se explica en el apartado siguiente. Indica la frecuencia con la que un diente de la corona vuelve a engranar con el mismo diente del piñón. En caso de que se produzca un daño en un diente de la corona y otro del piñón, el máximo de vibración tendrá lugar cuando ambos fallos respectivos entren en contacto. Esta frecuencia es muy baja por lo que es difícil localizarla en el espectro de frecuencias, detectándose con mayor facilidad en la forma de onda en el tiempo.

$$FRD = \frac{GMF \times N_E}{Z_P \times Z_C}$$

El método matemático para el cálculo de las fases de ensamblaje (NE) se realiza calculando el máximo común divisor del número de dientes de ambas ruedas dentadas. En un ejemplo particular de una corona de 15 dientes y un piñón de 9 dientes, los factores primos de la corona son 5, 3 y 1, ya que $5 \times 3 \times 1$ es 15. Los factores primos de los 9 dientes del piñón son $3 \times 3 \times 1$. El máximo común divisor es 3×1 que es 3.

Cada diente del piñón entrará a engranar con Z_C/NE dientes de la corona mientras que cada diente de la corona entrará a engranar con Z_P/NE del piñón.

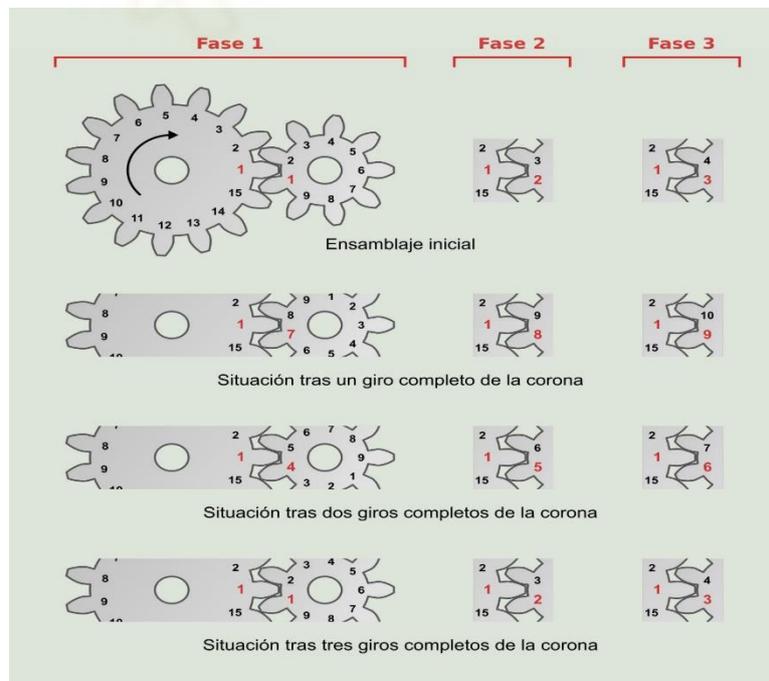


Ilustración 3. Fases en relación de engranajes

Frecuencia de fase de ensamblaje (FFE). Indica que, como consecuencia del desgaste, el espacio entre dientes y su perfil ha cambiado.

$$FFE = \frac{GMF}{N_E}$$

Frecuencias naturales del engrane. Al desarrollarse algún tipo de deterioro en el engrane, éstos pueden excitar las frecuencias naturales de los mismos.

6.1.2. FACTORES DETERMINANTES EN LAS LECTURAS DE VIBRACIONES.

Debemos tener en cuenta una serie de factores antes de realizar una lectura adecuada sobre un engranaje. Dependiendo de la velocidad de giro de los ejes y del número de dientes, estas frecuencias de estudio pueden ser muy elevadas y hay que asegurarse de que el sensor utilizado tenga el rango de frecuencias adecuado. El sensor más comúnmente usado es un acelerómetro ya que tiene un rango frecuencial mucho mayor que el de un velocímetro. Una vez hallamos seleccionado el sensor adecuado, deberemos determinar el modo de medición, para garantizar que al realizar las mediciones la respuesta del sensor a ese modo de medición cubra las frecuencias de interés. Si las frecuencias de interés se encuentran dentro de un rango inferior a las 120.000 CPM, se recomienda trabajar en velocidad para un mejor análisis del espectro. Si las frecuencias de interés se localizan por encima de los 120.000 CPM, no es necesario realizar una integración de la señal a velocidad pudiendo trabajar directamente en aceleración.

Un punto muy importante a tener en cuenta en el análisis de un engrane es la identificación, con la mayor certeza posible, de las frecuencias propias de un engrane para así poder diferenciarlas de aquellas que puedan indicar alguna situación anómala.

Se debe tener en cuenta también que la caracterización de las señales de vibración de una caja de engranajes es difícil de establecer, pero resulta ser una valiosa herramienta para diagnosticar problemas en la máquina. La dificultad estriba fundamentalmente en dos factores. La primera de ellas es que resulta extremadamente difícil, cuando no imposible, montar los necesarios transductores de vibración en el interior de una caja de engranajes

cerca de los engranajes individuales. La segunda es que el número de fuentes de vibración en un accionamiento de engranajes múltiples se compone de una compleja colección de engranajes, modulación y frecuencias de velocidades de giro.

Grandes vibraciones en las cajas de engranajes son debidas, usualmente, a la existencia de un fenómeno de resonancia entre alguna frecuencia natural del sistema y las velocidades del eje. Las máquinas complejas, como las que estudiaremos tienen, generalmente, muchas frecuencias naturales dentro de su gama de velocidades de operación.

6.1.3. DIAGNÓSTICO DE AVERÍAS EN ENGRANAJES.

Desequilibrio. Se manifiesta de la misma forma que un desequilibrio de cualquier otro equipo. La vibración predominante se localiza a 1 X RPM del elemento desequilibrado, bien sea la corona o el piñón.

Desalineación. La vibración predominante tiene lugar a 1 X RPM y a 2 X RPM de los ejes desalineados, pudiendo excitar la frecuencia de engrane, observándose los tres primeros armónicos de la GMF. En este caso no suele localizarse en el espectro bandas laterales significativas.

Desgaste del diámetro primitivo. La vibración predominante a la frecuencia de engrane con numerosas bandas laterales correspondientes con la rueda dentada defectuosa, bien de la corona o del piñón. La excentricidad se manifiesta de igual forma.

Diente defectuoso. La vibración predominante es a la frecuencia de engrane con bandas laterales. Estas bandas laterales tendrán gran amplitud con respecto a la frecuencia de engrane. Comparando la amplitud de las bandas laterales con la amplitud de la frecuencia de engrane, determinamos la gravedad del problema (sólo una pareja de bandas)

Error de transmisión. Este fallo se manifiesta a través de la frecuencia de engrane acompañada de sus primeros armónicos.

6.2. RODAMIENTOS.

Los rodamientos son elementos mecánicos presentes en la mayoría de las máquinas rotativas. Su vida útil depende de una serie de factores: la carga, la velocidad de trabajo, la lubricación, el montaje, la temperatura, las fuerzas exteriores causadas por desalineaciones, desequilibrios, etc. de ahí que sea prácticamente imposible determinar su duración por métodos analíticos. La importancia y criticidad de estos elementos hace necesaria la utilización de técnicas modernas de mantenimiento predictivo (basadas en análisis de vibraciones) que contribuyan a un mejor conocimiento de su estado y por lo tanto de la disponibilidad de las máquinas rotativas en las que están instalados.

Los elementos de rodadura que los componen pueden ser tanto bolas como rodillos, en función del tipo de esfuerzos a que van a estar sometidos. Tanto el comportamiento como la durabilidad de estos rodamientos van a estar determinados por la interacción entre sus elementos. Los mayores esfuerzos producidos por las cargas se darán entre los elementos de rodaduras y las pistas o cajas, de ahí que los fallos por fatiga estén principalmente motivados por esta interacción. Los contactos entre los elementos de rodadura y las jaulas en las que están contenidos son generalmente de naturaleza dinámica ya que constituyen una serie de choques de corta duración y alta velocidad.

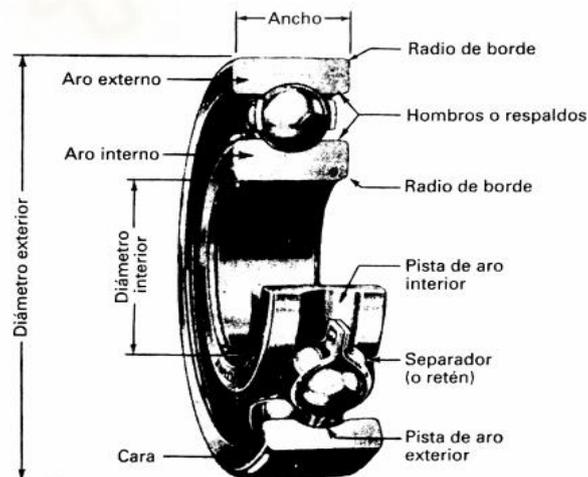


Ilustración 4. Despiece rodamiento (Imagen obtenida de la asignatura de Mantenimiento Predictivo II)

6.2.1. ANÁLISIS ESPECTRAL Y DE LA ONDA EN EL TIEMPO.

El análisis espectral y temporal es crucial para diagnosticar el desgaste de un rodamiento. Permite predecir el nivel de deterioro y planificar su sustitución con anticipación al comparar las amplitudes espectrales a lo largo del tiempo. Este capítulo se centra en la aplicación de esta técnica.

El deterioro de cada uno de los elementos que componen un rodamiento generara una o varias frecuencias que nos permitirán una rápida y fácil identificación. Las 4 posibles frecuencias de deterioro de un rodamiento son:

BPFO: que representa la frecuencia de deterioro de la pista exterior. Esta frecuencia se refiere al número de bolas o rodillos que pasan por un punto de la pista exterior en cada giro completo del eje.

$$BPFO = \frac{N_B}{2} * RPM * (1 - \frac{B_D}{P_D} * \cos \alpha)$$

BPFI: que indica la frecuencia de deterioro de la pista interior. Esta frecuencia representa el número de bolas o rodillos que pasan por un punto de la pista interior en cada giro completo del eje.

$$BPFI = \frac{N_B}{2} * RPM * (1 + \frac{B_D}{P_D} * \cos \alpha)$$

BSF: que es la frecuencia de deterioro de los elementos rodantes. Esta frecuencia indica cuántos giros realiza una bola del rodamiento en cada giro completo del eje.

$$BSF = \frac{P_D}{2 * B_D} * RPM * (1 - \left(\frac{B_D}{P_D}\right)^2 * (\cos \alpha)^2)$$

FTF: que es la frecuencia fundamental de tren o de deterioro de la jaula. Esta frecuencia representa el número de giros que realiza la jaula del rodamiento en cada giro completo del eje.

$$FTF = \frac{RPM}{2} * (1 - \frac{B_D}{P_D} * \cos \alpha)$$

BD: el diámetro de las bolas o rodillos.

PD: el diámetro primitivo (diámetro de la circunferencia imaginaria formada por los centros geométricos de los elementos rodantes).

NB: el número de elementos rodantes del rodamiento.

a: el ángulo de contacto.

RPM: la velocidad de giro del eje.

Para la mayoría de los rodamientos estas frecuencias de deterioro no serán números enteros, por la que la vibración dominante, cuando exista un defecto en alguno de los componentes del rodamiento, será no síncrona (no coincidente con armónicos de la frecuencia de giro). Cuando alguno de los componentes del rodamiento esté dañado distinguiremos en el espectro de frecuencias la frecuencia fundamental correspondiente al elemento dañado, acompañada siempre de armónicos. En aquellos casos en que se desconozcan los parámetros físicos del rodamiento, hay unas fórmulas experimentales bastante aproximadas que nos permitirán determinar las frecuencias de deterioro de las pistas y de la jaula de un rodamiento en función del número de elementos rodantes y la velocidad de giro:

$$FTF = 0.4 * RPM$$

$$BPFO = 0.4 * NB * RPM$$

$$BPFI = 0.6 * NB * RPM$$

6.2.2. SEVERIDAD DEL DETERIORO EN RODAMIENTOS.

Aunque existen numerosas consideraciones a tener en cuenta a la hora de analizar la severidad del deterioro de rodamientos, lo que más nos ayudará en este aspecto será el desarrollo de los casos históricos. De esta manera podremos predecir la severidad del fallo mediante el monitorizado de los datos vibratorios y comparándolos con datos obtenidos de anomalías creadas por fallos anteriores. Aunque las máquinas no sean idénticas, es posible extrapolar los resultados de rodamientos similares, teniendo en cuenta algunas pequeñas diferencias de comportamiento.

6.2.3. DEFECTOS TÍPICOS EN RODAMIENTOS Y SU IDENTIFICACIÓN.

A continuación, se presentan los defectos más típicos que podemos encontrar en rodamientos y como identificarlos mediante el espectro de frecuencias.

Defectos en la pista interior: Los espectros presentan varios picos armónicos de la frecuencia de deterioro de la pista interior (normalmente entre 8 y 10 armónicos de la BPGI) modulados por bandas laterales a $1 \times \text{RPM}$.

Defectos en la pista exterior: Los espectros se caracterizan por presentar picos armónicos de la frecuencia de deterioro de la pista exterior (entre 8 y 10 armónicos).

Defectos en bolas o rodillos: Se caracterizan por presentar en los espectros las frecuencias de deterioro de los elementos rodantes ($N \times \text{BSF}$). En la mayoría de las ocasiones el armónico de mayor amplitud nos suele indicar el número de bolas o rodillos deteriorados. Normalmente van acompañadas por defectos en pista.

Deterioro de jaula (FTF): Generalmente un defecto en jaulas va acompañado por defectos en pistas y las FTF suelen modular a estas frecuencias de deterioro de pistas como suma y/o diferencias de frecuencias.

Defectos de múltiples componentes: Es bastante frecuente encontrar rodamientos con múltiples componentes deteriorados, en cuyo caso aparecerán todas las frecuencias de deterioro y sus armónicos correspondientes.

Holguras: se pueden distinguir los siguientes tipos:

- Excesiva holgura interna en el rodamiento. Suelen presentar una firma espectral caracterizada por la presencia de vibración síncrona (armónicos de la velocidad de giro), vibración subsíncrona (0.5xRPM) y no síncrona (1.5xRPM, 2.5xRPM, 3.5xRPM, etc.). A veces pueden ir moduladas por la FTF.
- Holguras entre rodamiento y eje. Aparecen varios armónicos de la frecuencia de giro y normalmente el múltiplo dominante es el 3 x RPM.
- Holguras entre rodamiento y cajera. Presenta varios armónicos a la frecuencia de giro, destacando por su mayor amplitud los picos a 1 x RPM y 4 x RPM.

Rodamientos desalineados: Como ya se ha comentado en el capítulo de desalineación, las firmas espectrales se caracterizan por la presencia de vibración a varios armónicos de la frecuencia de giro, destacando por su mayor amplitud el pico a $N_b \times \text{RPM}$, siendo N_b el número de elementos rodantes del rodamiento.

Inadecuada lubricación: Los problemas de lubricación se caracterizan por presentar vibración a alta frecuencia (entre 50.000 y 100.000 CPM) presentando bandas de picos distanciadas entre sí un rango de frecuencia variable entre 4800 y 7800 CPM, debidas a la excitación de las frecuencias de resonancia de los rodamientos que se encuentran en estas zonas de frecuencia.

6.2.4. OTROS ELEMENTOS MECÁNICOS.

Aunque los rodamientos y los engranajes son los elementos más importantes acoplados al eje en cualquier máquina rotativa, también existen otros elementos que deben de ser considerados.

Correas de transmisión: Las correas de transmisión son componentes mecánicos esenciales utilizados para transferir potencia entre ejes en diversas aplicaciones industriales. Al igual que otros elementos mecánicos, las correas pueden generar patrones vibratorios específicos que, al ser analizados, permiten diagnosticar su estado operativo y predecir posibles fallas. Frecuencias propias de una correa de transmisión:

Frecuencia Fundamental (BFF): Se calcula como, donde v es la velocidad lineal (m/s) y L la longitud efectiva (m).

Frecuencias Armónicas: Son múltiplos de la BFF e indican irregularidades en la correa.

Frecuencia de Deslizamiento: Diferencia entre las velocidades angulares de la polea motriz y la correa.

Frecuencias Naturales de las Poleas: Identifican vibraciones provenientes de las poleas.

Cadenas: Las cadenas transmiten movimiento rotativo entre ejes separados. Los deterioros en las transmisiones por cadena son:

Desgaste de Articulaciones: Prolonga el paso de la cadena, pudiendo causar engranajes defectuosos.

Alargamiento Máximo: Hasta un 3% de holgura es aceptable en accionamientos simples.

7. IDENTIFICACIÓN DE CAUSAS DE VIBRACIONES.

A continuación, se explican las diferentes causas de las vibraciones que se pueden detectar en los espectros de frecuencia.

7.1. DESEQUILIBRIO.

Una máquina rotativa está desequilibrada cuando el centro de gravedad del rotor no coincide con su centro de rotación, originando una fuerza centrífuga que generará una vibración excesiva. Entre las características principales del desequilibrio podemos destacar las siguientes:

- a) La amplitud de la vibración es directamente proporcional a la cantidad de desequilibrio.
- b) La variación en el desequilibrio originará una variación en el ángulo de fase.
- c) La suma vectorial de todos los pesos situados en un mismo plano es igual a un único desequilibrio.
- d) La cantidad de desequilibrio se puede medir en peso y distancia desde el centro del rotor al peso (gm x cm). Un aumento del peso de desequilibrio o del radio originará un aumento directamente proporcional a la cantidad de desequilibrio.

$$F_c = M * R * W^2$$

Donde:

M = masa de desequilibrio.

R = radio de desequilibrio.

W = velocidad angular.

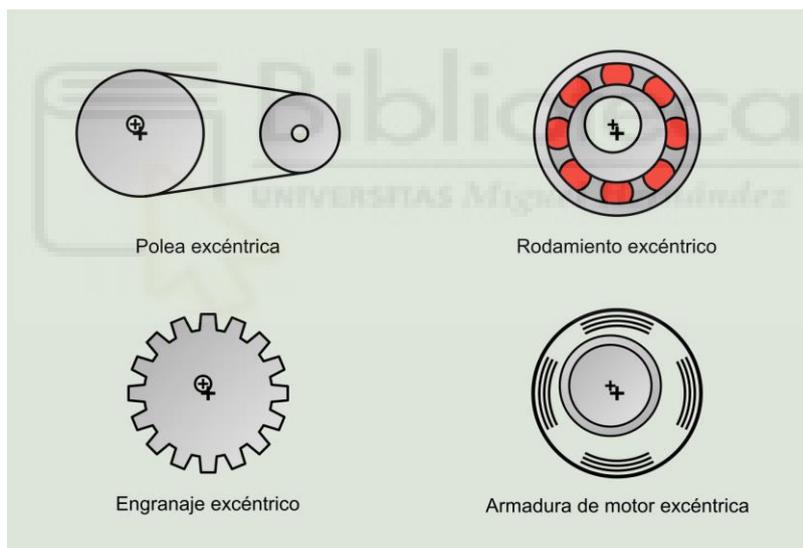
Para su análisis y diagnóstico se requiere el estudio de la onda en el tiempo, el espectro de vibración y de lecturas de fase. Los problemas de desequilibrio presentan en la firma espectral las características siguientes:

- A) Elevada amplitud a 1xRPM.
- B) Bajos niveles de amplitud de los armónicos de 1xRPM.
- C) Bajo nivel de vibración no síncrona y subsíncrona, por debajo de 1xRPM.
- D) Fuertes niveles de vibración en las direcciones radiales (horizontal y vertical), con mayores niveles de amplitud en la dirección de menor rigidez.
- E) Bajos niveles de vibración en la dirección axial en comparación con las medidas radiales.

7.2. EXCENTRICIDAD.

La excentricidad se define como la no coincidencia entre el eje de rotación y el eje de simetría. Este tipo de deficiencia se puede dar en diferentes tipos de elementos mecánicos, como son las poleas, las ruedas dentadas y en el posicionamiento relativo entre dos piezas concéntricas, caso del rotor y el estator de un motor.

Debido a una mejora en los procesos de fabricación la excentricidad no es un fenómeno muy extendido, teniendo su origen, en la mayoría de los casos, en un desgaste desigual de la superficie. Este es el caso del desgaste en las gargantas de las poleas. En los motores eléctricos la excentricidad originada por el incorrecto posicionamiento relativo entre el rotor y el estator, aunque este problema también se ha resuelto con la evolución de las tecnologías en los últimos años.



La excentricidad se manifiesta de la misma forma que el desequilibrio, con una fuerte vibración a la frecuencia de giro de la polea en la dirección radial. Si se diagnostica como desequilibrio puede que se corrija el problema, pero la excentricidad suele depender de la carga, por lo que al variar las condiciones de carga bajo las que se realizó el equilibrado, los niveles de vibración pueden incrementarse.

La mejor manera de diferenciar la excentricidad del desequilibrio es a través de la fase. La fase que se presenta en un caso de desequilibrio es de 90° entre sus dos lecturas radiales. En el caso de la excentricidad, se genera una variación periódica en la tensión de las correas. La fuerza de reacción en las poleas origina un movimiento de las mismas, en la dirección de la fuerza, por lo que, si se realizan lecturas de fase radiales en la polea, estas lecturas estarán en fase.



Ilustración 6. Desbalanceo/excentricidad (Imagen obtenida de la asignatura de Mantenimiento Predictivo I)

7.3. EJE DEFORMADO

Se dice que un rotor está deformado cuando pierde su simetría con respecto a su eje de giro. La deformación puede tener su origen por dilataciones térmicas, sobrecargas radiales y axiales, etc.

Un eje deformado se manifiesta en el espectro de frecuencias a la frecuencia de giro del eje. Sin embargo, a diferencia del desequilibrio se detectará una vibración axial significativa, cuyo espectro de frecuencias asociado presentará, acompañando al primer armónico de la velocidad de giro, un segundo armónico. Si se intenta su equilibrado, normalmente es necesario un gran peso de corrección.

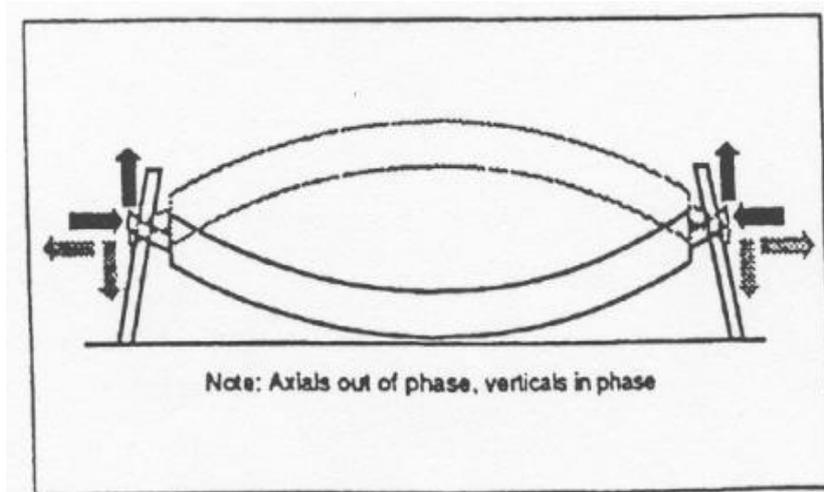


Ilustración 7. Eje deformado (Imagen obtenida de la asignatura de Mantenimiento Predictivo I)

7.4. DESALINEACIÓN

La desalineación es uno de los problemas más frecuentes de vibraciones en máquinas rotativas y se debe a la dificultad que presenta la alineación de dos rotores con sus respectivos apoyos. La desalineación puede tener su origen en causas muy diversas como: excesiva confianza en la utilización de acoplamientos elásticos y rodamientos autoalineables, distorsiones en la máquina durante su operación que producen desplazamientos del sistema conductor o conducido, etc. La desalineación se caracteriza por producir unos niveles de vibración muy elevados en las proximidades del acoplamiento que pueden llegar a precipitar la degradación de los rodamientos, el desgaste de los tacos del acoplamiento, la rotura de pernos, el sobrecalentamiento excesivo del sistema conductor por un aumento del consumo eléctrico, etc. por lo que es conveniente corregirla antes de que produzca daños más considerables que pueden llegar a producir paros en la máquina.

La desalineación tiene lugar cuando existe poca precisión en la alineación entre pares de piezas, como son los elementos de un acoplamiento, rodamientos, ejes y poleas. La desalineación normalmente se manifiesta con una fuerte vibración en las direcciones axiales y radiales, caracterizándose de la siguiente forma:

- Las lecturas axiales pueden presentar los primeros armónicos de la velocidad de giro, 1x, 2xRPM.
- Las lecturas radiales presentan normalmente actividad a 1x y 2xRPM.

Sin embargo, en algunos equipos la vibración predominante debida a desalineación tiene lugar a 1xRPM y puede confundirse con desequilibrio. En estos casos es conveniente realizar un análisis complementario de fase que nos permitirá distinguir problemas de desalineación de desequilibrio. El análisis de fase nos permite confirmar el diagnóstico de la desalineación y se caracteriza por presentar una diferencia de fase importante entre los rodamientos próximos al acoplamiento en las mismas direcciones de medida.

7.4.1. TIPOS DE DESALINEACIONES

Desalineación angular. Hay desalineación angular cuando las líneas centrales de dos ejes se cortan formando un ángulo. La presencia de fuerte vibración axial a 1xRPM caracteriza este tipo de desalineación, que puede estar acompañado de armónicos de la velocidad de giro del eje con bajas amplitudes.

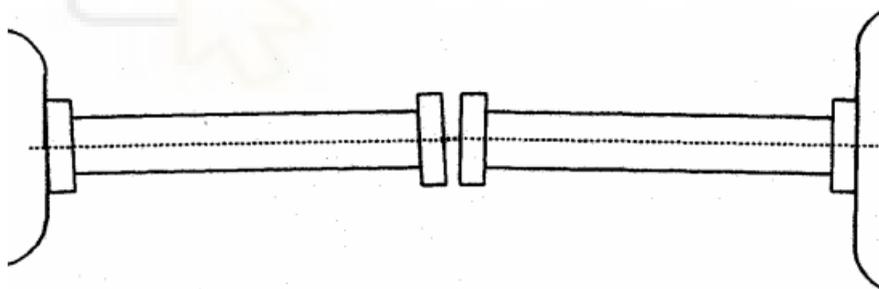


Ilustración 8. Desalineación angular (Imagen obtenida de la asignatura de Mantenimiento Predictivo I)

Desalineación radial u offset. Dos ejes están desalineados radialmente cuando los ejes son paralelos y están separados una determinada distancia. La desalineación puede ser vertical u horizontal y se manifiesta espectralmente con una fuerte vibración radial a 1x y 2xRPM del eje, pudiendo presentar armónicos superiores de menor amplitud.

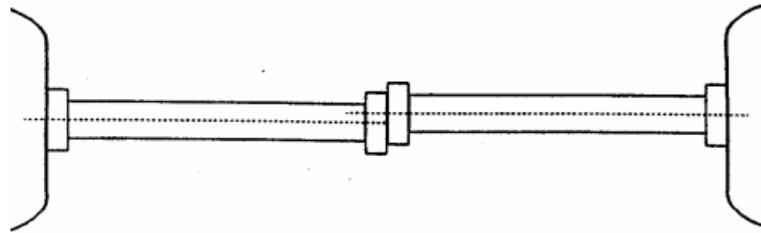


Ilustración 9. Desalineación radial (Imagen obtenida de la asignatura de Mantenimiento Predictivo I)

Desalineación en rodamientos y cojinetes. Independientemente de que exista una buena alineación del acoplamiento, puede existir una desalineación entre el eje y el rodamiento. La desalineación puede tener su origen en una distorsión en la máquina o en un montaje inadecuado. Generalmente, la mayor deformación se suele producir en el rodamiento próximo al rodete, originando una desalineación axial. Los rodamientos de bolas o rodillos desalineados se caracterizan por presentar vibración axial independientemente del estado de equilibrado. La vibración puede aparecer a $1x$, $2x$, $3xRPM$ o al número de bolas o rodillos del rodamiento por la velocidad de giro.

La desalineación de cojinetes de fricción presenta vibración radial y axial, normalmente a $1x$ y $2xRPM$ de la velocidad de giro. La desalineación de cojinetes suele venir acompañada por desequilibrios del rotor, por lo que un equilibrado del rotor disminuirá la vibración radial y axial.

7.5. HOLGURAS

Las holguras mecánicas pueden tener naturalezas muy distintas: falta de apriete entre distintos elementos mecánicos (aflojamiento de pernos, rotura de anclajes, etc.) o aumento de tolerancias producidas por desgastes (holguras en cojinetes, rodamientos, engranajes, etc.), etc. Las holguras se manifiestan en las medidas de vibración siempre y cuando exista una fuerza de excitación debida a un problema ajeno a las holguras, como puede ser un desequilibrio, una desalineación, etc. de forma que pequeñas fuerzas de excitación exterior pueden producir elevadas amplitudes de vibración, si hay holguras.

Las holguras se caracterizan por presentar en el espectro de frecuencias varios armónicos de la velocidad de giro del eje. Los niveles de vibración experimentados por la máquina

suelen ser importantes. En función de la evolución de las holguras, en los espectros pueden aparecer picos armónicos de la frecuencia de giro (1xRPM, 2xRPM, 3xRPM, etc.), medios armónicos de la velocidad de giro (1,5xRPM, 2,5xRPM, 3,5xRPM, etc.) e incluso subarmónicos de dicha frecuencia (0,5xRPM).

Podemos hacer una clasificación general de las holguras, distinguiendo entre holguras de elementos rotativos (rodamientos, cojinetes de fricción, acoplamientos, rotores, etc.) y holguras estructurales (bancadas, cajeras, pernos de anclaje, etc.). Cada una de ellas tiene unas características propias

Holguras de elementos rotativos. Este tipo de holguras se caracterizan por presentar un espectro con bandas anchas de frecuencias relacionadas con la frecuencia de giro del rotor, pudiendo distinguirse: armónicos (1xRPM, 2xRPM, 3xRPM, etc.), subarmónicos (0,5xRPM) y medios armónicos (1,5xRPM, 2,5xRPM, 3,5xRPM, etc.). En general se manifiestan más claramente en las direcciones radiales de medida (horizontales y verticales) que en las direcciones axiales. A medida que el desgaste aumenta se generan cambios en el espectro de frecuencias, lo que permite hacer una clasificación de la severidad de la holgura en 4 grupos:

Holgura incipiente. Presencia de los primeros cuatro o cinco armónicos de la velocidad de giro, con armónicos superiores de menor amplitud.

Holgura potencialmente seria. Incremento de la amplitud del primer armónico de la velocidad de giro y aparición de medios armónicos de muy baja amplitud.

Holgura seria. Aumento de la amplitud de los armónicos y medios armónicos de la velocidad de giro.

Holgura severa. Se caracteriza por presentar medios armónicos, armónicos y subarmónicos de la frecuencia de giro del rotor, de forma que en el espectro se observa una banda ancha de energía.

7.5.1. HOLGURAS ESTRUCTURALES.

Son las holguras asociadas a los elementos mecánicos no rotativos de la máquina: anclajes de fijación a la bancada, uniones entre tuberías, cajas de rodamientos, etc. Normalmente se manifiesta más claramente en las direcciones radiales de medida que en las axiales, con la presencia en el espectro de frecuencias de varios armónicos de la velocidad de giro del eje. Un indicador de la severidad de la holgura es la comparación de la amplitud de los armónicos a $2xRPM$ y $3xRPM$ con respecto a la frecuencia a $1xRPM$, de forma que cuando la amplitud de dichos armónicos esté por encima del 50% de la amplitud del pico a $1xRPM$, nos indicará una mayor severidad de la holgura. El motivo por el que este tipo de holguras se manifiestan en los espectros de frecuencia con varios armónicos de la frecuencia de giro (1xRPM, 2xRPM, 3xRPM, 4xRPM, etc.) se ilustra en la ilustración siguiente. El rotor presenta un ligero desequilibrio como fuerza de excitación de las holguras debidas al aflojamiento de los anclajes entre el soporte del rodamiento y la bancada. En las 4 etapas de la ilustración podemos ver como a medida que el punto pesado de desequilibrio va girando hasta completar una vuelta completa, se producen 4 fuerzas o impulsos, indicadas en las 4 ilustraciones, dos de la cuales son debidas al desequilibrio y las otras dos al retorno de cada uno de los lados del soporte a la bancada. Esto nos originará varios armónicos de la frecuencia de giro en el espectro de vibración.

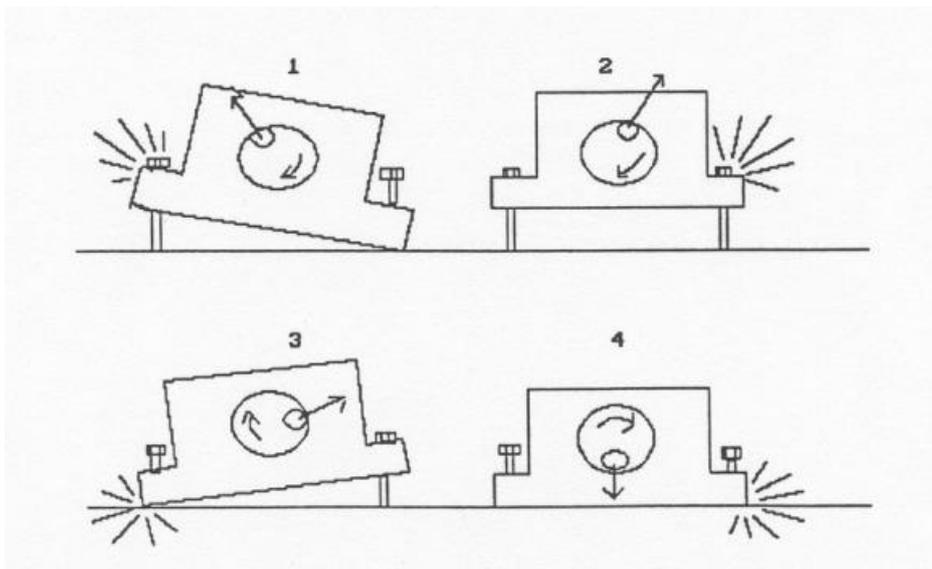


Ilustración 10. Holgura estructural (Imagen obtenida de la asignatura de Mantenimiento Predictivo I)

Para identificar y localizar si existen o no holguras entre dos elementos estructurales, como pueden ser una pata de un motor y su bancada, debidos al aflojamiento de los pernos o rotura del anclaje, existe un método muy sencillo que consiste en tomar lecturas de vibración y fase, en todas las direcciones posibles de medida (axiales, horizontales y verticales) en los dos elementos en estudio. Los datos obtenidos nos pueden dar dos posibles resultados bien diferenciados, en función de los cuales determinaremos con total fiabilidad la existencia o no de holguras entre ellos.

Si los espectros obtenidos en la misma dirección en los dos elementos presentan amplitudes similares y además las lecturas de fase son idénticas. Esto indicará que existe una buena unión entre los dos elementos. Si, por el contrario, las amplitudes de los picos armónicos de la frecuencia de giro en las mismas direcciones de medida en los dos elementos son distintas, y además hay diferencias importantes de fase entre ellas, nos confirmarán la existencia de holguras entre ambos elementos

8. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO (PMP).

A continuación, se desarrolla la metodología llevada a cabo para implantar un sistema de mantenimiento predictivo. Este mantenimiento consistirá en la inspección a intervalos regulares de los equipos incluidos en este plan y tomar acciones para prevenir las fallas o averías o evitar las consecuencias de estas incluyendo inspecciones tanto objetivas con los instrumentos que se detallaran más tarde como subjetivas (con los sentidos). Este monitorizado se llevará a cabo mediante algunas de las técnicas que comentaremos a continuación.

En este apartado hablaremos de las diferentes técnicas usadas para la correcta monitorización de los diferentes elementos que compondrán las máquinas de estudio del presente proyecto. He considerado importante explicar todas las técnicas que se pueden usar para llevar a cabo un plan de mantenimiento predictivo, aunque no nos será necesario usarlas todas.

8.1. TÉCNICAS DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO.

En la realización de un PMP es muy importante usar las más avanzadas y precisas tecnologías a nuestra disposición. El monitorizado de las vibraciones de los sistemas mecánicos presentes en cualquier tipo de industria es, generalmente, el componente principal en la mayoría de los programas de mantenimiento predictivo. Esta técnica está limitada al monitorizado de la condición mecánica y es una herramienta muy limitada para el monitorizado de otros procesos críticos.

Es por esto por lo que, aunque indispensable, el análisis de vibraciones no es suficiente para garantizar el éxito del PMP y debe complementarse con otras técnicas de monitorizado y diagnóstico que nos faciliten información de otros aspectos mecánicos indispensables.

En este capítulo se detallarán las características de las principales técnicas que se pueden usar en el desarrollo de un plan de mantenimiento predictivo. Nosotros, en base a los recursos disponibles, usaremos el análisis de vibraciones complementado con análisis termográfico donde sea necesario.

8.1.1. ANÁLISIS DE VIBRACIONES. CONCEPTOS BÁSICOS.

La vibración se puede definir como el movimiento de vaivén de una máquina o elemento de ella en cualquier dirección del espacio desde su posición de equilibrio. Las características más importantes de movimiento vibratorio son:

Frecuencia: es una característica simple y significativa en este análisis. Se define como el número de ciclos completos en un período de tiempo. La unidad característica es cpm (ciclos por minuto). Existe una relación importante entre frecuencia y velocidad angular de los elementos rotativos. La correspondencia entre cpm y rpm (ciclos por minuto-revoluciones por minuto) identificará el problema y la pieza responsable de la vibración. Esta relación es debida a que las fuerzas cambian de dirección y amplitud de acuerdo con la velocidad de giro. Los diferentes problemas son detectados por las frecuencias iguales a la velocidad de giro o bien múltiplos suyos. Cada tipo de problema muestra una

frecuencia de vibración distinta haciendo posible en muchos casos identificar el elemento que está generando la vibración inusual y así actuar sobre él.

Amplitud: La amplitud de la vibración indica la importancia y/o gravedad del problema, esta característica da una idea de la condición de la máquina. Se podrá medir la amplitud de desplazamiento, velocidad o aceleración. La velocidad de vibración tiene en cuenta el desplazamiento (desviación de la pieza respecto a su posición en cualquier dirección) y la frecuencia, es por tanto un indicador directo de la severidad de vibración. La severidad de vibración es indicada de una forma más precisa midiendo la velocidad, aceleración o desplazamiento según el intervalo de frecuencias entre la que tiene lugar, así para bajas frecuencias, por debajo de 600 cpm, se toman medidas de desplazamiento. En el intervalo entre 600 y 60.000 cpm, se mide velocidad, y para altas frecuencia, mayores a 60.000 cpm, se toman aceleraciones.

Hay que tener en cuenta que todas las máquinas vibran debido a las tolerancias inherentes de cada uno de sus elementos constructivos.

Todo elemento de un tren de maquinaria genera una serie de fuerzas dinámicas durante el funcionamiento de la máquina. Cada una de estas fuerzas dará lugar a vibraciones que nos hará posible identificar cada uno de los diferentes componentes. Desde el momento en el que estos componentes están unidos entre sí estas vibraciones se transmitirán al resto de la máquina, dando lugar a lo que conocemos como vibración característica.

Así, conociendo y monitorizando las vibraciones de la máquina, nos es posible identificar anomalías y, en muchos casos, aislar e identificar el componente defectuoso, ya que diferentes tipos de fallos dan lugar a diferentes tipos de cambios en la vibración característica de la máquina.

Dicho esto, queda patente la necesidad de monitorizar y evaluar la máquina en su conjunto si queremos obtener un máximo beneficio y un óptimo diagnóstico del programa de análisis de vibraciones. En este sentido, muchos programas se encuentran limitados por el monitorizado de cada elemento de la máquina por separado, limitándose en gran medida la posibilidad de detectar de manera incipiente los problemas en la máquina.

8.2. ANÁLISIS DE ACEITES LUBRICANTES.

Las técnicas de análisis de lubricantes son fundamentales para determinar el deterioro del lubricante, así como la entrada de contaminantes y la presencia de partículas de desgaste mediante el uso de análisis como pueden ser espectrografías o ferrografías, los cuales nos revelan un posible problema de desgaste o rotura de algún elemento lubricado.

El análisis de las partículas en suspensión nos da información acerca del desgaste del tren mecánico lubricado. Partículas en suspensión en el lubricante de una maquina pueden revelar información significativa acerca del estado de la máquina. Esta información se obtiene del estudio de la forma, tamaño, composición y cantidad de las partículas.

El análisis espectrográfico de aceites lubricantes consiste en una técnica usada para evaluar la condición y el desgaste de los componentes de una maquina mediante el análisis en laboratorios especializados de muestras de aceite lubricante procedente de la maquina en cuestión. En este análisis se emplean técnicas como la espectroscopia de emisión óptica o la espectrometría de masas para identificar y cuantificar los elementos presentes en el aceite, así como para detectar la presencia de partículas metálicas provenientes del desgaste de los componentes. Los resultados de este análisis proporcionan información valiosa sobre la salud y el desempeño de los componentes de la maquinaria, permitiendo detectar problemas como la contaminación de aceite o la presencia de desgaste excesivo en componentes específicos. Como herramienta predictiva, el análisis de aceites y la espectrografía pueden servir para planificar intervalos de cambio de aceite basados en la condición real del aceite. En plantas de tamaño mediano (como es nuestro caso) y grande este hecho puede significar un ahorro importante. Para el análisis de estas características, los parámetros que se deben controlar serán los siguientes:

- 1.- Viscosidad
- 2.- Contaminación (agua, refrigerantes etc...)
- 3.- Concentración de combustible
- 4.- Partículas

- 5.- Contenido en solidos
- 6.- Hollín
- 7.- Oxidación
- 8.- Nitratación
- 9.- Numero acido total (TAN)
- 10.- Numero base total (TBN)

8.3. TERMOGRAFÍA.

Las cámaras termográficas para inspecciones de mantenimiento predictivo son potentes herramientas no invasivas para la supervisión y el diagnóstico del estado de componentes e instalaciones eléctricas y mecánicas. Con una cámara termográfica, podemos identificar problemas en una fase temprana, de forma que se pueden documentar y corregir antes de que se agraven y resulten más costosos de reparar.

Una termografía con datos de temperatura precisos proporciona al responsable de mantenimiento información importante acerca del estado del equipamiento inspeccionado. Estas inspecciones se pueden realizar mientras el proceso de producción se encuentra en pleno funcionamiento y, en muchos casos, el uso de una cámara termográfica puede incluso ayudar a optimizar el propio proceso de producción.

Los datos térmicos recopilados con una cámara termográfica pueden ser una fuente muy valiosa de información complementaria para los estudios de vibración y la supervisión de los equipos mecánicos. Cuando los componentes mecánicos se desgastan y pierden eficiencia suelen disipar más calor. Como resultado, los equipos o sistemas defectuosos aumentan rápidamente su temperatura antes de averiarse.

Al comparar periódicamente lecturas de una cámara termográfica con el perfil de temperatura de una máquina en condiciones de funcionamiento normales, es posible detectar una gran cantidad de anomalías que nos permiten anticiparnos a los fallos por avería.

También se pueden inspeccionar motores mediante una cámara termográfica. Los fallos en el motor, como los signos de desgaste en el contacto de las escobillas y los

cortocircuitos en los armazones, suelen producir un calor excesivo antes del fallo, pero son imposibles de detectar mediante un análisis de vibraciones puesto que con frecuencia generan poca o ninguna vibración. La termografía ofrece una visión completa y permite comparar las temperaturas de distintos motores. Ejemplos de averías mecánicas que se pueden detectar con la termografía:

- Problemas de lubricación
- Errores de alineación
- Motores recalentados
- Bombas sobrecargadas
- Ejes de motor recalentados
- Rodamientos calientes

Otros aspectos del mantenimiento en el que esta herramienta puede ser muy útil son las inspecciones de componentes y sistemas eléctricos de todos los tamaños y formas, mantenimiento y control de tuberías y sus aislantes, en instalaciones refractarias y petroquímicas etc. Las ventajas que nos ofrece el Mantenimiento predictivo por Termovisión son:

- Método de análisis sin detención de procesos productivos, ahorrando así gastos.
- Ayuda al seguimiento de reparaciones previas.
- Facilita informes muy precisos al personal de mantenimiento
- Determinación exacta de puntos deficientes en una línea de proceso.
- Reduce el tiempo de reparación por localización precisa del fallo.
- Disminuye la peligrosidad para el operario por evitar la necesidad de contacto con el equipo.

8.4. ULTRASONIDOS.

El ultrasonido es una herramienta fundamental en el mantenimiento predictivo, clave para identificar problemas desde sus inicios con asombrosa exactitud. Esta tecnología nos posibilita detectar el comienzo de una falla, por más mínima que sea.

Es relevante señalar que cualquier irregularidad mecánica durante la operación de herramientas, o las pequeñas fugas de vacío y cambios de presión, generan ondas ultrasónicas específicas.

Estas ondas, al ser generadas, son captadas por equipos especializados que llevan a cabo un análisis de vibraciones para localizar el problema. Así, es posible actuar de forma eficaz antes de que la situación empeore, contribuyendo a alcanzar los objetivos del mantenimiento predictivo de la empresa.

El dispositivo usado para medir estos sonidos ultrasónicos es el detector o analizador de ultrasonidos. Este aparato recoge las ondas y las convierte en señales que son audibles para los humanos, ya sea a través de auriculares de alta definición o mostradas en una pantalla. El ultrasonido se emplea en una variedad de aplicaciones industriales, incluyendo:

Monitoreo de Rodamientos: Los rodamientos generan ondas ultrasónicas por el roce de sus componentes, lo que permite evaluar su estado.

Detección de Fugas: Los medidores ultrasónicos son capaces de determinar rápidamente si un ruido proviene de una fuga de vacío o presión.

Inspección de Instalaciones Eléctricas: Las descargas eléctricas y fallos generan ondas ultrasónicas que se detectan para un diagnóstico temprano.

Además, se utilizan en pruebas de hermeticidad en barcos, trenes y autoclaves, y para evaluar válvulas hidráulicas en vehículos y en sistemas industriales.

A modo de conclusión, debemos decir que el ultrasonido en el mantenimiento predictivo se ha convertido en un arma esencial a la hora de combatir los imprevistos y las fallas de todo tipo de maquinarias. Los detectores de ultrasonido permiten tomar estas ondas y convertirlas en frecuencias audibles, medibles y almacenables.

Una vez que estas fallas se detectan y se convierten en ondas audibles, es mucho más simple poder adelantarse a los fallos. De esta manera, el ultrasonido se convierte en un gran aliado en el mantenimiento predictivo de tu propia empresa. Aliado que, en conjunto con un software de mantenimiento, puede llegar a una eficacia realmente de muy alto nivel.

9. SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MEDIDA.

Para la selección de los puntos de la máquina donde se va a hacer la toma de datos de vibraciones, se han tenido en cuenta los parámetros estudiados en el apartado 8 de análisis de vibraciones además de la posibilidad de colocación o no en la máquina

Es importante elegir la ubicación adecuada del sensor para medir, de la forma más nítida posible, la vibración de los elementos mecánicos más susceptibles de sufrir defectos (ejes, rodamientos, engranajes, etc.). Normalmente en las máquinas rotativas los colocaremos en los soportes de los rodamientos ya que son los encargados de canalizar los esfuerzos dinámicos. Los tres sentidos principales en una medición son horizontal, vertical y axial. Los sentidos radiales con el horizontal y el vertical, y el eje del transductor forma 90° con el eje de rotación. Por otro lado, en el sentido axial el eje del transductor se encuentra orientado paralelo al eje de rotación. También debemos señalar la importancia de que el transductor apoye sobre una superficie plana y que sea posible físicamente, es decir, que no haya elementos que imposibiliten la colocación del transductor sobre la zona de medida, para de esta manera no tener resultados incorrectos. Con estos datos podemos mostrar a continuación cuales ha sido los puntos seleccionados para la toma de datos en cada máquina.

9.1. RESMADORAS.

Debido a la complejidad de esta máquina, lo mejor es dividirla en subgrupos. De esta manera, iremos mencionando cada uno de los componentes mecánicos que nos es posible monitorizar, haciendo hincapié en los que hemos considerado más importantes.

No siempre es posible tomar las medidas de vibración en los ejes de los motores o de los rodillos, por eso algunas de estas medidas se tomarán sobre la misma carcasa del motor.

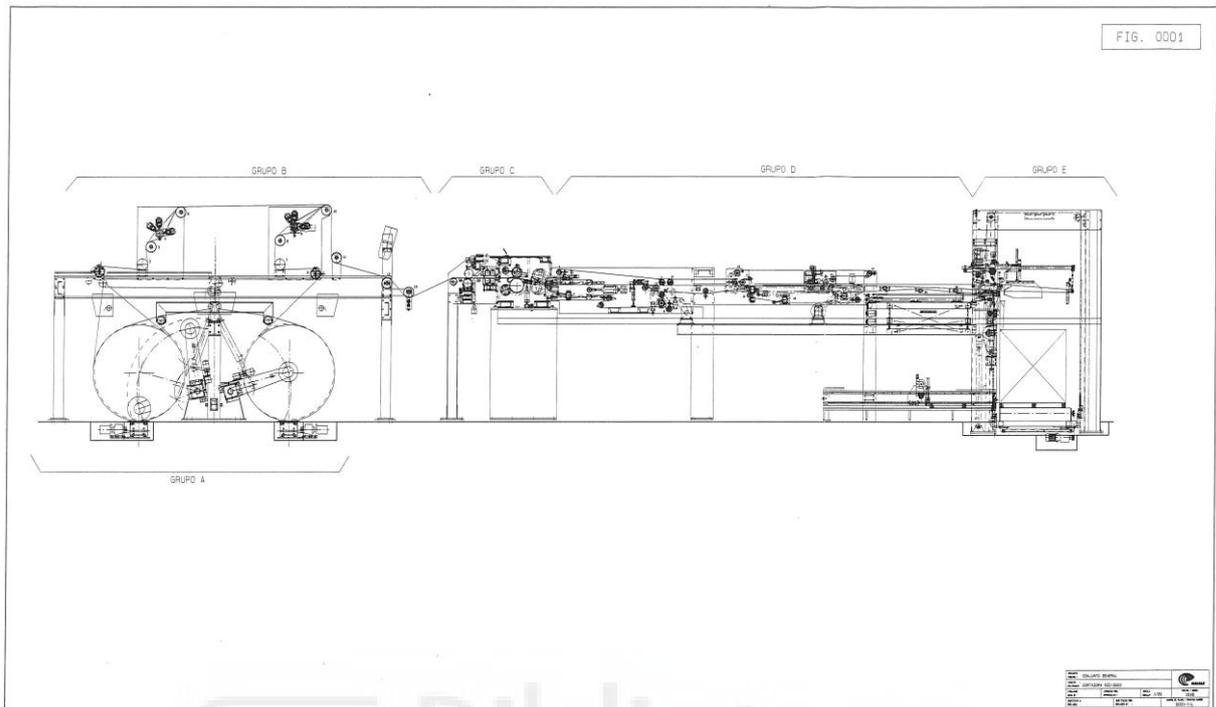


Ilustración 11. Plano conjunto resmadora

Todas las imágenes que hacen referencia a la maquinaria que se incluye en el presente proyecto se han obtenido a partir de los planos proporcionados por los fabricantes

9.1.1. GRUPO A: DESBOBINAJE.

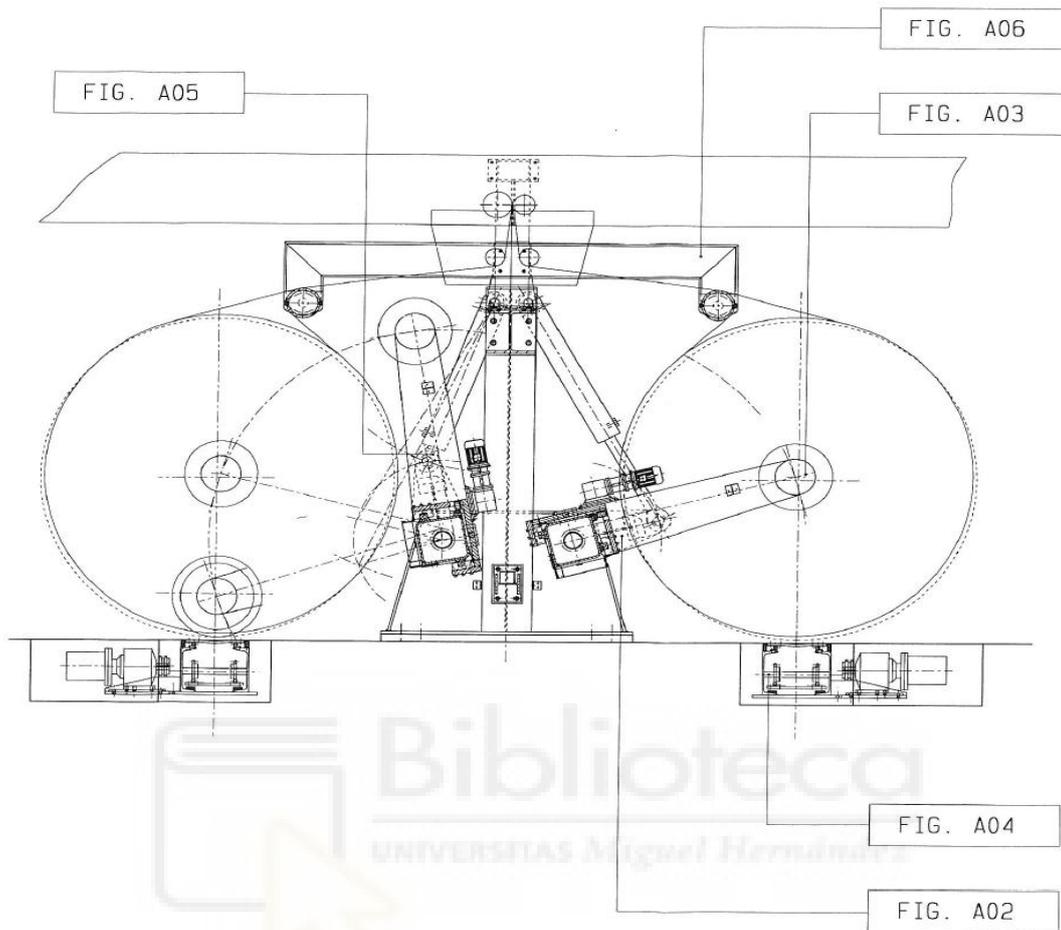


Ilustración 12. Plano desbobinaje

En esta parte de la máquina el papel sale de la bobina haciéndola girar sobre su propio eje en este proceso. Hay dos brazos elevadores que levantan la bobina de la cinta de transporte que la coloca en la posición. El hecho de que haya dos brazos es por motivo de eficiencia, ya que cuando una bobina se agota comienza el desbobinado de la que se encuentra en el otro brazo. En otro grupo se produce el empalme del papel para evitar así el corte en el suministro.

El eje que permite girar a la bobina tiene un freno que se encarga de mantener la tensión durante el desbobinado a medida que la bobina va perdiendo el papel y con él el peso que proporcionaba la tensión durante este proceso.

9.1.1.1. SUBGRUPO A02: EJE DE VOLTEO.

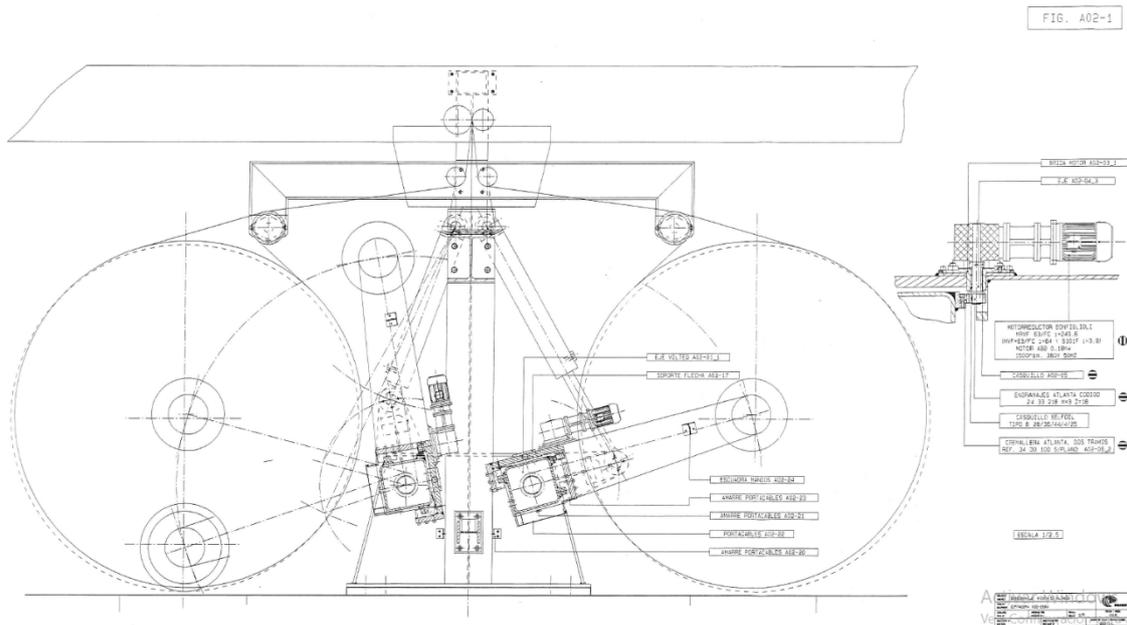


Ilustración 13. Plano eje de volteo

En la ilustración podemos apreciar las diferentes partes que componen este subgrupo, entre las que destacaremos el motorreductor encargado de alimentar los pistones hidráulicos que suben y bajan las bobinas.

9.1.1.2. SUBGRUPO A03: MONOCARRIL DOBLE.

FIG. A03

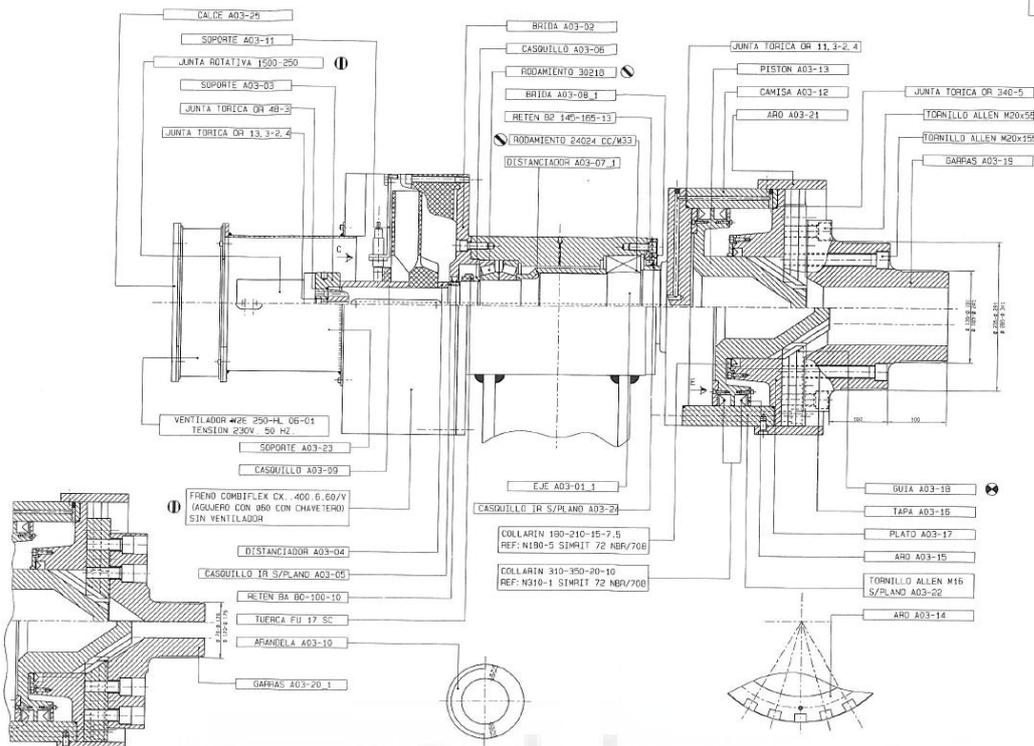
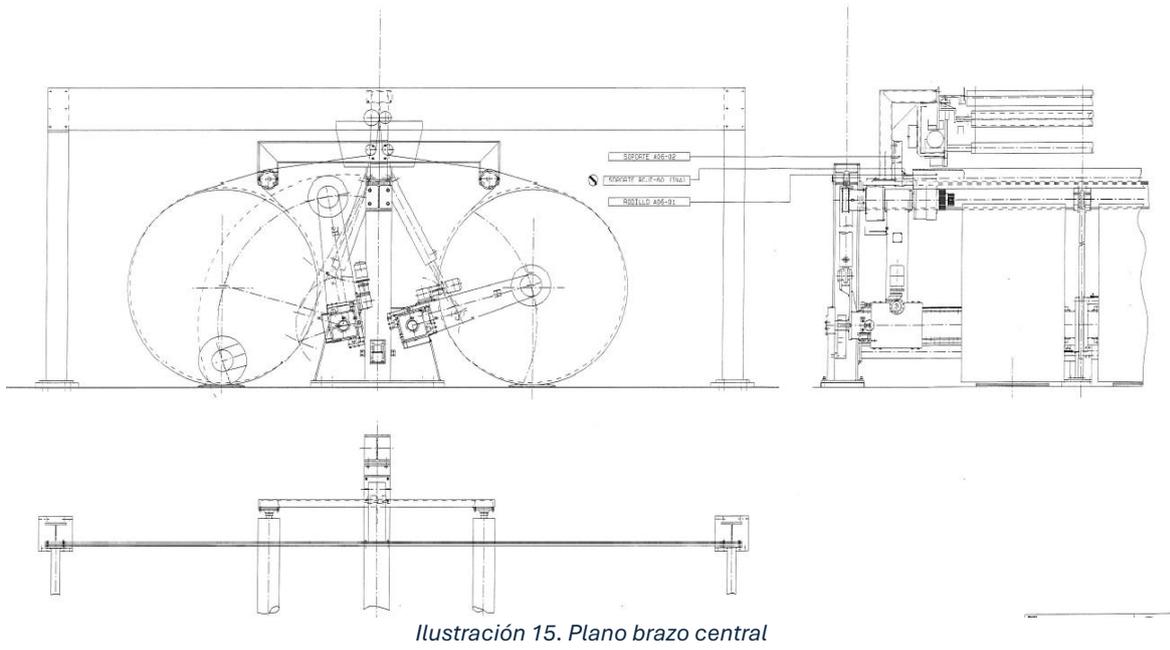


Ilustración 14. Plano eje de desenrollamiento

En la imagen anterior podemos ver el conjunto mecánico llamado eje de desenrollamiento, que se sustenta la bobina y como su nombre indica permite el desenrollamiento del papel.

9.1.1.3. SUBGRUPO A05: BRAZO CENTRAL.



En este subgrupo tenemos los rodillos de apoyo que dirigen el papel fuera de la zona de desbobinado hacia el grupo B.

Los elementos más importantes en este subgrupo son los rodillos ya que se encuentran girando constantemente y su mal funcionamiento podría generar una tensión diferente a la esperada y esto derivaría en problemas en el Grupo B durante el enderezamiento del papel.

9.1.2. GRUPO B: ENTRADA.

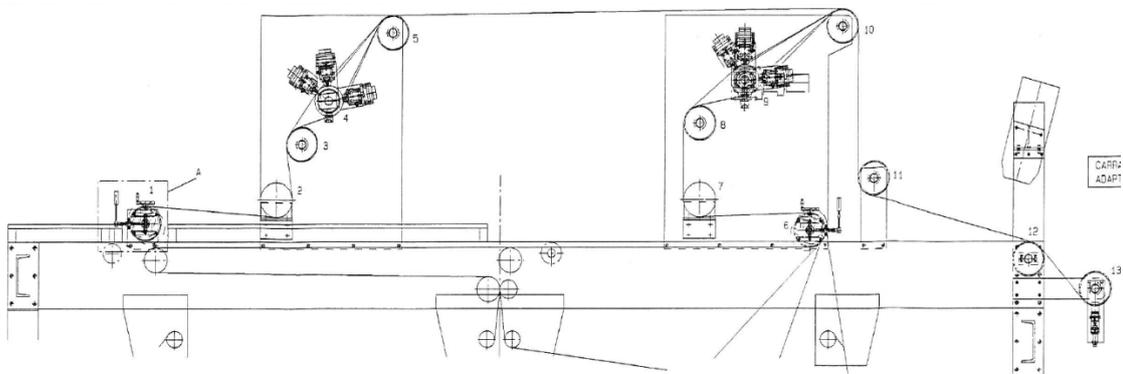


Ilustración 16. Plano grupo entrada

En este grupo tendrá especial importancia el monitorizado del motor del llamado romprefibras. También se hará una inspección visual periódica del resto de rodillos que componen esta sección.

9.1.3. GRUPO C: CORTE LONGITUDINAL Y SINCRONIZADO.

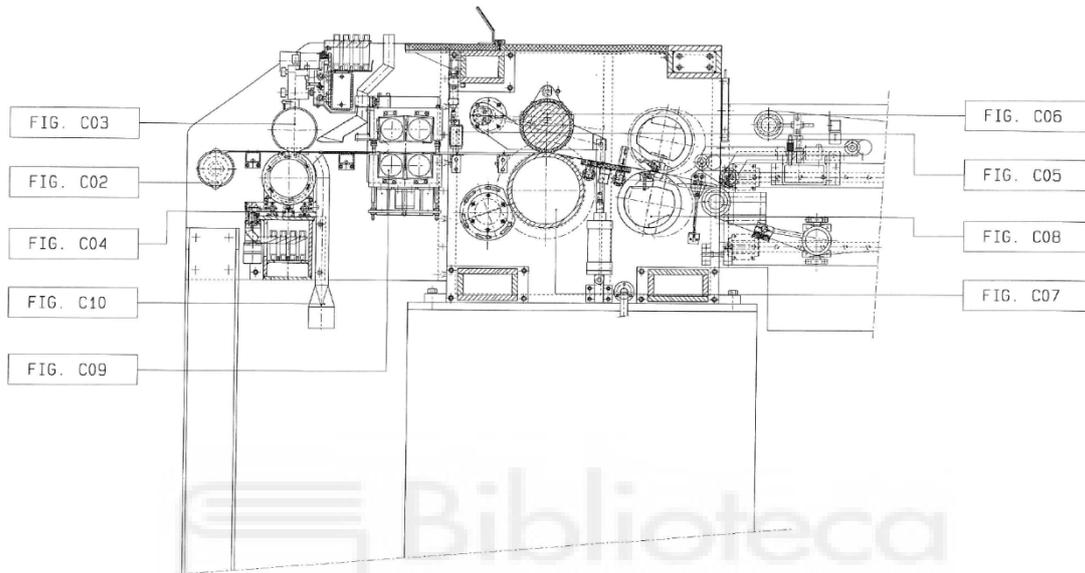


Ilustración 17. Plano corte longitudinal y sincronizado

Este grupo es el más complejo de la máquina, aquí es donde se producen los cortes longitudinales (subgrupo C03 y subgrupo C04) y transversal (subgrupo C08), además de encontrarse los rodillos traccionadores o prensa de ajuste y accionamiento (subgrupo C07) que tiran del papel aplicando una tensión que hará que se desenrolle la bobina y permitirá su estirado por el paso a través de los rodillos del grupo B. A continuación, se mostrarán los planos más detallados de los subgrupos más importantes de este conjunto mecánico.

9.1.3.1. SUBGRUPO C03 Y C04: CORTE LONGITUDINAL SUPERIOR E INFERIOR.

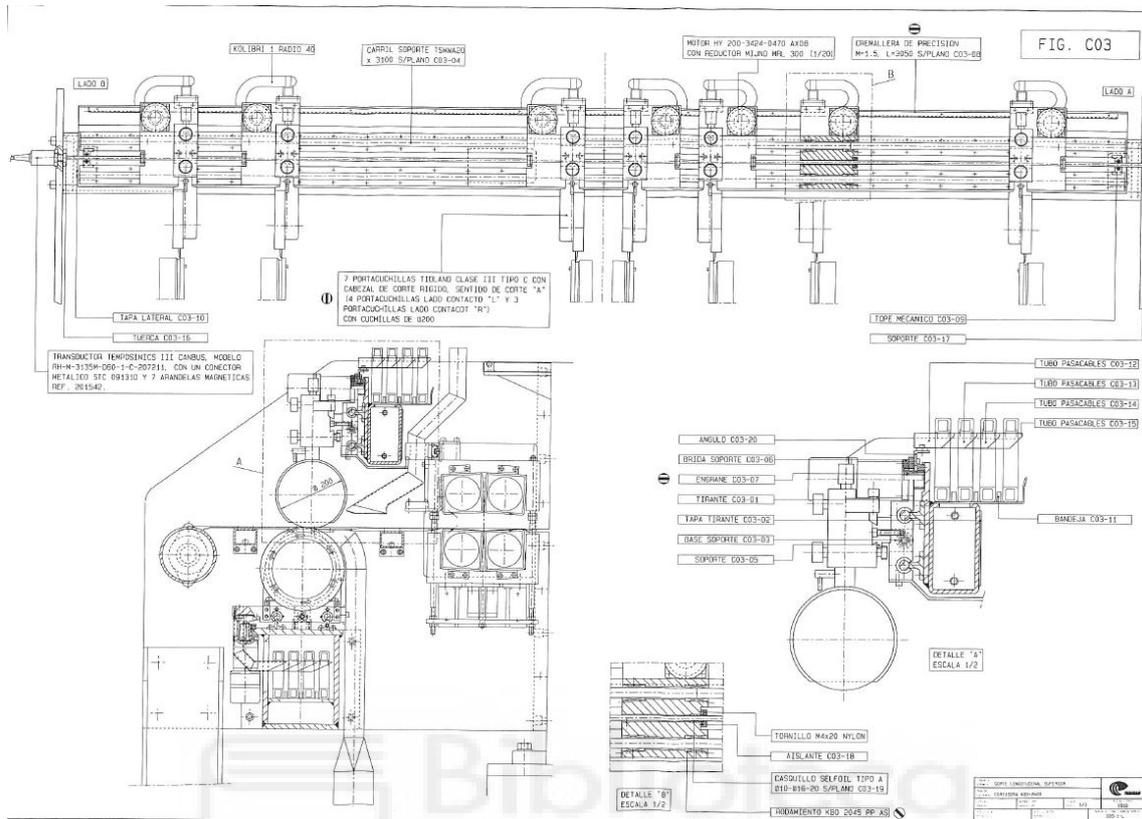


Ilustración 18. Plano cuchillas longitudinales superiores

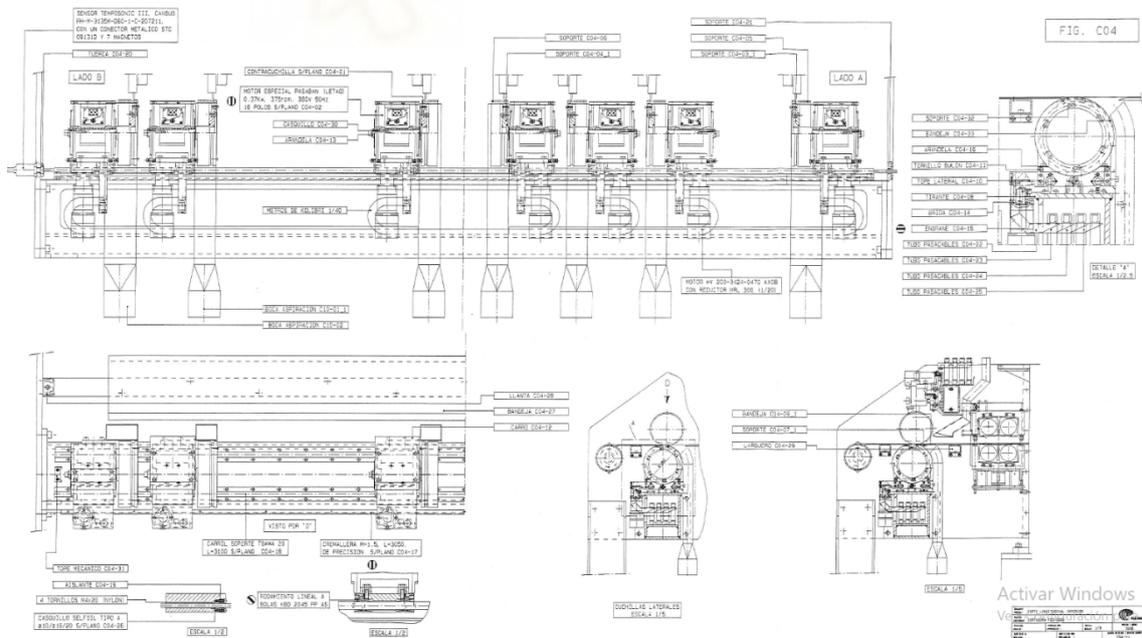


Ilustración 19. Plano cuchillas longitudinales inferiores

Este subconjunto se trata de un complejo mecanismo de precisión mediante el cual se puede ajustar la distancia del ancho del corte con una tolerancia de menos de 1 milímetro. No disponemos de material adecuado ahora mismo para la monitorización de los parámetros más relevantes de estas cuchillas, sin embargo se ha hablado de la posibilidad de poner pequeños sensores de vibración o de ultrasonidos conectados al PLC de la máquina, de tal manera que den una señal de alarma al sobrepasar unos niveles concretos. Se ha planteado esta medida debido a la gran importancia que tienen estas cuchillas para asegurar la calidad del producto final.

9.1.3.2. SUBGRUPO C07: PRENSA DE ARRASTRE Y ACCIONAMIENTO.

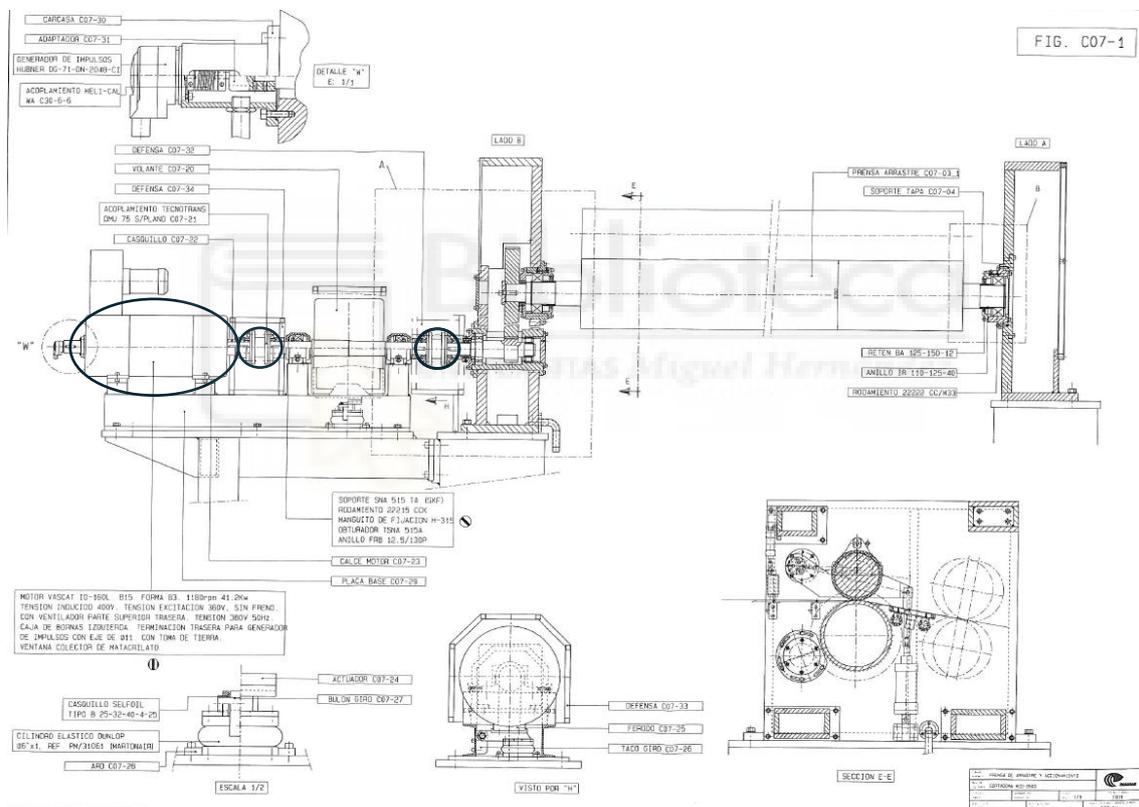


Ilustración 20. Plano presa de arrastre y accionamiento

Esta parte de la máquina se trata de los rodillos traccionadores o prensa de accionamiento y ajuste. Este subconjunto es el encargado de proporcionar la tensión necesaria para arrastrar el papel mediante el paso de este a través de dos rodillos que actuando a modo de prensa giran y tiran de él. La tracción se consigue mediante la goma que recubre los cilindros.

En esta parte será importante el monitorizado del motor que proporciona la potencia al rodillo de tracción, los apoyos de los ejes de ambos rodillos y el desgaste de la goma que los recubre.

En este grupo, se monitorizarán periódicamente las vibraciones tanto del motor como de los apoyos sobre los que se sostiene el eje.

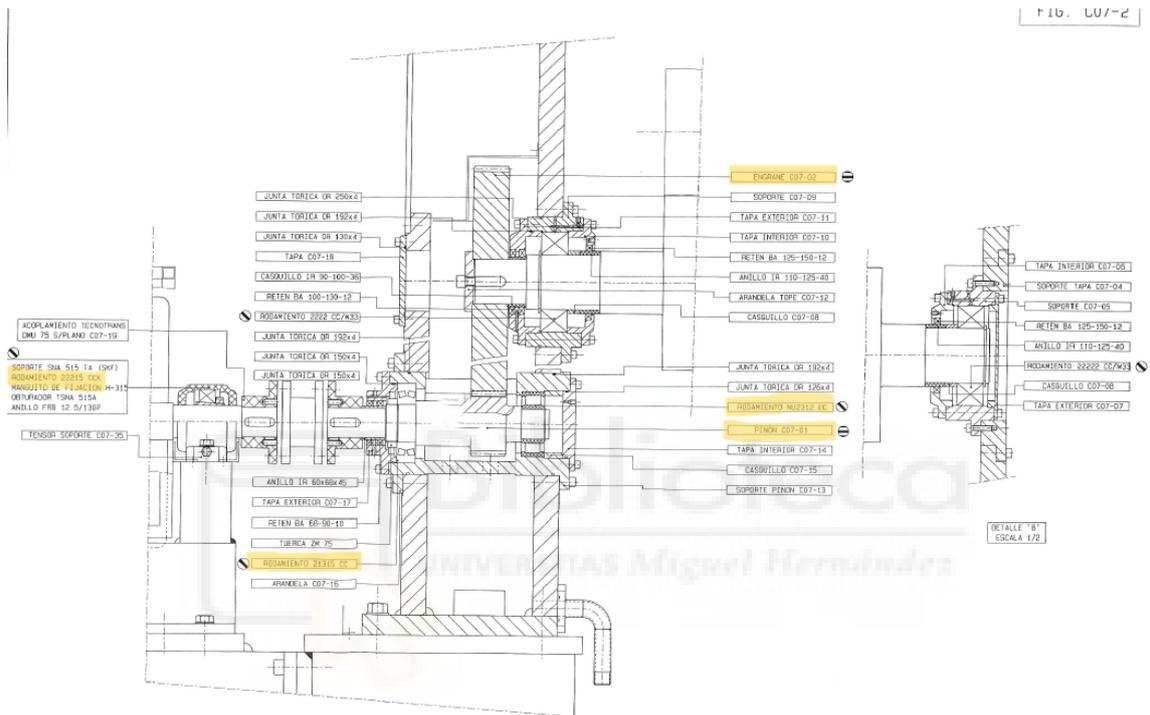


Ilustración 21. Plano transmisión del motor a rodillo de tracción

Es importante conocer los elementos mecánicos que componen esta parte, en especial los elementos que giran con el eje del motor (piñón C07-01) transmitiendo el movimiento giratorio a otros elementos (engrane C07-02) o que permiten su giro (rodamientos 22215-CCK, 2135-CC, UN 2312 ECP)

9.1.3.3. SUBGRUPO C08: CORTE SINCRONIZADO.

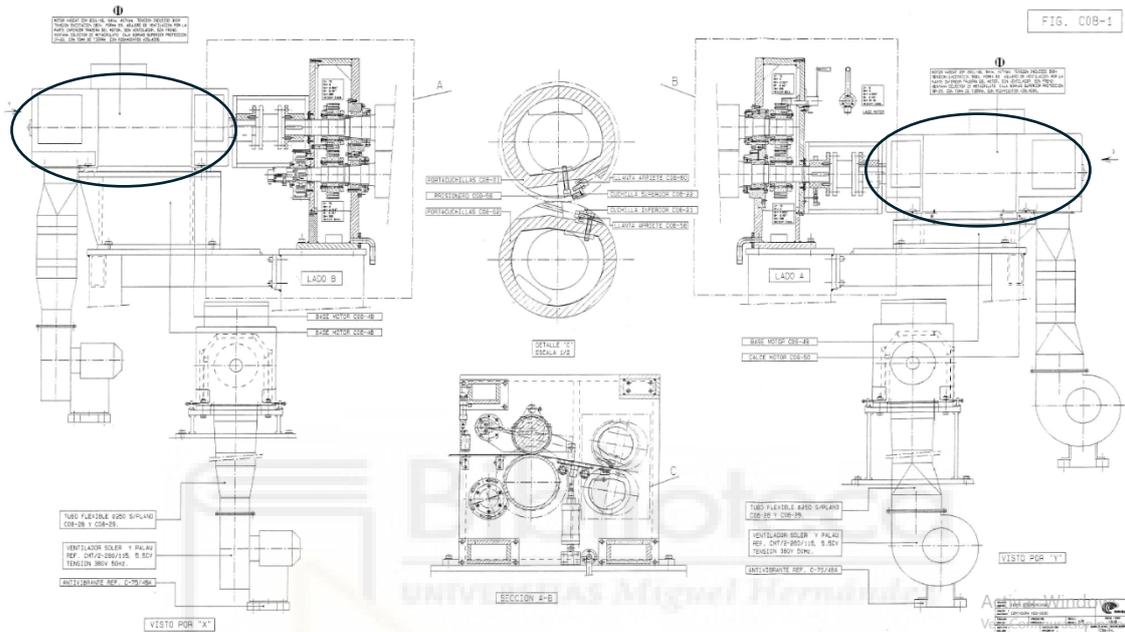


Ilustración 22. Plano corte transversal sincronizado

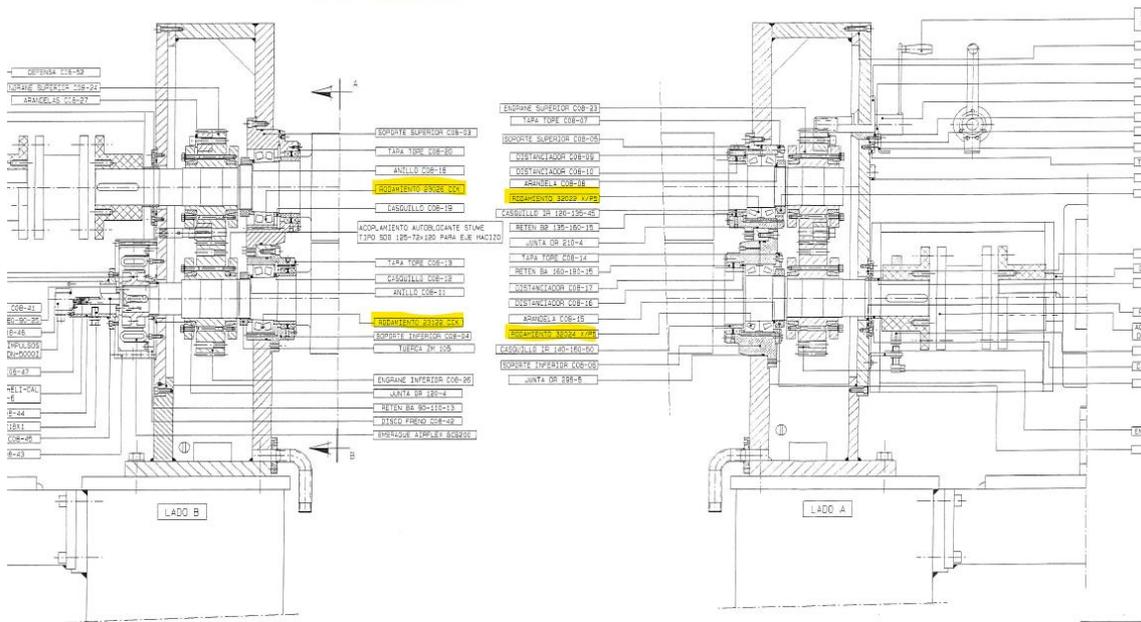


Ilustración 23. Despiece corte transversal sincronizado

Se trata de la parte más importante de la máquina y por lo tanto será la parte a la que tendremos que prestar especial atención. Está compuesta por dos rodillos de igual diámetro, cada uno tiene una cuchilla que se extiende sobre toda la longitud del rodillo, estas cuchillas están sincronizadas a través de un enconder de alta precisión, que usan para conocer la posición exacta en la que se encuentran ya que cada una tiene un motor y un variador propio e idénticos entre sí. Son motores de grandes dimensiones con un sistema de refrigeración aparte.

En este subgrupo monitorizaremos las vibraciones de los motores de los rodillos de las cuchillas.

9.1.4. GRUPO D: SALIDA.

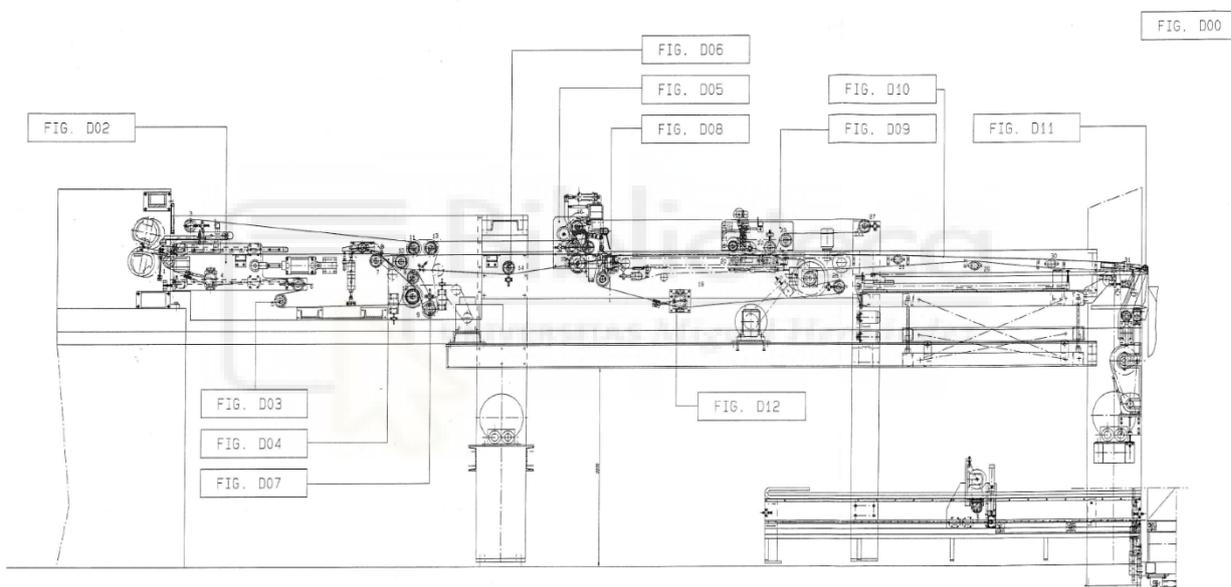


Ilustración 24. Plano salida del corte

En este grupo un conjunto de cintas se encarga de transportar el papel desde que abandona la cuchilla transversal hasta que llega a la sección de apilado. Se trata de un grupo en el que tenemos muchos elementos rotativos entre los que se cuentan un total de más de 30 rodillos. Se realizará el monitorizado del motor encargado del movimiento de los rodillos motrices. Será importante también en este grupo la inspección visual de las correas de transmisión, así como de los rodillos y de las cintas transportadoras movidas por estos rodillos para detectar daños superficiales que puedan derivar en una avería que comprometa la calidad del producto o nos obligue a realizar una pausa no programada para una reparación o sustitución.

9.1.4.1. SUBGRUPO D07: TRANSMISIÓN CINTAS RÁPIDAS.

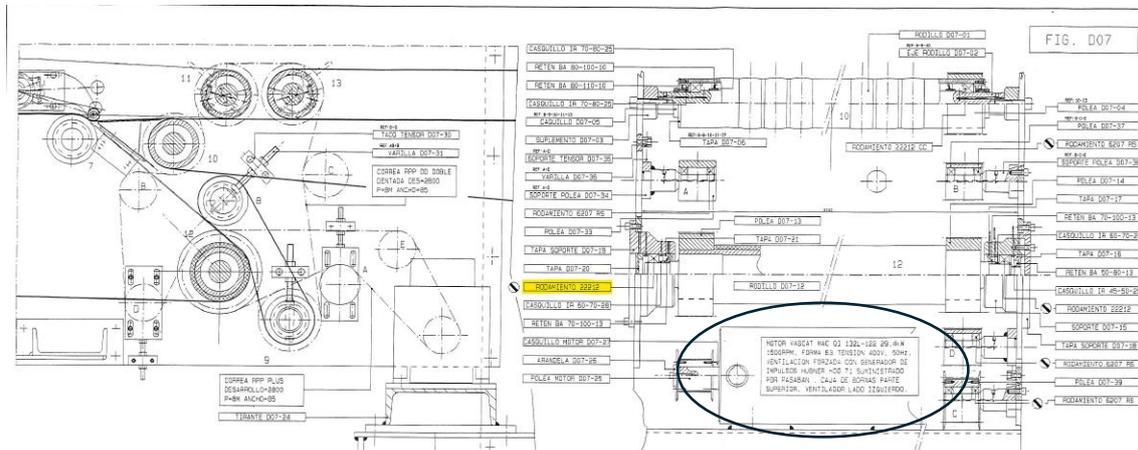


Ilustración 25. Plano despiece cinta rápida

En este subgrupo tenemos 11 rodillos que son accionados por un motor de 4KW a 1500 rpm. Se monitorizarán los rodillos a los que tengamos fácil acceso y las vibraciones del motor. Al igual que en el resto de casos en los que se realizará un análisis periódico de las vibraciones en la carcasa del motor, esto se hace con la intención de conocer la situación en la que se encuentra y tener una idea aproximada de cuando se debe hacer la sustitución del mismo así como otras reparaciones o tareas de mantenimiento que se le deban hacer, permitiendo así una mayor organización para el almacén de repuestos y evitando en la medida de lo posible las paradas no programadas por fallos derivados del deterioro.

9.1.4.2. SUBGRUPO D08: CAJA ASPIRANTE DE CORREA PERFORADA.

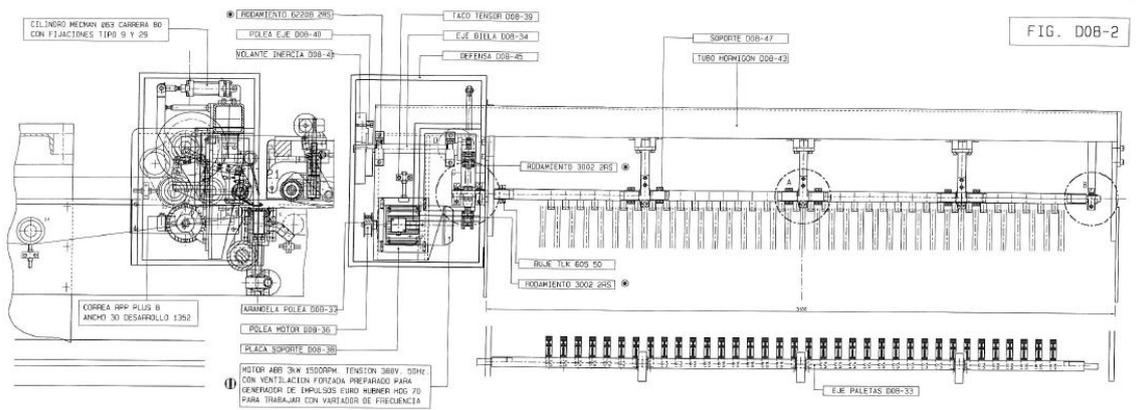


Ilustración 26. Plano caja aspirante de correa perforada

En esta sección el aire a presión pasa a través de una serie de tubos empujando el papel contra la cinta para evitar que se levante debido al roce con el aire cuando es transportado por la cinta. Las revisiones de estos tubos se harán de manera visual, comprobando que los tubos no se encuentren obstruidos. Por otro lado, monitorizaremos periódicamente las vibraciones del motor de soplado

9.1.4.3. SUBGRUPO D09: GRUPO DE SUPERPOSICIÓN.

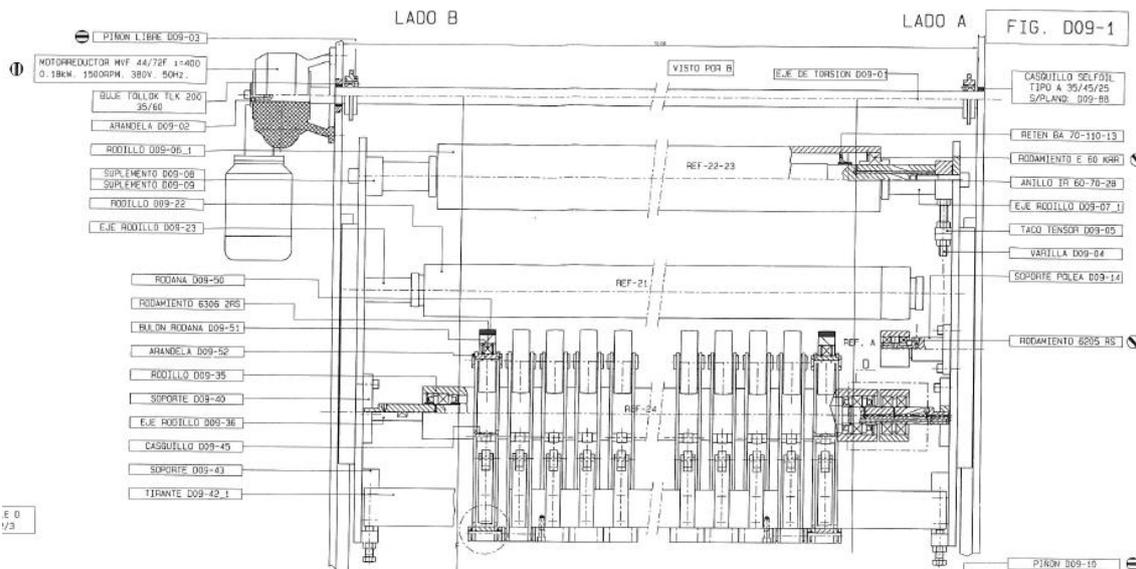


Ilustración 27. Plano grupo superposición

9.1.4.3. SUBGRUPO D10: BANDA LENTA Y TRANSMISIÓN.

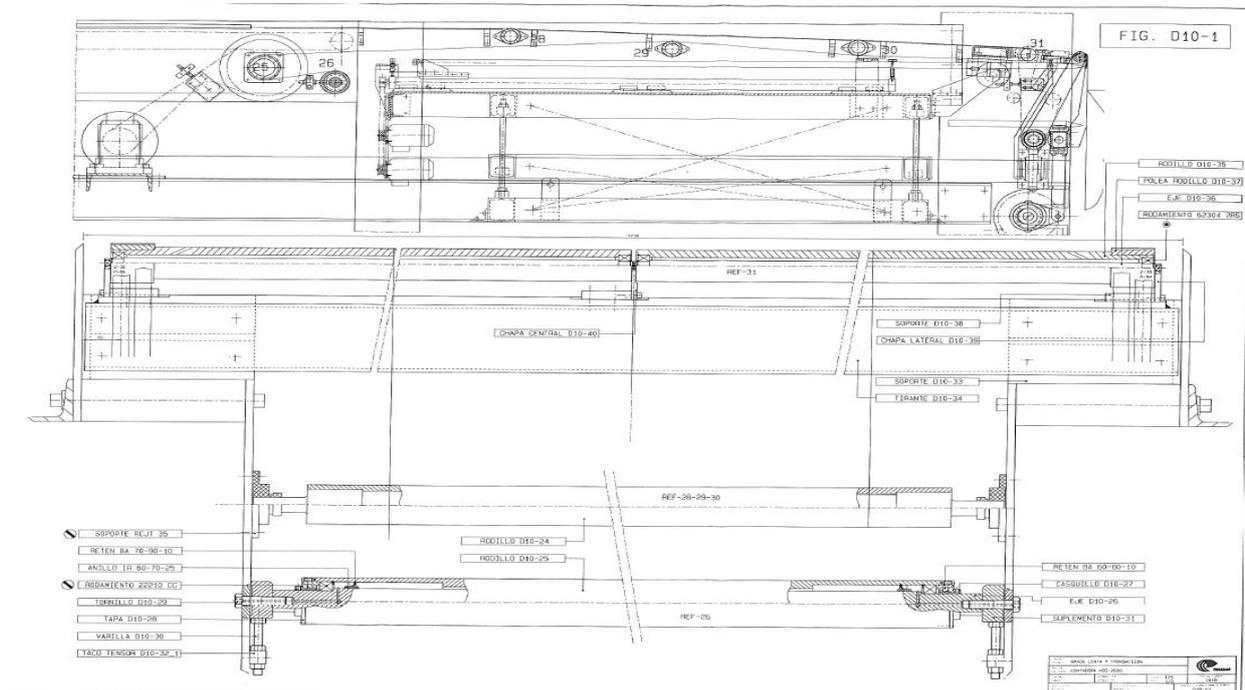


Ilustración 28. Plano conjunto cinta lenta

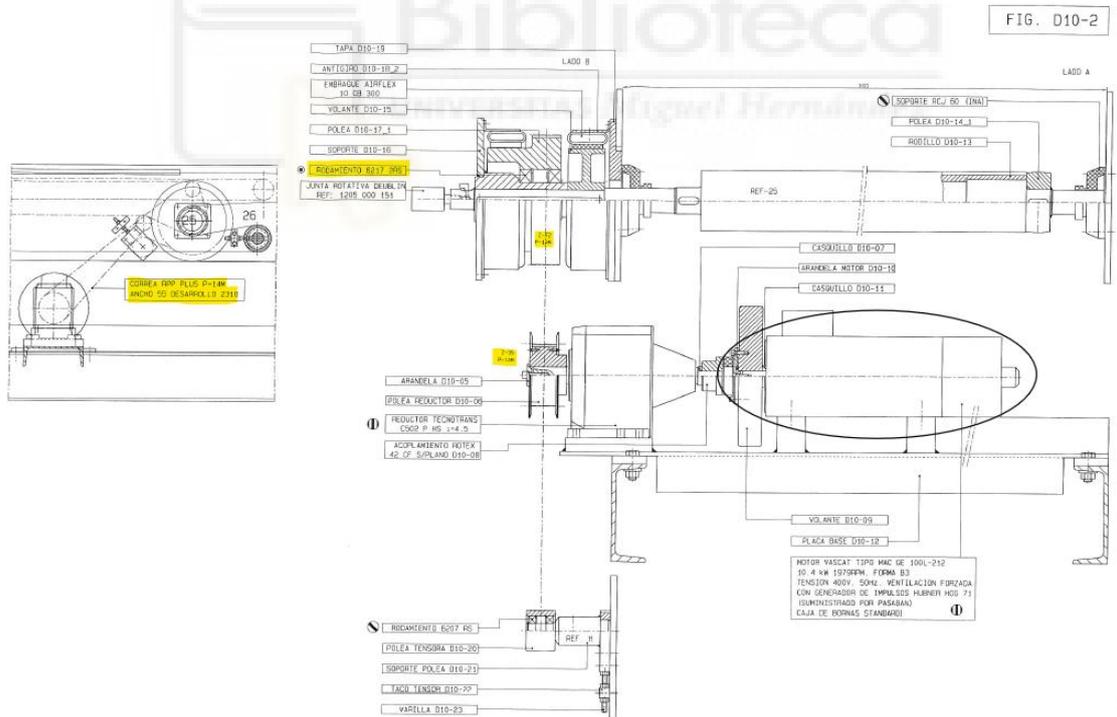


Ilustración 29. Plano motor cinta lenta

En este subgrupo los trozos de papel cortado se superponen uno encima del otro gracias a la diferencia de velocidad entre la cinta rápida y la lenta. En esta parte de la máquina tenemos un motor de 10,4 KW que mediante una polea y una correa moverá el rodillo motriz que a su vez moverá la cinta, haciéndola pasar por un conjunto de rodillos y transportando así el papel hacia el grupo de expulsión. Será crucial, por lo tanto, el monitorizado de las vibraciones del motor que nos podrán dar una idea del nivel de desgaste de los elementos que lo componen.

9.1.5. GRUPO E: APILADO.

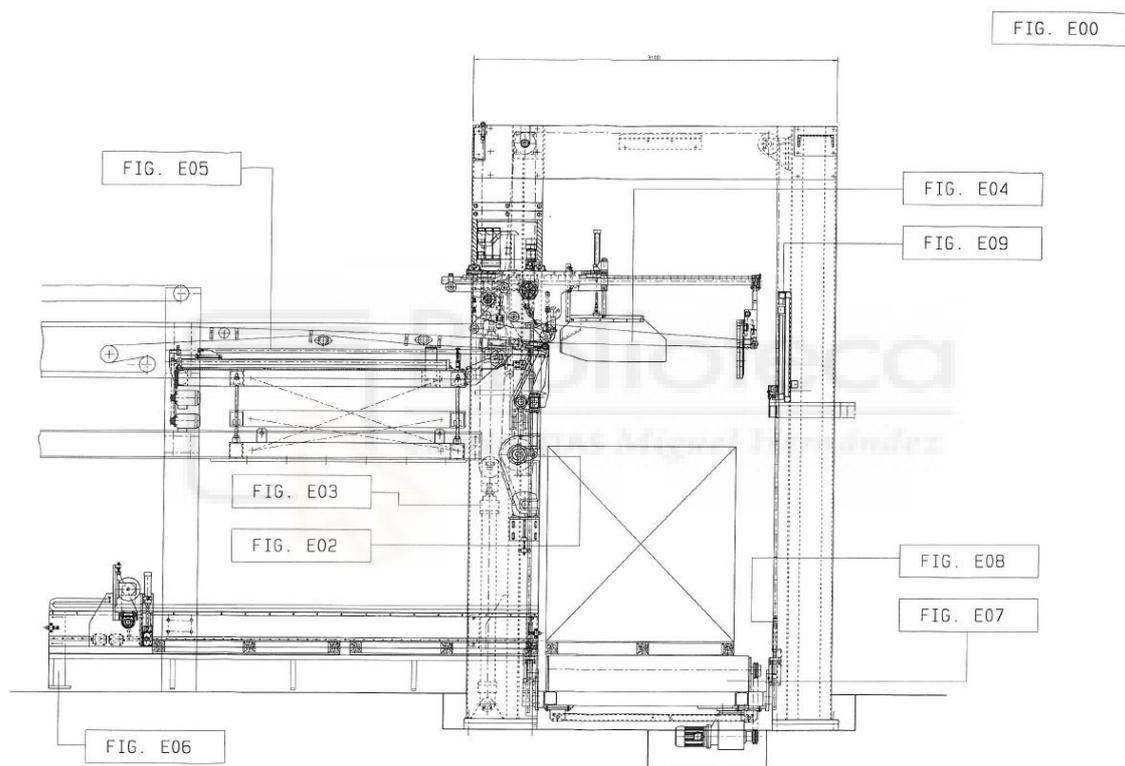


Ilustración 30. Plano grupo apilado

Como su nombre indica en este último grupo el papel ya cortado en las dimensiones correspondientes se apila sobre un palé que posteriormente será enviado a la máquina flejadora o Thimon.

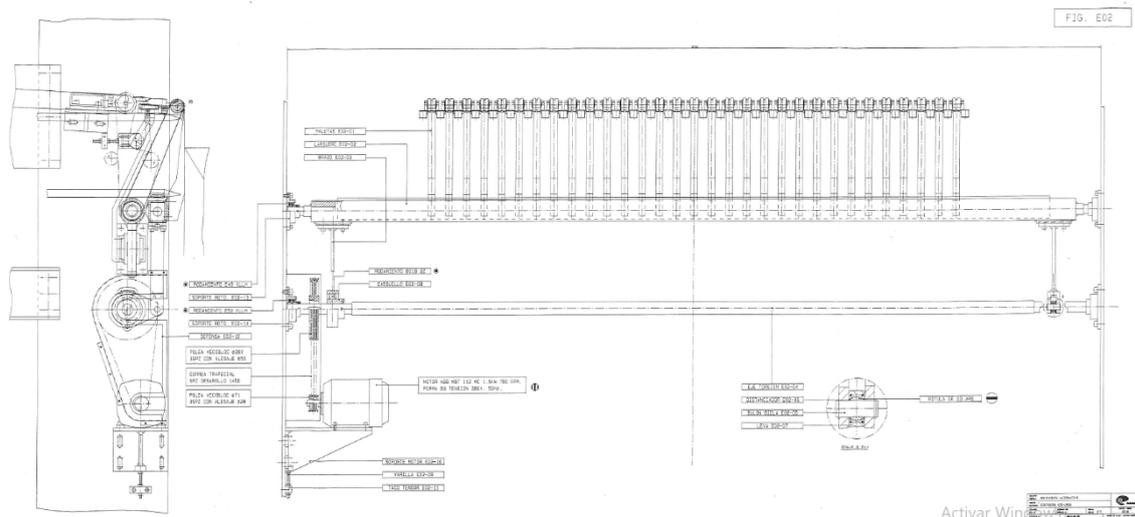


Ilustración 31. Plano despiece rodillo de torsión

Será el motor encargado de mover el rodillo de torsión en esta parte de la máquina.

9.2. THIMON

Esta se trata de una máquina muy nueva y como ya se ha comentado previamente el manual de mantenimiento está muy detallado, además la máquina incluye diversos sensores que conectados a las entradas del PLC nos permiten monitorizar varios puntos de la máquina. Es por esto y por las razones de seguridad y criticidad comentadas previamente que se ha decidido que el conjunto mecánico que deberá ser monitorizado en esta máquina será el horno

En el horno de esta máquina tendremos varios elementos que deberán ser monitorizados para realizar su correcto mantenimiento predictivo.

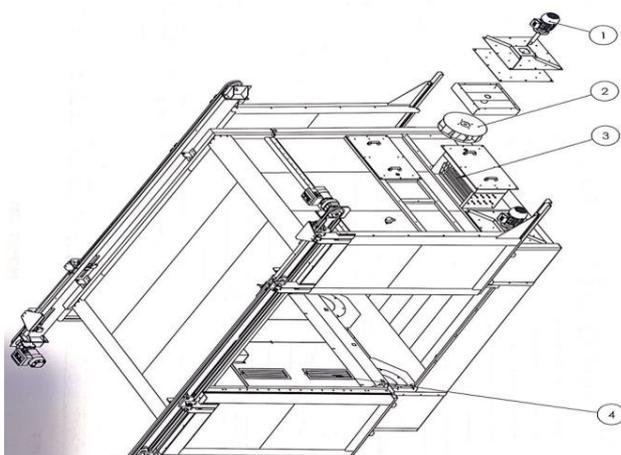


Ilustración 32. Plano horno

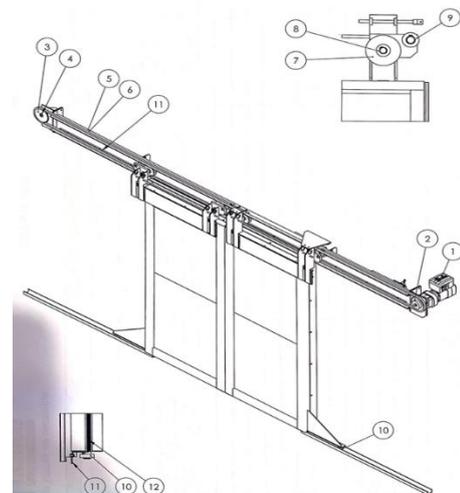


Ilustración 33. Plano puerta horno

En la ilustración 32 podemos ver el horno y las partes numeradas se refieren a los elementos que permiten el aumento de la temperatura en su interior:

Motor: Se trata de un pequeño motor que moverá el ventilador.

Ventilador: El ventilador movido por el motor se encargará de introducir el aire caliente proveniente de la resistencia en el interior del horno.

Resistencia: La resistencia proporciona el calor que, aspirado por el ventilador, se introduce en el interior del horno para aumentar así su temperatura.

Rejilla de aspiración: Expulsa aire caliente del interior del horno.

En la ilustración 33 podemos observar el mecanismo que permite la apertura y el cierre de las puertas del horno. A continuación, mencionaremos los elementos más relevantes y críticos de estas puertas.

Motor: Mediante un sencillo sistema de cadenas y piñones permite la apertura y el cierre de las puertas.

Piñones: Conectados a las cadenas, estos elementos transmitirán el movimiento desde el motor a la cadena

Rodamiento: Permite el giro del piñón sobre su propio eje. También son rodamientos los elementos 8, 9 y 10.

Cadena: Conectada a los piñones y a los rodillos de las puertas, convierte el movimiento de rotación del motor en el movimiento lineal que permite la apertura de estas.

10. PUESTA EN MARCHA.

En el presente apartado se mostrará la manera en la que se ha realizado el análisis de los datos obtenidos mediante los diferentes métodos de monitorización.

10.1. DATOS CARACTERÍSTICOS.

Mostraremos los datos más relevantes para tener en cuenta a la hora de realizar el análisis, como puedan ser las frecuencias de deterioro de las pistas de los rodamientos o las frecuencias propias de engrane. Para ello se ha creado un excel en el que a partir de los datos de velocidad, así como dimensiones y características principales de estos elementos

rotativos se pueden detectar diferentes fallos en función de las frecuencias a las que se encuentran los picos de vibración.

10.2. TOMA DE DATOS

10.2.1. THIMON

En la máquina de embalaje denominada Thimon, el monitorizado se va a hacer mediante termografía que nos va a permitir detectar posibles fugas de calor o cambios significativos inintencionados en la temperatura del horno. Para ello contamos con la cámara termográfica anteriormente descrita que usaremos para analizar la temperatura de las paredes del horno en funcionamiento desde todos los ángulos posibles y a una distancia segura.

A continuación, se muestran las imágenes del horno funcionando en condiciones normales a las 3h 25 min de haberse encendido. Estas imágenes han sido obtenidas con la cámara térmica incorporada en el smartphone CAT S60 al que se hace referencia en el apartado 5.3.

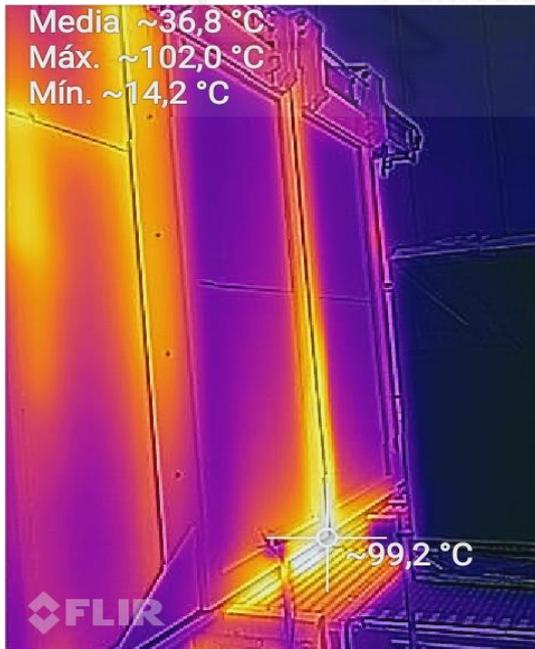


Ilustración 35. Entrada



Ilustración 34. Salida

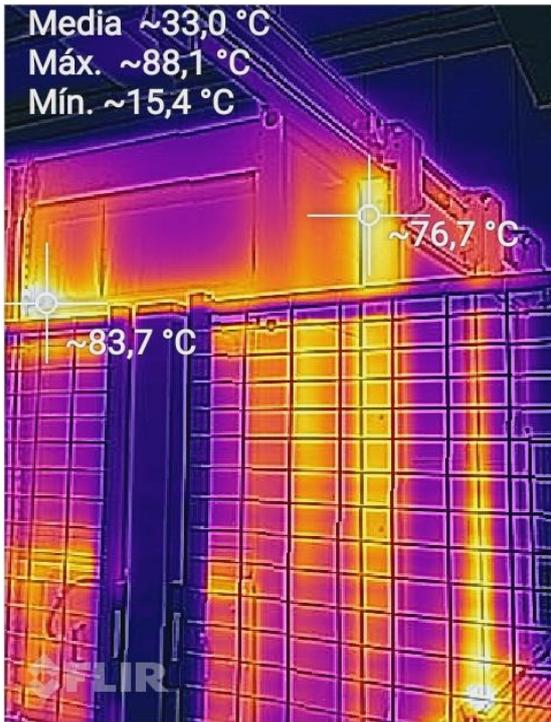


Ilustración 37. Lado izquierdo desde la entrada



Ilustración 36. Lado izquierdo desde la salida



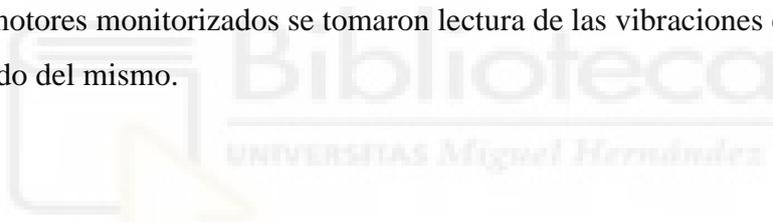
Ilustración 38. Lado derecho

10.2.2. RESMADORA.

En esta máquina tenemos cientos de elementos rotativos de modo que por razones de eficiencia e inaccesibilidad nos será imposible realizar el monitorizado de las vibraciones de todos ellos. Siendo esto así, se ha realizado una selección de los elementos que se tendrán en cuenta en este plan en base al histórico de averías y detalles proporcionados por el técnico de mantenimiento que debido a su amplia experiencia tanto con esta máquina como con otras parecidas he tenido en importante consideración.

En la máquina resmadora se ha realizado el monitorizado de 7 motores diferentes, para lo cual, se realizó un primer análisis de vibraciones el día 15-11-2024 y otro el día 20-12-2024. Durante este tiempo la máquina estuvo trabajando una media de 14 horas al día durante 6 días a la semana. Se va a realizar el estudio de los datos obtenidos en el análisis de las vibraciones para los motores más grandes, críticos (en función de las partes de la máquina que se encargan de mover), y difíciles de sustituir que hay en esta resmadora.

En todos los motores monitorizados se tomaron lectura de las vibraciones en lado libre y el lado acoplado del mismo.



10.2.2.1 MOTOR DEL RODILLO DE TRACCIÓN O PRENSA (RTM).

Se trata del motor perteneciente al subgrupo C07, prensa de arrastre y accionamiento: motor Vascat ID-160L. B15. Forma B3. 1180rpm 41,2Kw. Tensión inducida 400V. Tensión de excitación 360V.



Ilustración 39. Motor de prensa y arrastre de accionamiento

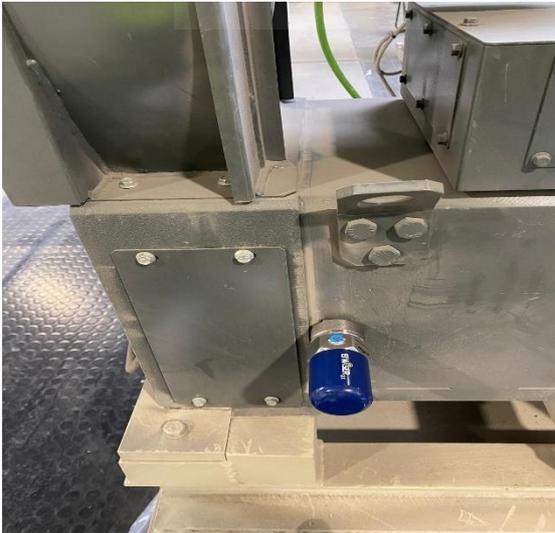
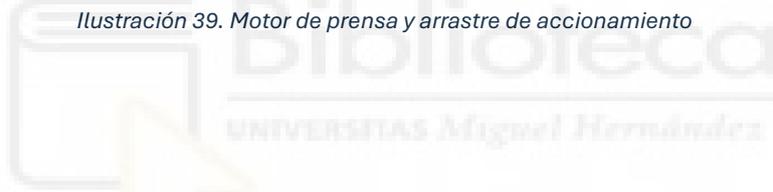


Ilustración 41. Lado libre



Ilustración 40. Lado acoplado

El eje que mueve este motor se sostiene en dos apoyos que también hemos estudiado.



Ilustración 43. Apoyo 1



Ilustración 42. Apoyo 2

10.2.2.2. MOTORES DE LA CUCHILLAS.

Se trata de un conjunto de dos servomotores iguales pertenecientes al subgrupo C08, corte sincronizado, cuya función es la de realizar el corte transversal del papel a la medida indicada.

Ambos servomotores son idénticos: motor Vascat IDM 250L – 16,94kw, 417rpm. Tensión inducida 300V. tensión excitación 360V. Forma B3. Se sincronizan mediante encoder.

MOTOR 1



Ilustración 46. Imagen motor cuchilla

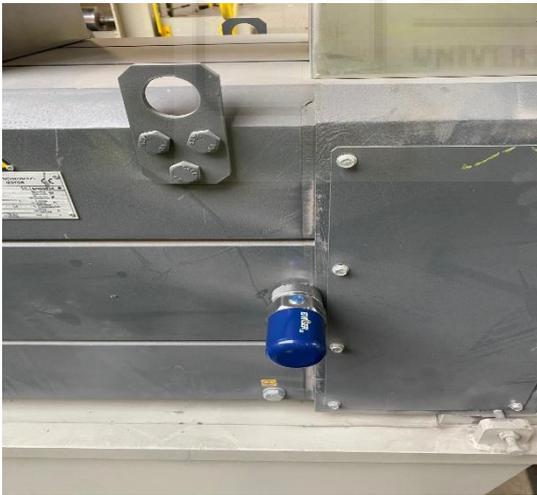


Ilustración 45. Lado libre



Ilustración 44. Lado acoplado

MOTOR 2.

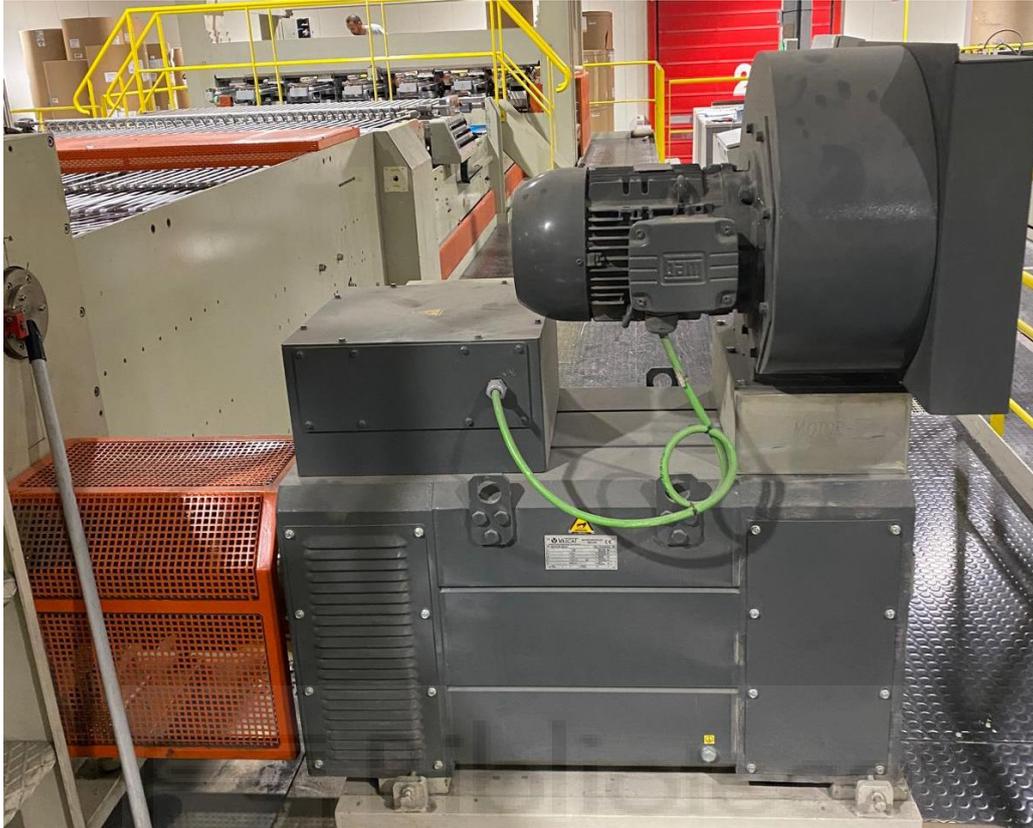


Ilustración 47. Imagen motor cuchilla



Ilustración 49. Lado libre motor cuchilla



Ilustración 48. Lado acoplado motor cuchilla

10.2.2.3 MOTOR CINTA RÁPIDA.

Se trata del motor encargado de mover la cinta que transporta el papel a la salida de las cuchillas de corte transversal. Pertenece al subgrupo D07, transmisión cintas rápidas: motor Vascat mac QI 132L-122 29,4Kw 1500rpm. Forma B3. Tensión 400V. 50Hz.

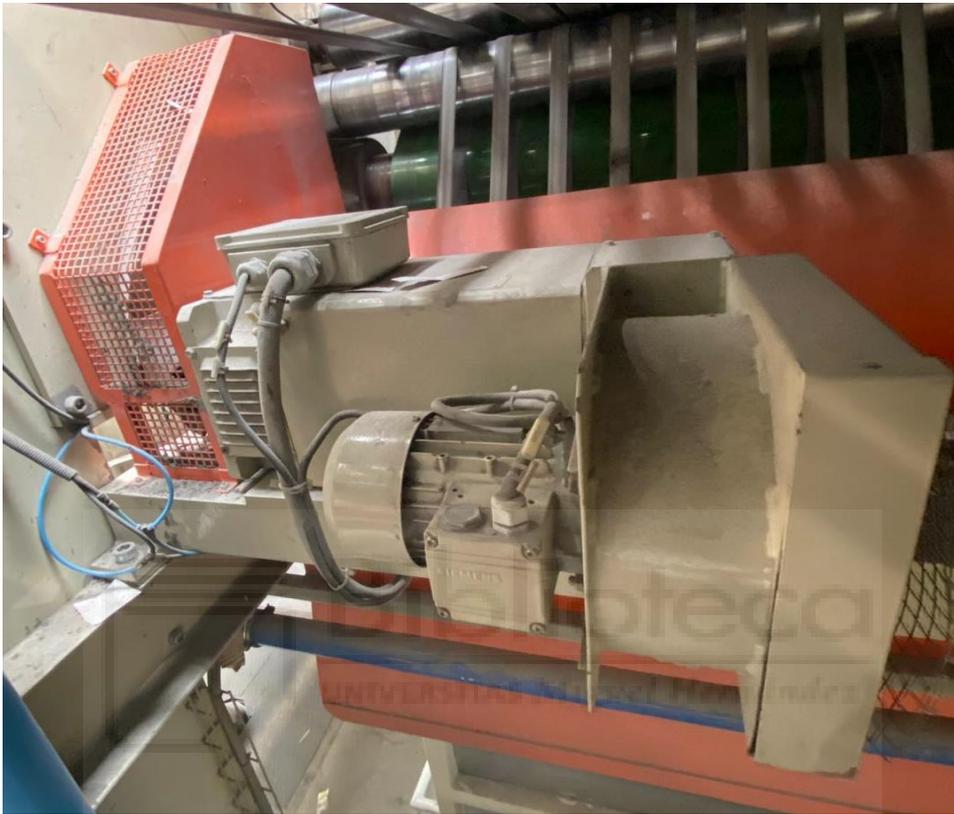


Ilustración 50. Imagen motor cinta rápida



Ilustración 52. Lado libre



Ilustración 51. Lado acoplado

10.2.2.4. MOTOR CINTA LENTA.

Se trata del motor encargado de mover la cinta lenta, en la cual el papel se coloca superpuesto debido a la diferencia de velocidad de esta cinta con la cinta rápida. Motor Vascat tipo mac QE 1001-212 10,4KW 1979rpm. Forma B3 Tension 400V. 50Hz.



Ilustración 53. Imagen motor cinta lenta



Ilustración 55. Lado libre



Ilustración 54. Lado acoplado

11. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Después de recoger meticulosamente los datos de vibración de una máquina que presenta problemas, el próximo paso es identificar la causa subyacente. Esto nos permite planificar la reparación más eficiente posible, tanto en términos de coste como de efectividad.

Habitualmente, para localizar un defecto, comparamos las amplitudes de las vibraciones registradas. Una máquina en buen estado suele mostrar valores de vibración que mantienen una tendencia constante o ligeramente ascendente. Sin embargo, si observamos un aumento brusco o una tendencia ascendente inusual en estos valores, es señal de que algo no va bien. Generalmente, lo primero que se examina es la velocidad. Un aumento repentino en la velocidad suele indicar problemas. En la mayoría de los casos, altos niveles de energía de impulsos son típicos de fallos en rodamientos, acoplamientos, y en situaciones menos comunes, problemas hidráulicos.

Es común que la máxima amplitud de vibración se localice en el punto donde reside el problema, aunque a veces la vibración se propaga a otras partes de la máquina. Analizar estas gráficas nos ayuda a deducir el tipo de defecto, aunque raramente los problemas son únicos y claros en los espectros. Aquí es donde la experiencia y el conocimiento detallado de la máquina se vuelven cruciales para determinar la causa de vibraciones significativas. Una vez solucionado el problema, es vital seguir de cerca la evolución de la reparación. Esto nos confirma si el defecto estaba realmente donde indicaban las vibraciones máximas y, lo que es más importante, si el problema ha sido completamente resuelto. Analizar los datos de vibraciones y sus espectros es fundamental para descubrir las causas y cómo corregirlas.

Además, es esencial prestar atención a las vibraciones que vienen acompañadas de otros síntomas, como ruido o pérdida de aceite. Los valores de amplitud excesivos, en comparación con un funcionamiento normal, también requieren un análisis detallado de los espectros para identificar las causas de los problemas. Los problemas mecánicos más comunes que generan vibraciones incluyen desequilibrio entre ejes, alineación incorrecta

de acoplamientos, defectos en rodamientos y engranajes, y problemas eléctricos. Identificar estos problemas a través del análisis de vibraciones y espectros es el próximo paso clave.

11.1. THIMON

En esta máquina, realmente ha interesado más hacer un mantenimiento preventivo con el manual del fabricante, ya que como se ha comentado anteriormente, se trata de un manual muy completo y con las acciones de mantenimiento muy bien organizadas.

Dicho esto, si que es muy importante llevar a cabo un monitorizado del horno, razón por la cual se han realizado las fotografías termográficas con la intención de un análisis periódico con la misma herramienta, que además se trata de un recurso del que ya se dispone en la empresa.

11.2. RESMADORA



11.2.1. RODILLO DE TRACCIÓN O PRENSA,

11.2.1.1. MOTOR DEL RODILLO DE TRACCIÓN O PRENSA (RTM).

Para el estudio de los espectros de vibraciones obtenidos del monitorizado de este motor, es importante conocer la velocidad a la que estaba funcionando en el momento del análisis. Sabemos que en el primer análisis la velocidad de producción de la máquina era de 60 m/min en ambas mediciones, por lo que:

$$DRT = 350 \text{ mm}$$

$$DESRT = 350 * \pi = 1099,56 \text{ mm} \approx 1,1 \text{ m}$$

$$\text{RPM (RT)} = 60/1,1 = 54,55 \text{ RPM}$$

Una vez tenemos la velocidad de rotación del rodillo de tracción debemos calcular la relación de transmisión entre el rodillo de tracción y el eje del motor. Esto lo hacemos

con la relación de diámetros del engranaje (525mm) y del piñón (105mm) que es 1:5. Lo que nos indica que la velocidad de giro del motor será de:

$$54,55 \times 5 = 272,75 \text{ RPM}$$

Como el análisis de los espectros de vibración se va a hacer en Hz pasaremos esta velocidad a Hz:

$$272,75 / 60 = 4,55 \text{ Hz}$$

Teniendo en cuenta esta velocidad de giro para buscar los armónicos se ha hecho un análisis de los espectros de vibraciones obtenidos del lado libre y el lado acoplado del motor. Las siguientes imágenes representan los espectros de frecuencia tomados sobre tres ejes distintos (según el criterio de la ilustración siguiente) del lado libre y el lado acoplado del motor de estudio, uno al lado del otro a modo de comparación, con una diferencia de 35 días entre ambas medidas.

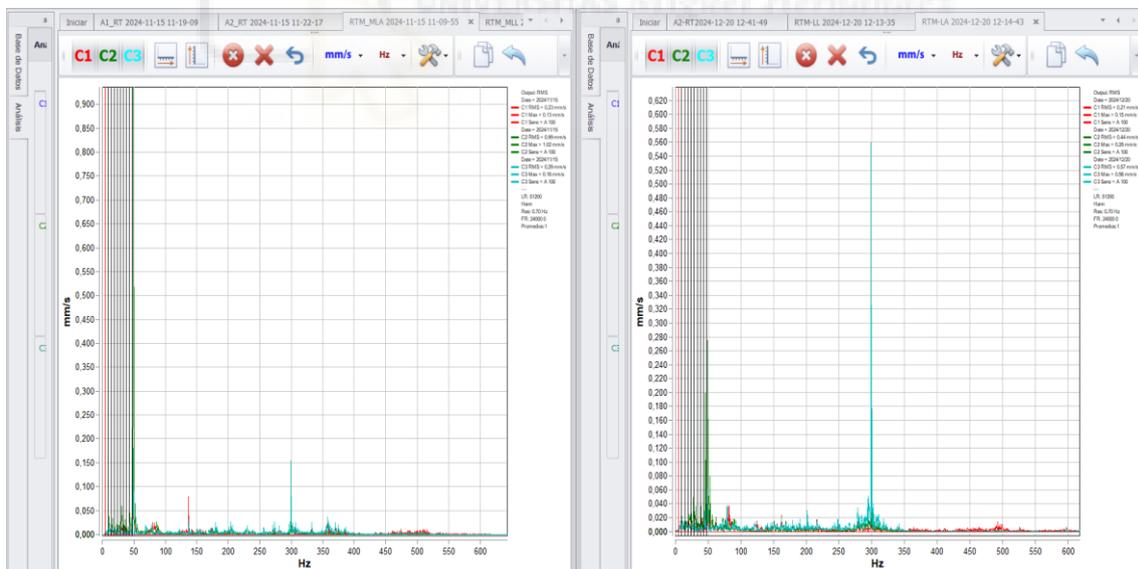


Ilustración 56. Monitorizado motor rodillo de tracción lado acoplado

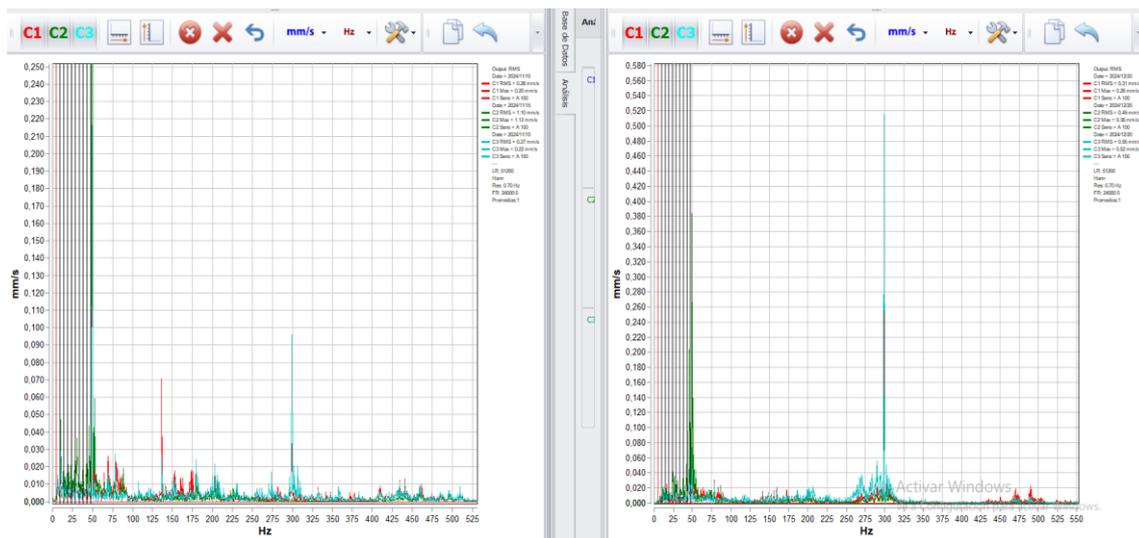


Ilustración 57. Monitorizado motor rodillo de tracción lado libre

En las imágenes de los espectros hemos señalado la velocidad de giro del motor y sus 10 primeros armónicos. En este estudio se plantea la posibilidad de que los picos que se puede observar en el espectro a 49,072 Hz puedan ser síntoma de un problema mecánico, sin embargo, al no coincidir la frecuencia con la del armónico de ninguno de los problemas considerados y siendo este pico tan anormal en amplitud y presentándose en gran parte de las medidas tomadas, independientemente del motor, o la velocidad de giro, se ha optado por considerarlo como ruido electrónico, lo cual parece la opción más probable teniendo en cuenta que en la máquina hay numerosos elementos electrónicos funcionando a la frecuencia de 50 Hz, por lo que en adelante no se hará referencia a los picos en estas frecuencias que se considere puedan derivar de este ruido. Se puede apreciar un progresivo aumento en la amplitud de la vibración en estos primeros armónicos, lo que podría ser indicativo de una ligera desalineación, que además no se ha visto aumentada, basándonos en los valores de la amplitud de la vibración a las mismas frecuencias 35 días después.

Resulta interesante hablar también de un pico de importante amplitud a 300 Hz, el cual no se corresponde con ningún armónico de la velocidad de giro ni con los armónicos de engrane o los correspondientes a los fallos en rodamientos al menos de los que tenemos datos ya que por desgracia nos ha resultado imposible acceder a los planos de despiece

de los motores. Sin embargo, teniendo en cuenta que el valor de la amplitud de la vibración en esta frecuencia disminuye cuando consideramos puntos cada vez más alejados del lado libre del motor, se ha considerado que puede ser un problema asociado al rodamiento sobre el que se apoya el eje del motor en este lado. Se puede apreciar tanto en el lado libre como en el lado acoplado el valor de la amplitud de la vibración en esta frecuencia ha aumentado significativamente, indicando un claro aumento del problema. También podemos hablar de que se trate de una posible frecuencia natural del sistema, ya que como se verá en los análisis del resto de elementos, encontraremos más picos inusuales a esta frecuencia. Basándonos en esta otra posible teoría, el hecho de que se vea amplificado su valor en la medida realizada 35 días después, puede deberse a que con el aumento de la velocidad de funcionamiento de las cuchillas, como se explica más adelante, el valor de la vibración en este pico también se vea aumentado.

11.2.1.2. APOYOS

La siguiente imagen muestra los espectros de frecuencia del apoyo 1 tomados sobre tres ejes, uno al lado del otro a modo de comparación con una diferencia de 35 días entre ambas medidas.

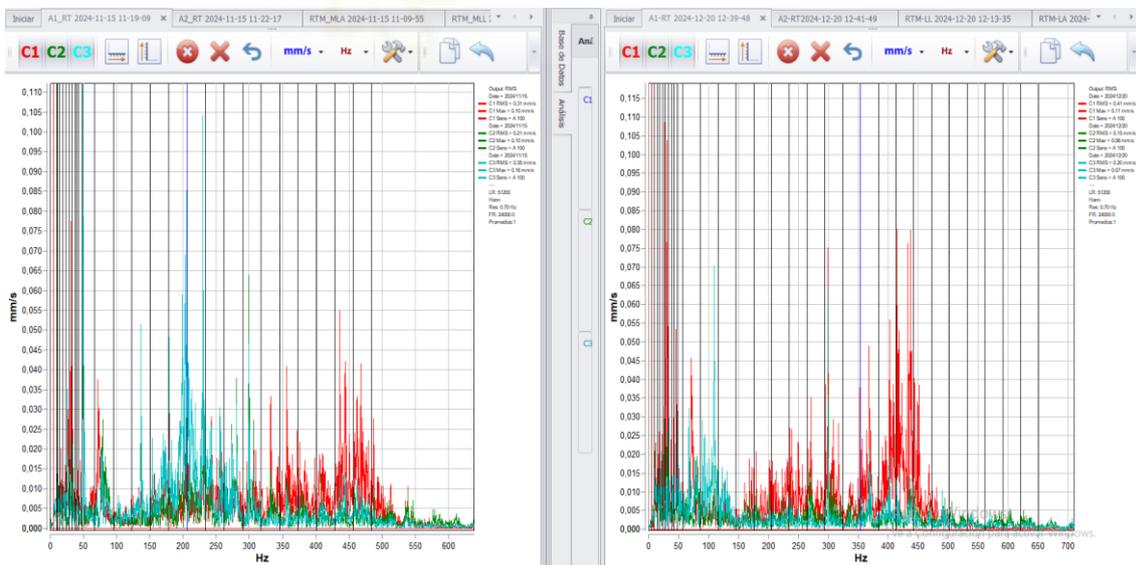


Ilustración 58. Monitorizado apoyo 1

Como se ha hecho con los espectros del motor, hemos marcado los diez primeros armónicos de la velocidad de giro del eje del motor sostenido por estos apoyos. También

se han marcado bandas laterales a la mitad de la frecuencia de BPFO del rodamiento del apoyo, así hemos podido observar que los picos de las ondas descritas en este espectro han caído en dicha frecuencia y sus medio-armónicos. Se observa cómo durante los primeros 500 Hz la amplitud de las vibraciones aumenta con muchos de los picos de vibración en estas bandas laterales. Se aprecia también un considerable aumento en el valor de los picos de las vibraciones a esta frecuencia, indicando que el problema ha empeorado durante el tiempo entre mediciones.

A continuación, se procede a realizar el mismo análisis con el apoyo 2 cuyas condiciones de funcionamiento y monitorizado han sido las mismas que las del apoyo 1.

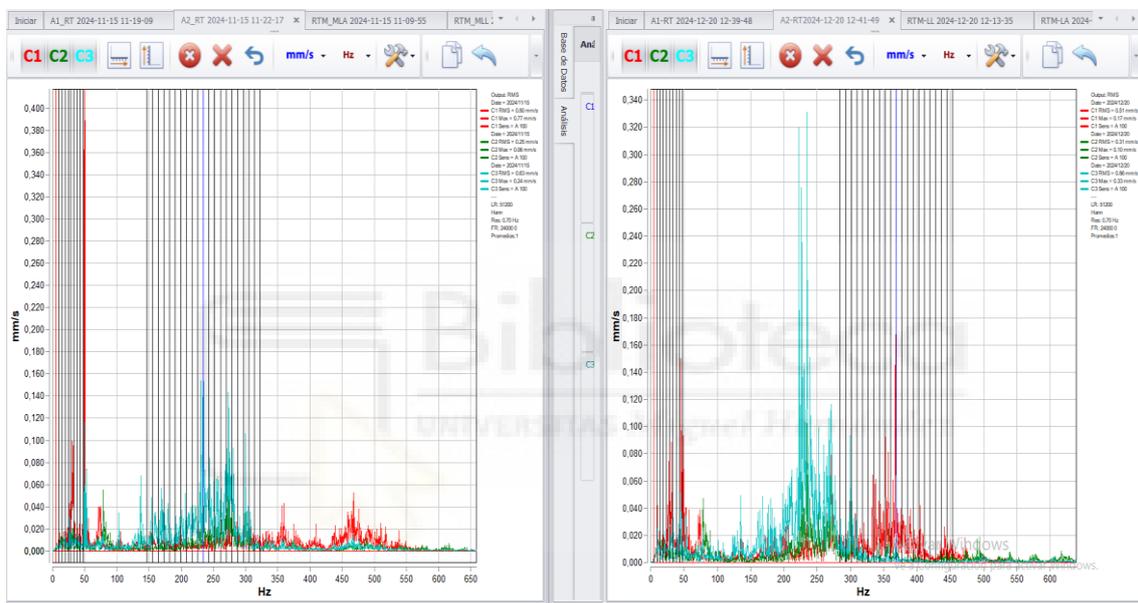


Ilustración 59. Monitorizado apoyo 2

En el espectro de vibraciones del apoyo 2 también se han marcado los armónicos de la velocidad de rotación del eje. En estos 10 primeros armónicos se detecta un progresivo aumento en el valor de los picos para los armónicos de giro hasta que en la frecuencia de 50 Hz disminuye bruscamente. Esto indica que tal vez, al menos en los apoyos esta frecuencia puede realmente deberse a un defecto mecánico, por lo que, si en un futuro se repite el análisis, habiendo aislado correctamente el acelerómetro, habría que comprobar que sucede a esta frecuencia y realizar un nuevo análisis teniéndola en cuenta en el caso de que siga albergando un pico de vibración.

Como se puede apreciar, también se han colocado bandas laterales a 8,6 Hz, que coincide con la frecuencia del cálculo de BSF del rodamiento del apoyo, ya que hemos podido notar que la mayoría de los picos de vibración encontrados a frecuencias superiores (entre 150 y 500 Hz) se encuentran en este armónico.

Como en el apoyo 1, se detecta un considerable aumento del valor de la vibración sobre todo en los armónicos de la BSF.

11.2.2. MOTORES DE LAS CUCHILLAS

Como se ha hecho con anterioridad, lo primero que hacemos es calcular la velocidad de rotación de los rodillos de las cuchillas, los cuales como se puede ver en los planos, cuentan con una cuchilla acoplada a lo largo del rodillo para realizar el corte transversal. Aunque esta velocidad no es constante a lo largo del giro de los rodillos, estos sí que tendrán un valor definido de RPM en función de dos parámetros: Velocidad de funcionamiento de la máquina (la cual se mide en velocidad de producción: m/min) y la distancia de corte. Con estos dos datos, se procede al cálculo de las RPM a las que se mueven los rodillos.

Como se ha comentado anteriormente, la velocidad de producción de la máquina era de 60 m/min en ambas medidas. Sin embargo, la distancia de corte sí que fue diferente, lo que, como resultado, provoca una diferencia en las RPM de funcionamiento durante el monitorizado de esta máquina.

En el análisis realizado el 15 de noviembre, la longitud de corte fue de 910 mm, lo que en RPM se traduce en:

$$\begin{aligned}60 \text{ m/min} &= 60000 \text{ mm/min} \\60000/910 &= 65,934 \approx 66 \text{ RPM} \\66/60 &= 1,1 \text{ Hz}\end{aligned}$$

En el análisis realizado el 20 de diciembre, la longitud de corte fue de 700 mm, lo que en RPM se traduce en:

$$60 \text{ m/min} = 60000 \text{ mm/min}$$

$$60000/700 = 85,7143 \approx 85,7 \text{ RPM}$$

$$85,7/60 = 1,43 \text{ Hz}$$

11.2.2.1 MOTOR 1.

Lado acoplado

Debido a la baja velocidad de rotación, con el objetivo de poder mostrar mejor el espectro de vibraciones, se mostrarán los espectros en varios rangos de frecuencia.

En las imágenes siguiente se muestran los espectros de vibración de del lado acoplado del motor de la cuchilla 1. Como todas imágenes de los espectros, la imagen de la izquierda muestra la medida realizada en noviembre, mientras que la de la derecha, muestra la medida realizada en diciembre.

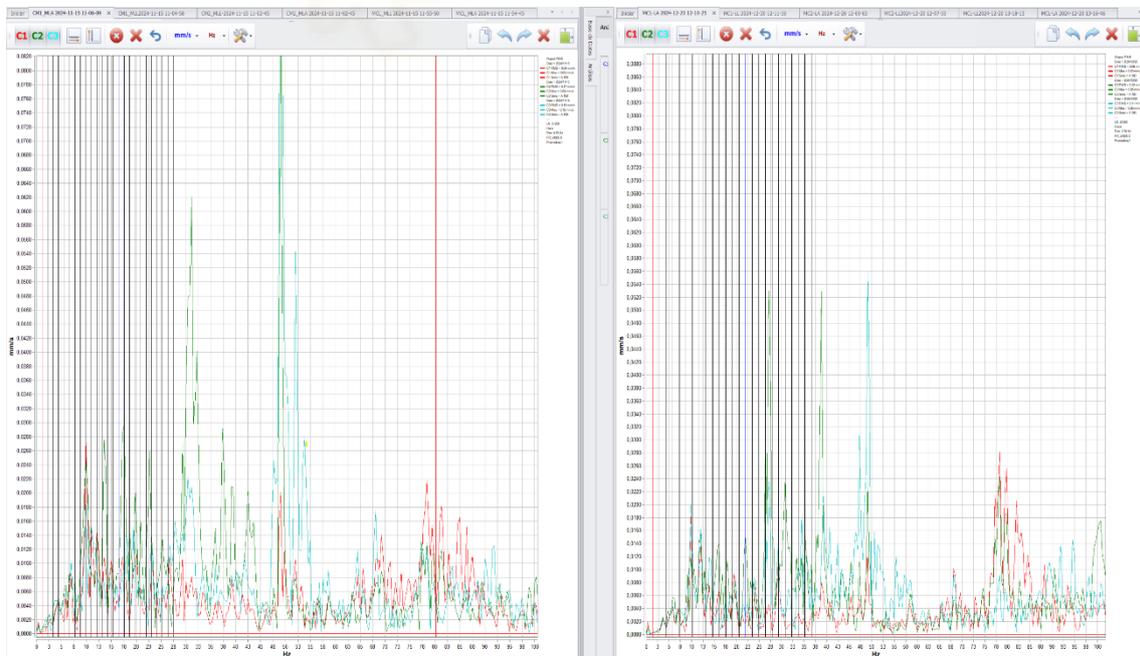


Ilustración 60. Monitorizado motor cuchilla 1 lado acoplado. Espectro reducido

Es importante mencionar antes de comenzar el análisis que en el periodo de tiempo entre las medidas se produjo el afilado de las cuchillas, este proceso se trata de una tarea cotidiana que se realiza varias veces al año, en función de diferentes factores: número de horas trabajadas o cortes realizados, gramaje medio del papel o cuando la calidad del corte se puede ver comprometida.

En esta primera imagen se ha elegido un rango de frecuencia pequeño con la intención de que se puedan apreciar estos primeros armónicos de las diferentes velocidades de giro (1.1 Hz en noviembre y 1,43 Hz en diciembre).

Como se puede apreciar, la medida tomada en diciembre presenta una ligera disminución en el valor de los picos de vibración con respecto a la tomada en noviembre. Esta mejora en los primeros armónicos se la atribuye a un mejor contacto entre las cuchillas tras haber sido afiladas.

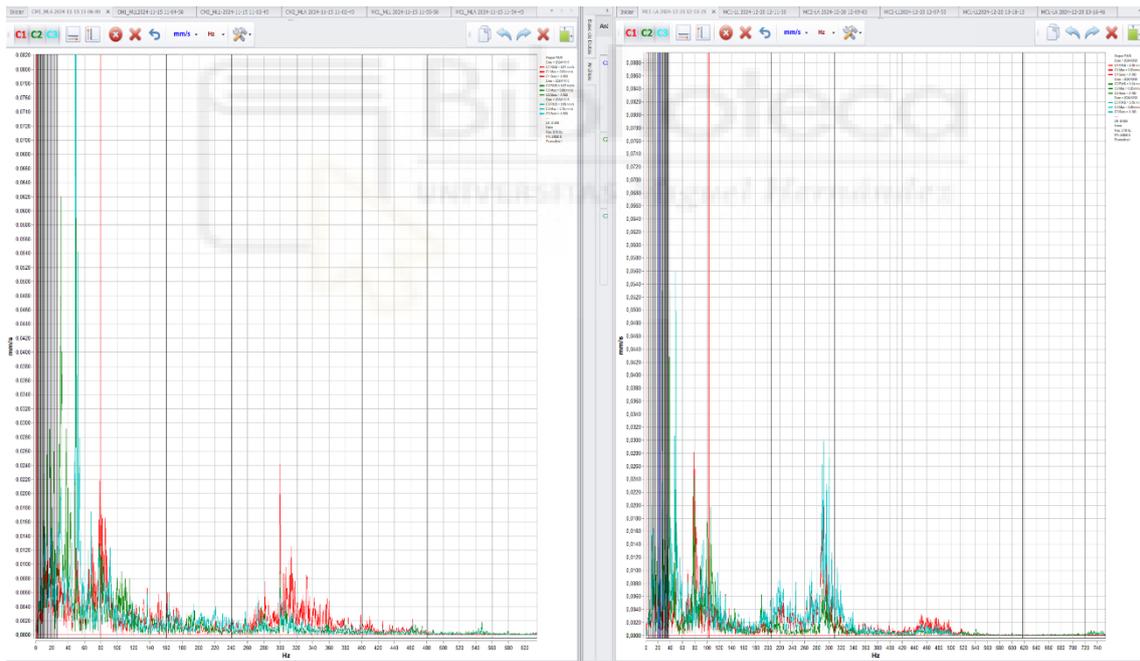


Ilustración 61. Monitorizado motor cuchilla 1 lado acoplado. Amplio espectro

La imagen anterior se trata de la misma comparativa que en el primer caso, pero aquí se ha ampliado el rango de frecuencias con la intención de poder mostrar otros armónicos de interés.

Como se ha mencionado anteriormente y se puede comprobar en los planos de estas cuchillas, la relación de transmisión es mediante pares de engranajes. Dada la relación de transmisión y el número de dientes de cada uno (1:1 con 73 dientes en cada engranaje) se ha podido calcular la frecuencia de engrane:

$$\text{Para } \omega = 66 \text{ RPM (noviembre)} \Rightarrow \text{GMF} = 80,3 \text{ Hz}$$

$$\text{Para } \omega = 85,7 \text{ RPM (diciembre)} \Rightarrow \text{GMF} = 104,27 \text{ HZ}$$

Se pueden advertir ciertos picos de vibración a frecuencias cercanas a la frecuencia de engrane que podrían indicar cierto desgaste de los dientes de los piñones.

Lado libre.

En el lado libre de este motor se ha llevado a cabo el mismo procedimiento:

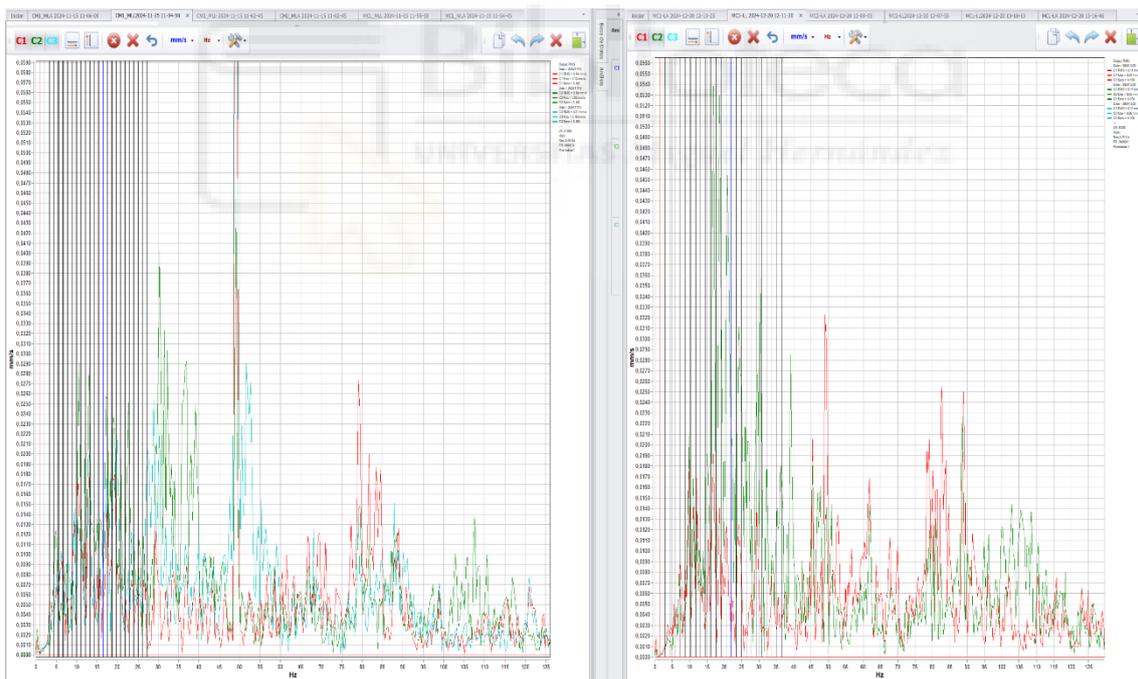


Ilustración 62. Monitorizado motor cuchilla 1 lado libre. Espectro reducido

En esta comparativa se muestra un rango de frecuencias que nos permite distinguir la posición de los armónicos de las velocidades de giro.

Se pueden detectar anomalías en los primeros armónicos, aunque estos valores no son demasiado elevados y no sugieren problemas relevantes. Sin embargo, se advierte un aumento en los valores de los picos de vibración situados entre los armónicos 10 y 13 de la velocidad de giro a los que deberemos estar atentos en un futuro.

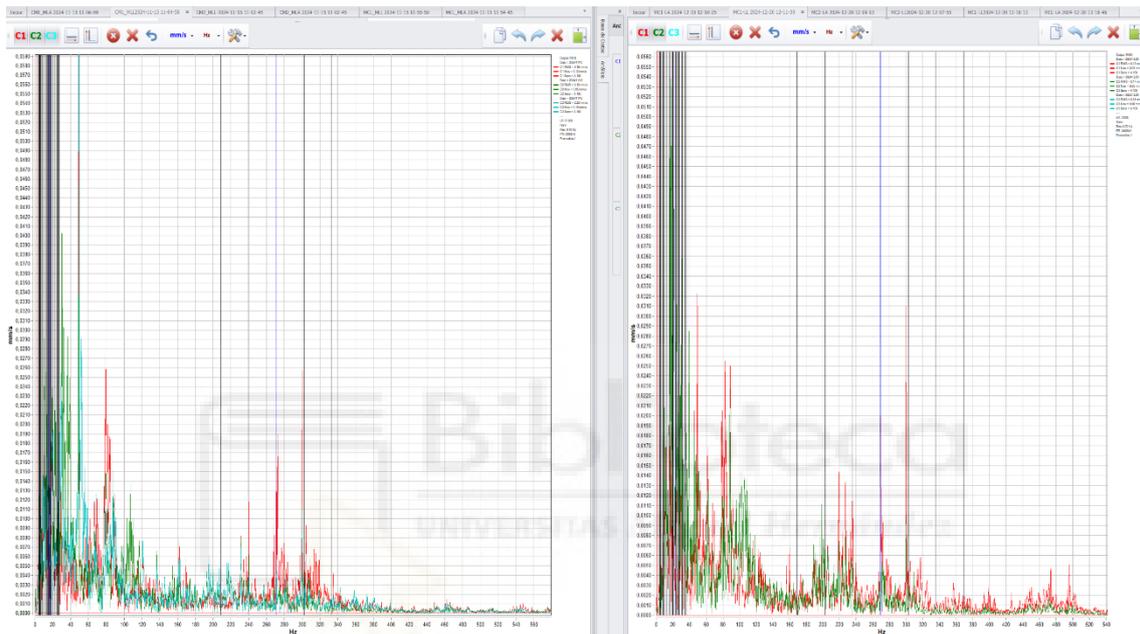


Ilustración 63. Monitorizado motor cuchilla 1 lado libre. Amplio espectro

En la ampliación del rango de frecuencia, podemos observar un espectro más general de las vibraciones en el que podemos distinguir diferentes picos de vibración.

Se ve un pico de vibración a 80 Hz que coincide con la velocidad frecuencia de engrane para la velocidad de giro de 66 RPM, sin embargo, este pico se repite en la segunda medida en el mismo rango de frecuencias, los que nos hace suponer que no seguramente no se deba a la frecuencia de engrane. Se plantea por lo tanto la hipótesis de que se trate de la frecuencia de deterioro del rodamiento sobre el que se encuentra apoyado el eje del motor en este lado libre, el cual desconocemos.

También se ha detectado un pico a 270 Hz con dos armónicos a 31 Hz. Estos picos no encajan en ninguna de las frecuencias de las que disponemos por lo que se plantea que puedan deberse al mismo rodamiento del que se sospecha que está creando los picos a 80Hz o por otra parte podría deberse a la frecuencia natural del sistema que hemos localizado alrededor de los 300 Hz.

En cualquier caso, ninguna de las frecuencias detectadas en este espectro de vibración llega a ser ligeramente preocupante, sin embargo, se pueden apreciar ciertas tendencias que pueden llegar a crear problemas en el motor.

11.2.2.2. MOTOR 2.

Lado libre

Como se ha hecho con el motor 1, a la baja velocidad de rotación, con el objetivo de poder mostrar mejor el espectro de vibraciones, se mostrarán los espectros en varios rangos de frecuencia. En las imágenes siguiente se muestran los espectros de vibración de del lado acoplado del motor de la cuchilla 2. Como todas imágenes de los espectros, la imagen de la izquierda muestra la medida realizada en noviembre, mientras que la de la derecha, muestra la medida realizada en diciembre.

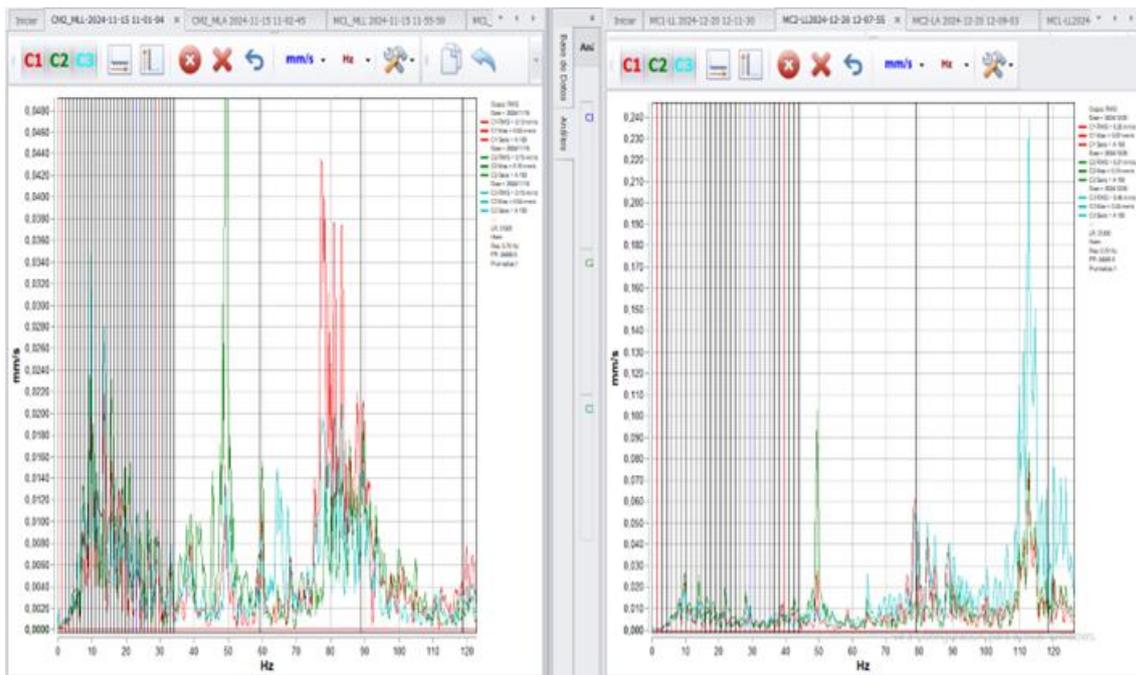


Ilustración 64. Monitorizado motor cuchilla 2 lado libre. Espectro reducido

En la imagen anterior se pueden apreciar los primeros armónicos a las diferentes velocidades de giro, 66 RPM en la imagen de la izquierda de la medida tomada en noviembre y 85,7 RPM en la imagen de la derecha da la medida tomada en diciembre. Los picos en estos primeros armónicos podrían ser síntoma de un pequeño desbalanceo o desequilibrio que se ve ligeramente corregido con el afilado de las cuchillas como se puede apreciar en la imagen del espectro tomada 35 días después, donde el valor de estos picos disminuye.

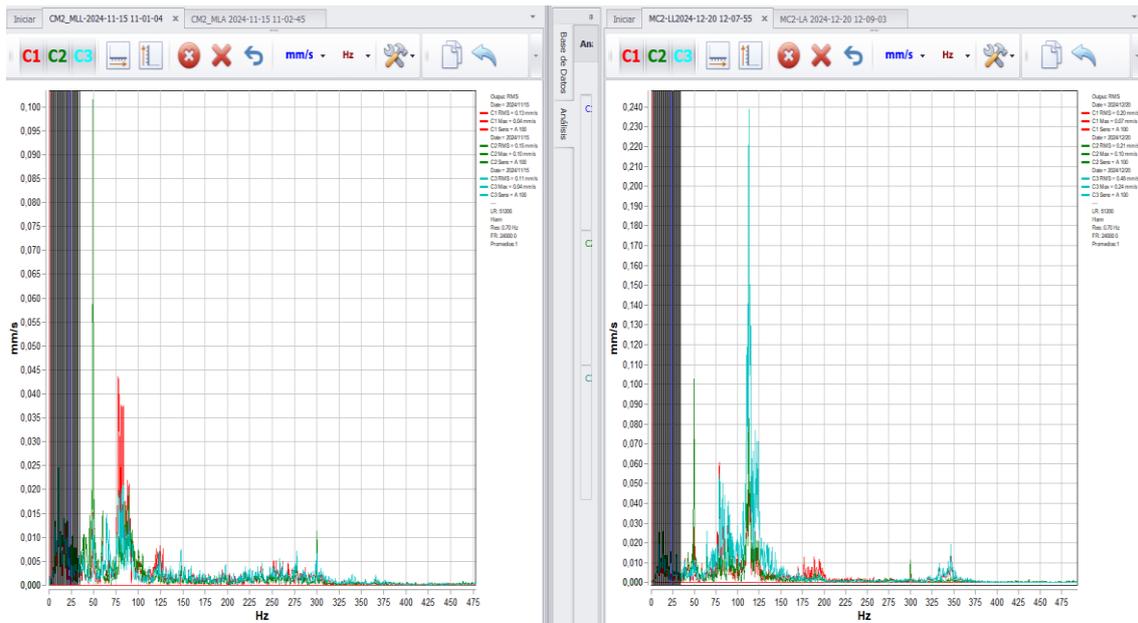


Ilustración 65. Monitorizado motor cuchilla 2 lado libre. Amplio espectro

Cuando analizamos el espectro de medidas con un mayor rango de frecuencia se puede observar cómo ha habido un importante aumento de las vibraciones en el lado libre de este motor a la frecuencia de 120 Hz, principalmente en el eje axial. Este incremento de la vibración puede deberse a diferentes factores que desconocemos, ya que como ocurre en el motor 1, no tenemos el despiece del motor y no conocemos los elementos mecánicos que lo componen y que podrían estar creando esta anomalía en el espectro, como puedan ser los rodamientos. Sin embargo, es importante considerar que este pico de vibración puede haberse visto incrementado por el hecho de que 120 Hz es el tercer armónico de la frecuencia de engrane de los piñones que unen los ejes de las cuchillas a la velocidad de giro del motor en esa medición.

Lado acoplado

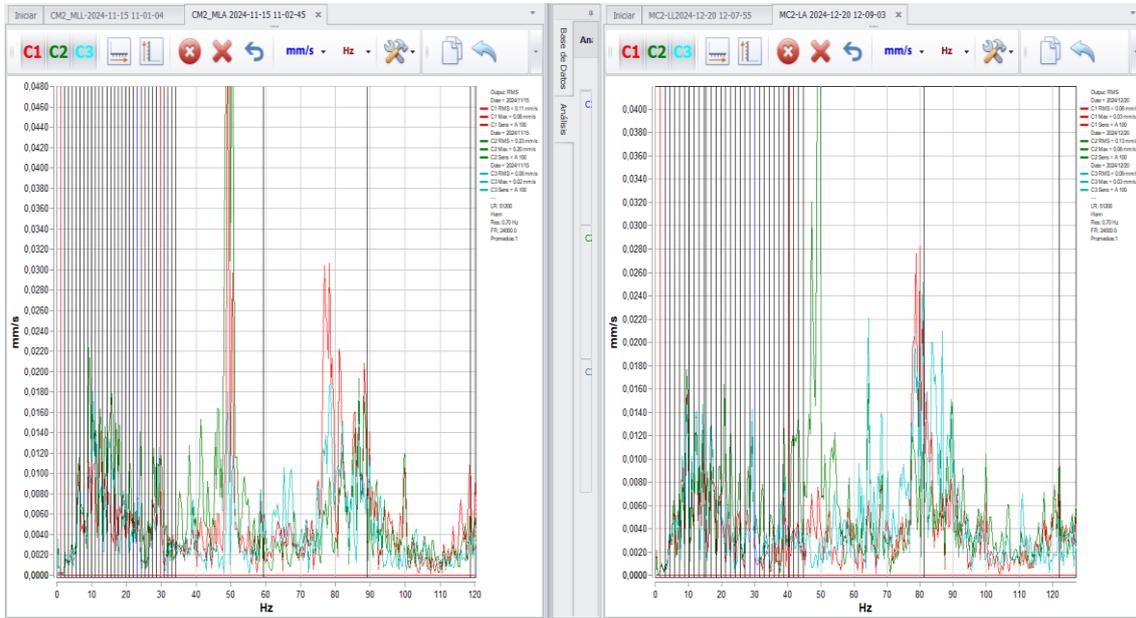


Ilustración 66. Monitorizado motor cuchilla 2 lado acoplado. Espectro reducido

En el espectro con el rango de frecuencia reducido podemos apreciar diferentes picos en los armónicos de giro. No cabe destacar gran cosa más allá de una pequeña disminución en el valor de los picos de vibración en estos primeros armónicos, que seguramente, como en el resto de los casos se deba al afilado de las cuchillas.

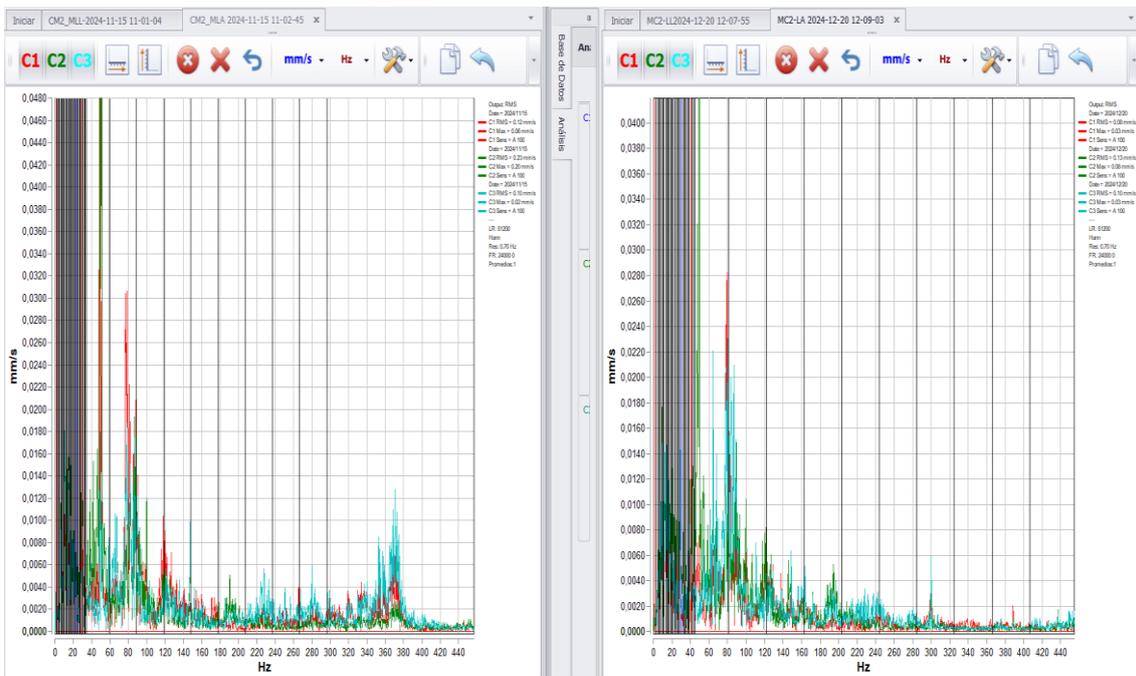


Ilustración 67. Monitorizado motor cuchilla 2 lado acoplado. Amplio espectro

Por otro lado, sí que resulta interesante analizar el espectro con un rango de frecuencia más amplio.

En primer lugar, podemos observar que se presentan anomalías asociadas a las frecuencias de engrane en ambos casos, principalmente en los tres primeros armónicos de estas frecuencias: 30 Hz en lado izquierdo correspondiente a la velocidad de giro de 1,1 Hz y 41 Hz en el lado derecho correspondiente a la velocidad de giro de 1,43 Hz. Este es el mismo problema que veíamos en el primer motor, lo que puede indicar que puede haber ocurrido algún problema en un momento puntual que haya creado un defecto en ambos rodamientos que está produciendo esa anomalía en el espectro, como pueda ser una descoordinación momentánea y minúscula de los engranes que haya provocado una brusca diferencia de velocidades.

También podemos ver una clara anomalía en la medida tomada en noviembre alrededor de la frecuencia de 370 Hz que desaparece en la medida tomada en diciembre. Esto puede deberse a numerosos factores. Tal vez en la medida tomada en noviembre se pudo haber dado un golpe o se movió el acelerómetro de manera que se creó un falso pico de vibración o puede que este pico se debiera de alguna forma a una vibración creada por el estado de las cuchillas y cuando estas se han afilado ha dejado de producirse. De cualquier manera, como en el resto de los casos, un monitoreo periódico de estos motores descartará unas hipótesis y reforzará otras.

11.2.3. MOTOR DE LA CINTA RÁPIDA (MCR)

Este motor se encarga de mover la cinta, conocida como cinta rápida, que transporta el papel a la salida del corte transversal. El motor mueve la cinta haciendo girar un conjunto de rodillos que transmiten el movimiento unos a otros mediante correas y engranajes. Debido al cuantioso número de transmisiones que se presentan entre el motor y la cinta y la falta de cotas de los rodillos, engranajes y correas transmisoras. Resulta imposible conocer la velocidad de la cinta mediante los métodos que hemos realizado con anterioridad, es por esto que hemos tenido que contar con la ayuda de una lámpara

estroboscópica para medir la velocidad de funcionamiento del motor. La velocidad de funcionamiento del motor que marcaba la lámpara era de 308 RPM. Como estamos trabajando con Hz: $308 / 60 = 5,13 \text{ Hz}$

A continuación, se muestran los espectros de frecuencia tomados sobre tres ejes distintos del lado libre y el lado acoplado del motor de estudio uno al lado del otro a modo de comparación, con una diferencia de 35 días entre ambas medidas.

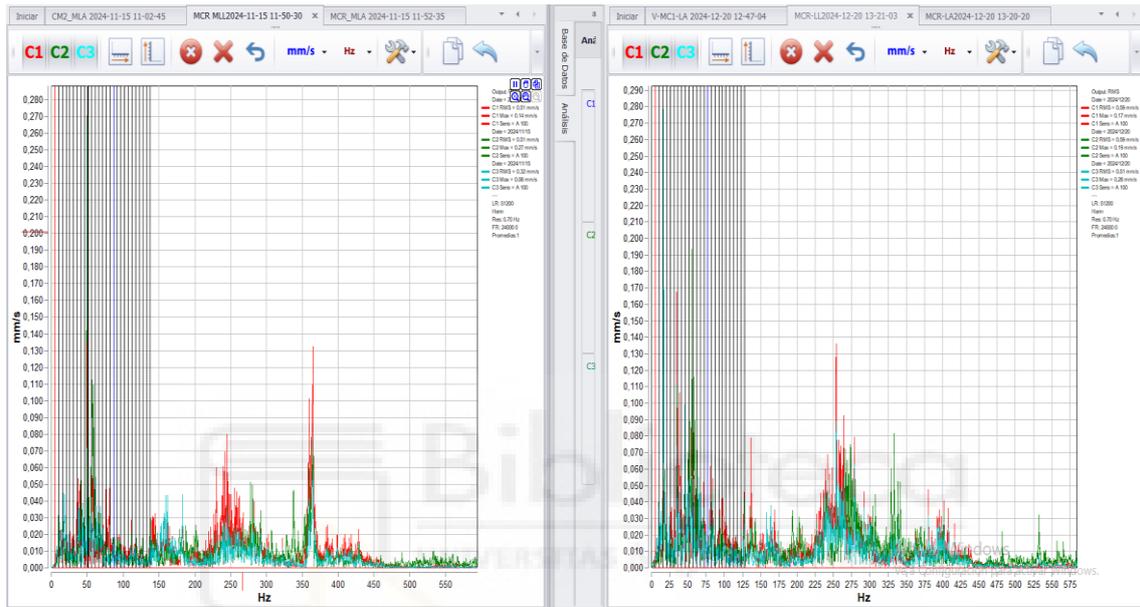


Ilustración 69. Monitorizado motor cinta rápida lado libre

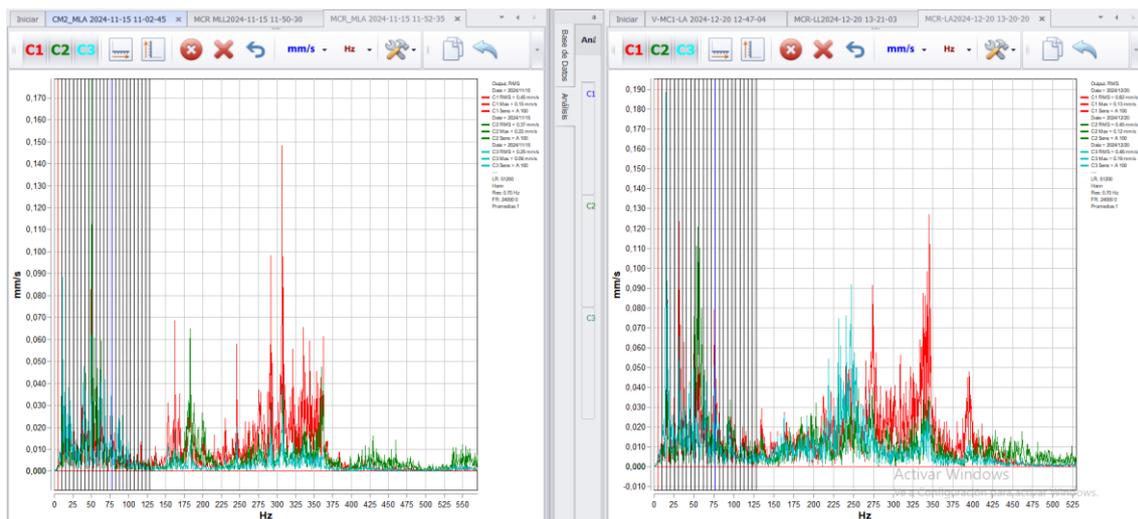


Ilustración 68. Monitorizado motor cinta rápida lado acoplado

Como se puede apreciar en el espectro se han marcado los 20 primeros armónicos de la velocidad de giro del motor. En estos primeros armónicos se detectan algunos picos de vibración que pueden ser síntoma de una ligera desalineación. El hecho de que se siga apareciendo el pico a 300 Hz nos hace considerar que esta puede ser una frecuencia natural del sistema, ya que se trata de un pico que se está repitiendo en la mayoría de las medidas tomadas. Se considera también la posibilidad de que el rodamiento del lado libre del motor, del cual no conocemos sus características, se encuentre ligeramente dañado por dos motivos:

En los primeros armónicos existen picos de vibración a 15, 33 y 51 Hz, que son frecuencias que no se corresponden con los armónicos de la velocidad del motor, que es la única que conocemos, y que además se repiten en las mismas frecuencias y con valores similares en las dos medidas tomadas en meses diferentes.

Se observan picos anómalos en el rango de 220 a 300 Hz, que, por la forma del espectro, parecen tener que ver con fallos en los rodamientos, habiéndose visto considerablemente incrementados los valores de la vibración en ese rango de frecuencias en la medida de diciembre con respecto a la tomada el mes anterior.

11.2.4. MOTOR DE LA CINTA LENTA.

Para el análisis de los espectros de frecuencia en este motor, como en los demás casos, se va a realizar una comparativa en la que la imagen de la izquierda Ilustración 69 corresponde con las medidas tomadas en el mes de noviembre tanto en el lado acoplado como en el lado libre y la imagen de la derecha Ilustración 70 corresponderá con la medida tomada en el mes de diciembre. Con la misma lámpara estroboscópica usada para medir la velocidad en el motor de la cinta rápida hemos medido la velocidad de este motor, siendo 571.2 RPM o 9.52 Hz para la distancia de corte de 910 mm y de 352 RPM o 5.87 Hz para la distancia de corte de 700 mm.

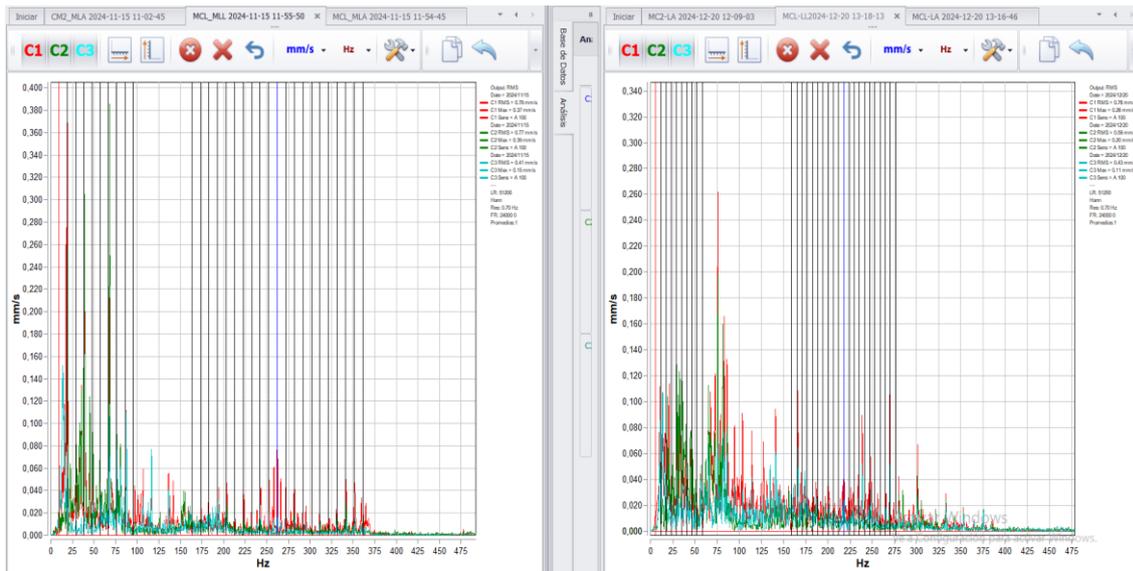


Ilustración 71. Monitorizado motor cinta lenta lado libre

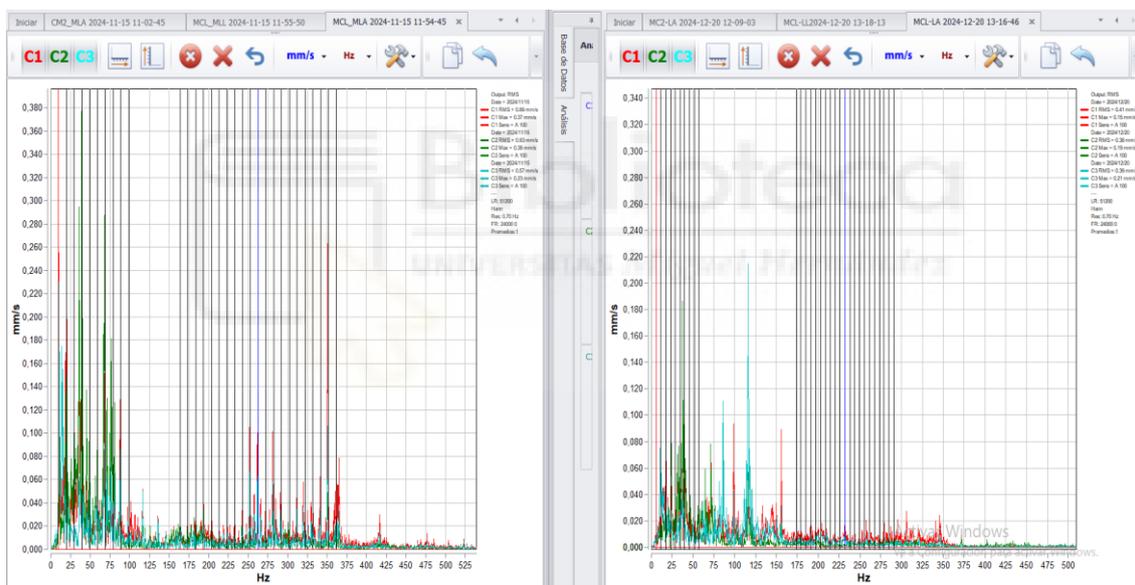


Ilustración 70. Monitorizado motor cinta lenta lado acoplado

Se han marcado los armónicos de funcionamiento de ambos motores, donde se pueden apreciar picos de vibración considerables en los 10 primeros armónicos de giro tanto en el lado libre como en el lado acoplado. Estos picos de vibración alcanzan mayores valores en las medidas tomadas en el mes de noviembre, esto seguramente se deba a que una mayor velocidad de funcionamiento crea mayores vibraciones. Analizando los armónicos de giro en frecuencias más altas también podemos observar picos de vibración.

12. PERIODICIDAD DE LAS MEDICIONES.

Tabla 3. Periodicidad de las mediciones

Elemento mecánico	Periodicidad	Tipo de inspección	Personal con formación
Sistema de frenado	Mensual	Visual, termográfico	NO
Sistema hidráulico	Mensual	Visual	NO
Cuchillas corte longitudinal	Trimestral	Visual	NO
Motor rodillo de tracción	Mensual	Análisis de vibraciones	Sí
Apoyos del eje del rodillo de tracción	Mensual	Análisis de vibraciones	Sí
Rodillo de tracción	Mensual	Visual, termográfico	NO
Motores corte transversal	Mensual	Análisis de vibraciones	Sí
Motor de la cinta rápida	Mensual	Análisis de vibraciones	Sí
Motor de soplado	Mensual	Análisis de vibraciones	Sí
Motor de la cinta lenta	Mensual	Análisis de vibraciones	Sí
Motor del rodillo de torsión	Trimestral	Visual, termográfico	NO
Cintas y rodillos	Mensual	Visual, termográfico	NO

13. INFORME DE MEDIDAS

Es importante realizar un informe en el que se detallen los aspectos más importantes tanto de la medición como del elemento que se está monitorizando. En este informe se hará referencia a las diferentes anomalías que se hayan podido observar en el estudio del espectro de vibración y se indicará la necesidad de reparación en caso de ser necesario o se darán las pautas para el correcto monitorizado.

13.1. INFORME DE MONITORIZACIÓN DEL MOTOR DEL RODILLO DE TRACCION DE LA RESMADORA

1. Introducción

El presente informe tiene como objetivo el análisis de vibraciones del motor que mueve el rodillo de tracción de la máquina resmadora, con el fin de identificar posibles anomalías y determinar acciones correctivas para mejorar su rendimiento y prolongar su vida útil. La monitorización se ha realizado mediante el software **DigiVibe**, aplicando técnicas de análisis espectral y temporal.

2. Descripción del Motor Monitorizado

- **Tipo:** Motor eléctrico de inducción trifásico
- **Ubicación:** Acoplamiento directo a la transmisión del rodillo de tracción.
- **Potencia nominal:** 41.2 kW (según especificaciones del fabricante)
- **Régimen de giro nominal:** 1180 RPM
- **Sistema de anclaje:** Bancada fija
- **Rodamientos:** NU 2312, con carga nominal de 265 kN (al no tener el despiece del motor, buscaremos las frecuencias de fallo de los rodamientos de los apoyos o en su defecto los más cercanos al motor como los que podríamos encontrar en la reductora)

3. Metodología

Se ha llevado a cabo la monitorización siguiendo los siguientes pasos:

1. **Colocación del sensor:** El sensor se ha colocado acoplado al lado libre y lado acoplado del motor.
2. **Toma de datos:** Se ha realizado la captura de vibraciones bajo condiciones normales de funcionamiento.
3. **Análisis espectral:** Evaluación de los espectros de frecuencia obtenidos.
4. **Comparación con valores de referencia:** Se han contrastado los datos con normas ISO 10816 para determinar la severidad de la vibración.

4. Análisis de Vibraciones

Los principales resultados del análisis son:

4.1 Identificación de Frecuencias Características

VELOCIDAD DE GIRO	
RPM (eje)	272,50
Hz	4,54
RPMc (corona)	55,40
Hz	0,91
RPMp (piñón)	272,00
Hz	4,53
RPMr (rodamiento)	272,50
Hz	4,54
RPMpm (polea motriz)	0,00
Hz	0,00
ENGRANAJES	
Zc (Número de dientes corona)	125
Zp (Número de dientes piñón)	25
NE	25
RODAMIENTO (NU 2312)	
NB (número de elementos rodantes)	18
BD (el diámetro de las bolas o rodillos)	25
PD (diámetro primitivo)	85
α (ángulo)	0

4.2 Diagnóstico de Fallos

Los datos obtenidos han revelado las siguientes anomalías:

1. Aumento progresivo de la amplitud de la vibración en los primeros armónicos.
2. Pico de vibración de gran amplitud a la frecuencia de 300 Hz.

5. Recomendaciones

A partir del análisis realizado, se recomienda:

Monitorizado de las vibraciones según la periodicidad recomendada en el apartado ... especial atención a un posible desalineamiento que pueda ser responsable del aumento de la amplitud de la vibración en los primeros armónicos

6. Conclusiones

Aunque en ningún momento se sobrepasan las amplitudes de vibración máximas para la categoría de bueno según la ISO 10816-3, se observan ciertas tendencias que conviene monitorizar, prestando especial atención al pico de vibración en 300 Hz, para descartar un posible defecto mecánico asociado a esta vibración y así poder concluir que se trata de una resonancia natural de la máquina.

Elaborado por: Andrés Pineda Box

Fecha: 27/1/2025

13.2. INFORME DE ORDEN DE TRABAJO

1. Datos Generales

Fecha: 27/01/2025

Elaborado por: Andrés Pineda Box

Equipo: Motor eléctrico de inducción trifásico del rodillo de tracción de la resmadora

Ubicación: Acoplamiento directo a la transmisión del rodillo de tracción

Potencia nominal: 41.2 kW

Régimen de giro nominal: 1180 RPM

2. Orden de Trabajo

Anomalía Detectada:

1. Aumento progresivo de la amplitud de la vibración en los primeros armónicos.
2. Pico de vibración de gran amplitud a la frecuencia de 300 Hz, posible indicativo de una resonancia o un defecto mecánico.

Intervención Requerida:

1. Verificación y corrección de un posible desalineamiento del motor y del rodillo de tracción.
2. Inspección de los rodamientos (NU 2312) en busca de desgaste o fallos incipientes.
3. Análisis estructural para determinar si la frecuencia de 300 Hz corresponde a una resonancia natural de la máquina.
4. Ajuste y reapriete de los anclajes del motor para evitar posibles holguras que contribuyan a la vibración.
5. Registro de los valores de vibración tras la intervención para comparación con los valores previos.

Código de Prioridad: Media (El problema no supera los límites de la norma ISO 10816-3, pero su evolución puede afectar la vida útil del equipo).

13.3. RETROALIMENTACIÓN DEL SISTEMA

En esta parte del plan de mantenimiento se deben exponer las acciones llevadas a cabo por el personal de mantenimiento, así como apreciaciones que se dieron durante el proceso de reparación y/o revisión.

En nuestro caso no se habían llegado a realizar dichas acciones en el momento de finalización del proyecto, por lo que se deja planteado este proceso de retroalimentación.

Acciones Ejecutadas:

- En este apartado se indican y explican las acciones de reparación y/o revisiones ejecutadas.

- Quien las ha llevado a cabo
- Fecha en la que se llevaron a cabo

Feedback:

La persona que llevó a cabo la reparación y/o revisión debe exponer en este apartado los defectos que se apreciaron durante la ejecución de la reparación.

14. CONCLUSIONES

Tras la finalización del presente proyecto se puede asegurar que ha quedado resaltada la importancia del mantenimiento en cualquier tipo de empresa dedicada al sector industrial, siendo el mantenimiento predictivo la solución más adecuada en máquinas con alta responsabilidad, lo cual se ha tratado de demostrar en la implantación del plan de mantenimiento predictivo en la resmadora 4 y en el horno de la flejadora Thimon.

La complejidad del monitorizado de los diferentes elementos de los que están compuestas las máquinas de estas dimensiones hace que se trate de una difícil labor que requiere una gran inversión de tiempo y recursos, pero que sin duda se ve recompensada. Es por estas dificultades que, dependiendo del grado de implantación del plan de mantenimiento predictivo que se busque conseguir en una máquina y los recursos con lo que se cuente para llevarlo a cabo, puede interesar subcontratar el servicio.

Con respecto a los objetivos planteados para este plan de mantenimiento se considera que se ha conseguido lo que empresa necesitaba, habiendo creado las bases a seguir para un correcto monitorizado de los elementos más críticos de las máquinas, pudiendo de esa manera anticiparse a los posibles fallos mecánicos de estos elementos, que en esencia es el objetivo del mantenimiento predictivo. Es importante mencionar que, en el análisis de los espectros de vibraciones realizados en la resmadora, aunque no se contaba con demasiados datos y en algunos casos ha resultado difícil obtener un diagnóstico, hemos podido analizar tendencias en ciertos armónicos y observar como las acciones de

mantenimiento, en nuestro caso el afilado de las cuchillas, tienen un reflejo positivo en el espectro.

15. BIBLIOGRAFÍA

- 1) Guía de termografía para mantenimiento predictivo. FLIR.
- 2) Gestión de Mantenimiento: Lean Maintenance y TPM. Edgar Fernández Álvarez. Universidad de Oviedo.
- 3) Mantenimiento predictivo I y II. Apuntes de la asignatura Diseño y Ensayo de Máquinas. Ingeniería Mecánica de la Universidad Miguel Hernández.
- 4) Manual-de-Usuario-WiSER-Vibe-Pro-1
- 5) Se ha usado IA, concretamente Chat GPT a modo de apoyo y como consultorio en ocasiones muy concretas

Direcciones web visitadas

- 1) <https://dspanalytic.com/>
- 2) <https://www.preditec.com/>
- 3) <https://www.skf.com/>
- 4) <https://adash.com/>
- 5) <https://zofti.com/>

ANEXO 1. HISTORIAL DE AVERÍAS COMPLETO

Tabla 4. Historial completo de averías

RECURSO	GRUPO	TIPO	BLOQUEANTE	SITUACIÓN	TIEMPO (MINS)
RM-2		MEJORA	NO	PENDIENTE	
RM-2	DESBOBINADO	MEJORA	NO	PENDIENTE	
RM-2	DESBOBINADO	CORRECTIVO	NO	PENDIENTE	
RM-2		MEJORA	NO	EN PROCESO	
RM-2	CABEZAL DE CORTE	PREVENTIVO	NO	PENDIENTE	
RM-2		MEJORA	NO	PENDIENTE	
RM-2	AIRE SOPLADO Y VACIO	MEJORA	NO	EN PROCESO	
RM-2	CABEZAL DE CORTE	PREVENTIVO	SI	SOLUCIONADO	
RM-2	DESBOBINADO	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-2	DESBOBINADO	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	
RM-2		MEJORA	NO	SOLUCIONADO	
RM-2	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO		SOLUCIONADO	
RM-2	PANTALLAS DE PRODUCCIÓN	MEJORA	NO	SOLUCIONADO	
RM-2	DESBOBINADO	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	
RM-2		CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	
RM-2	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	
RM-2	DESBOBINADO	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-2	CABEZAL DE CORTE	PREVENTIVO	SI	SOLUCIONADO	

RECURSO	GRUPO	TIPO	BLOQUEANTE	SITUACIÓN	TIEMPO (MINS)
RM-2		CORRECTIVO		SOLUCIONADO	35
RM-2	PANTALLAS DE PRODUCCIÓN	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	25
RM-2	DESBOBINADO	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	25
RM-2	DESBOBINADO	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	180
RM-2	DESBOBINADO	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-2	CABEZAL DE CORTE	PREVENTIVO	SI	SOLUCIONADO	400
RM-2	CABEZAL DE CORTE	PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	180
RM-2	CABEZAL DE CORTE / COMPUERTA	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	60
RM-2	IGUALADORES	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	120
RM-2		MEJORA	NO	SOLUCIONADO	
RM-2	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	480
RM-2	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	30
RM-2		CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	
RM-2	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-2		CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	300
RM-2	DESBOBINADO	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	220
RM-2	DESBOBINADO	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	180
RM-2	MESA PALETS	CORRECTICO	NO	SOLUCIONADO	
RM-2	PANTALLAS PRODUCCIÓN	MEJORA	NO	SOLUCIONADO	
RM-2	MESA PALETS	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	15

RECURSO	GRUPO	TIPO	BLOQUEANTE	SITUACIÓN	TIEMPO (MINS)
RM-2	ASPIRACIÓN RECORTE	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-2		CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	90
RM-2		IDEA DE MEJORA	NO	SOLUCIONADO	210
RM-2	CABEZAL DE CORTE			SOLUCIONADO	720
RM-2		CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	
RM-2		CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-2	ASPIRACIÓN RECORTE	PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	60
RM-2		MEJORA	NO	SOLUCIONADO	
RM-2	CABEZAL DE CORTE	PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-2		CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-2		CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	
RM-2	BAILARIN	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	45
RM-2		MEJORA	NO	SOLUCIONADO	
RM-2		CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-2	RECHAZO	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-2	RECHAZO	MEJORA	NO	SOLUCIONADO	
RM-2	RECHAZO	MEJORA	SI	SOLUCIONADO	
RM-2		MEJORA	NO	SOLUCIONADO	
RM-2	RECHAZO	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-3	CABEZAL DE CORTE	AJUSTE	SI	SOLUCIONADO	30
RM-2	CABEZAL DE CORTE	PREVENTIVO	SI	SOLUCIONADO	280
RM-3	DESBOBINADO	CORRECTIVO	NO	PENDIENTE	
RM-3	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	NO	PENDIENTE	
RM-3		MEJORA	NO	PENDIENTE	
RM-3		MEJORA	NO	EN PROCESO	
RM-3	ASPIRACION DE CORTE	MEJORA	NO	PENDIENTE	
RM-4	CABEZAL DE CORTE	PREVENTIVO	SI	EN PROCESO	

RECURSO	GRUPO	TIPO	BLOQUEANTE	SITUACIÓN	TIEMPO (MINS)
RM-3	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-3	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-3	DESBOBINADO	CORRECTIVO		SOLUCIONADO	
RM-3	CABEZAL DE CORTE	PREVENTIVO	SI	SOLUCIONADO	
RM-3	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO		SOLUCIONADO	
RM-3	DESBOBINADO	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-3	HIDRAULICA	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-3	CABEZAL DE CORTE - OPERARIO	-		SOLUCIONADO	
RM-3	PANTALLAS DE PRODUCCION	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	40
RM-3	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	30
RM-3	CABEZAL DE CORTE	PREVENTIVO	SI	SOLUCIONADO	400
RM-3	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	90
RM-3	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	60
RM-3	EMPALMES	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	320
RM-3		CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	15
RM-3		CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	230
RM-3	CORREAS	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	320
RM-3	MESA PALETS	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	1200
RM-3	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	200
RM-3	ASPIRACION DE CORTE	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	15
RM-3		CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-3		CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	270
RM-3		MEJORA	NO	SOLUCIONADO	150
RM-3	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-3		INSTALACION	SI	SOLUCIONADO	
RM-3	BAILARIN	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	

RECURSO	GRUPO	TIPO	BLOQUEANTE	SITUACIÓN	TIEMPO (MINS)
RM-3	RESIDUOS	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	420
RM-3	FRENOS	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	390
RM-4	HIDRAULICA	CORRECTIVO	NO	PENDIENTE	
RM-4	ALINEADOR	MEJORA	NO	EN PROCESO	
RM-4		PREVENTIVO	SI	EN PROCESO	
RM-4	RODILLO	CORRECTIVO	NO	PENDIENTE	
RM-4	FRENOS	MEJORA	NO	PENDIENTE	
RM-4	MESA APILADO	MEJORA	NO	EN PROCESO	
RM-4	CORREAS	PREVENTIVO	SI	SOLUCIONADO	
RM-4	HIDRAULICA	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-4	SIST. DE AIRE	PREVENTIVO	SI	SOLUCIONADO	
RM-4	PANTALLAS DE PRODUCCIÓN	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	390
RM-4		CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	120
RM-4		CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-4	FRENOS	MEJORA	NO	SOLUCIONADO	
RM-4	PORTACUCHILLAS	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	640
RM-4		CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	
RM-4	MESA APILADO	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-4		MEJORA	NO	SOLUCIONADO	
RM-4	TOPES FRONTALES	MEJORA	NO	SOLUCIONADO	
RM-4		MEJORA	NO	SOLUCIONADO	
RM-4	TOPES FRONTALES	MEJORA	NO	SOLUCIONADO	
RM-4		CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	
RM-5	ASPIRACIÓN DE CORTE	MEJORA	NO	PENDIENTE	
RM-5	PANTALLA DE PRODUCCIÓN	CORRECTIVO	NO	PENDIENTE	
RM-5	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	NO	PENDIENTE	
RM-5	FRENOS	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-5	RECHAZO	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-5	CABEZAL DE CORTE	PREVENTIVO	SI	SOLUCIONADO	

RECURSO	GRUPO	TIPO	BLOQUEANTE	SITUACIÓN	TIEMPO (MINS)
RM-5	CABEZAL DE CORTE	PREVENTIVO	SI	SOLUCIONADO	
RM-5		CORRECTIVO		SOLUCIONADO	
RM-5	RECHAZO	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-5	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO		SOLUCIONADO	
RM-5	ASPIRACION DE CORTE	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	
RM-5	CUADRO ELECTRICO	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	
RM-5	PRODUCCION	MEJORA	NO	SOLUCIONADO	
RM-5		CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	15
RM-5		CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	180
RM-5		CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	120
RM-5	CABEZAL DE CORTE	PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	220
RM-5	CABEZAL DE CORTE	INSTALACION	NO	SOLUCIONADO	180
RM-5	IGUALADORES	MEJORA	NO	SOLUCIONADO	80
RM-5	TRANSPORTE	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	180
RM-5		CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-5	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-5	ASPIRACION DE CORTE	MEJORA	NO	SOLUCIONADO	360
RM-5		CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-5		CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RM-5	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	
BOMBA JOCKEY		MEJORA	NO	SOLUCIONADO	
CORTAMAND.	CABEZAL DE CORTE	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
CORTAMAND.	CABEZAL DE CORTE	MEJORA	NO	SOLUCIONADO	
PUERTA RESIDUOS	METALICA	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	60
PUERTA RESIDUOS	METALICA	CORRECTIVO		SOLUCIONADO	
PUERTA RESIDUOS	PLEGABLE	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
PRENSAS	RESIDUOS	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	
PRENSA NO. 2	RESIDUOS	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	480
PRENSA NO. 2	RESIDUOS	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	

RECURSO	GRUPO	TIPO	BLOQUEANTE	SITUACIÓN	TIEMPO (MINS)
PRENSA NO.2	RESIDUOS	PREVENTIVO	SI	SOLUCIONADO	480
PRENSA NO. 3	RESIDUOS	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	720
PRENSA NO. 3	RESIDUOS	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	70
PRENSA NO. 3	ASPIRACION DE CORTE	INSTALACION		SOLUCIONADO	270
PRENSA NO. 3	ASPIRACION DE CORTE	INSTALACION	NO	SOLUCIONADO	
PRENSA NO. 3		PREVENTIVO	SI	SOLUCIONADO	480
PRENSA NO. 1	RESIDUOS	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	300
PRENSA NO. 1	RESIDUOS	INSTALACION	NO	SOLUCIONADO	480
PRENSA NO.1	RESIDUOS	MEJORA	NO	SOLUCIONADO	
PRENSA NO. 1	RESIDUOS	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	100
PRENSA NO. 1	RESIDUOS	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	95
PRENSA NO. 1		PREVENTIVO	SI	SOLUCIONADO	480
PRENSAS	RESIDUOS	MEJORA	NO	SOLUCIONADO	
TRITURADORA	RESIDUOS	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	30
TRITURADORA	RESIDUOS	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	120
MÁQ.PINZAS I	MASTIL	CORRECTIVO	NO	APARCADO	
MÁQ.PINZAS I	SISTEMA ELECTRICO	CORRECTIVO	SI	APARCADO	
MÁQ.PINZAS I	SISTEMA DE ELECTRICO	CORRECTIVO	SI	APARCADO	
MÁQ.PINZAS I	SISTEMA DE DIRECCIÓN	CORRECTIVO	SI	APARCADO	
MÁQ.PINZAS I		CORRECTIVO	SI	APARCADO	
MÁQ.PINZAS I		CORRECTIVO	SI	APARCADO	
MÁQ.PINZAS I		CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	
MÁQ.PINZAS I	SISTEMA DE DIRECCIÓN	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	
MÁQ.PINZAS II	SISTEMA ELECTRICO	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	
MÁQ.PINZAS II	SISTEMA ELECTRICO	CORRECTIVO		SOLUCIONADO	380
MÁQ.PINZAS II	SISTEMA DE DIRECCION	CORRECTIVO		SOLUCIONADO	380

RECURSO	GRUPO	TIPO	BLOQUEANTE	SITUACIÓN	TIEMPO (MINS)
MÁQ. PINZAS II		CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	110
MAQ. DE PINZAS GASOIL		CORRECTIVO	SI	PENDIENTE	
MAQ. TRANSPALET A GASOIL		CORRECTIVO	SI	PENDIENTE	
TRITURADORA	RESIDUOS	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	45
ILUMINACIÓN	CABEZAL DE CORTE	MEJORA	NO	PENDIENTE	
REBOBIN. I		MEJORA	NO	PENDIENTE	
REBOBIN. I	NEUMATICOS	CORRECTIVO	NO	PENDIENTE	
REBOBIN. I		MEJORA	SI	EN PROCESO	
REBOBIN. I	FRENOS	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	
REBOBIN. I	CONTRACUCHILLAS	PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	
REBOBIN. I	DESBOBINADOR	MEJORA	NO	SOLUCIONADO	
REBOBIN. I		MEJORA	NO	SOLUCIONADO	
REBOBIN. I	CUADRO ELECTRICO	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
REBOBIN. I	CUADRO ELECTRICO	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	30
REBOBIN. I		CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	100
REBOBIN. I	EXPANSORES DE SUJECION	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	80
REBOBIN. I	EXPANSORES DE SUJECION	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	30
REBOBIN. I	CUADRO ELECTRICO	MEJORA	NO	SOLUCIONADO	120
REBOBIN. I	CONTRACUCHILLAS	PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	200
REBOBIN. I	CUADRO ELECTRICO	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	70

RECURSO	GRUPO	TIPO	BLOQUEANTE	SITUACIÓN	TIEMPO (MINS)
REBOBIN. I	CUADRO ELECTRICO	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	
REBOBIN. I	MOTORES	INSTALACION / MEJORA	SI	SOLUCIONADO	
REBOBIN. I		INSTALACION	SI	SOLUCIONADO	
REBOBIN. I	PANTALLAS PRODUCCIÓN	INSTALACION	NO	SOLUCIONADO	
REBOBIN. I		INSTALACION	NO	SOLUCIONADO	
REBOBIN. I	FRENOS	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	320
REBOBIN. I	RESIDUOS	MEJORA	NO	SOLUCIONADO	
REBOBIN. I	FRENOS	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	40
REBOBIN. I	DESBOBINADOR	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	
REBOBIN. I	PESAJE	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
REBOBIN. I	FRENOS	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	
REBOBIN. II		MEJORA	NO	EN PROCESO	
REBOBIN. II	PESO	CORRECTIVO	NO	EN PROCESO	
REBOBIN. II	PANTALLAS DE PRODUCCION	CORRECTIVO	SI	PENDIENTE	
REBOBIN. II	DESBOBINADORES	PREVENTIVO	SI	PENDIENTE	400
REBOBIN. II		CORRECTIVO/ MEJORA	NO	EN PROCESO	
REBOBIN. II		CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	210
REBOBIN. II	EXPANSORES DE SUJECION	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	
REBOBIN. II		PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	
REBOBIN. II		CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	195
REBOBIN. II	EXPANSORES DE SUJECION	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	120
REBOBIN. II	EXPANSORES DE SUJECION	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	150
REBOBIN. II	EJE DE EMPUJE	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	45
REBOBIN. II		MEJORA	NO	SOLUCIONADO	30
REBOBIN. II	SALIDA DEBOBINADORA	MEJORA	NO	SOLUCIONADO	20
REBOBIN. II	PASARELA	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	120

RECURSO	GRUPO	TIPO	BLOQUEANTE	SITUACIÓN	TIEMPO (MINS)
REBOBIN. II	DESBOBINADOR	CORRECTIVO		SOLUCIONADO	80
REBOBIN. II	DESBOBINADOR	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	
REBOBIN. II	EJE DE EMPUJE	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	400
REBOBIN. II	EXPANSORES DE SUJECION	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	60
REBOBIN. II	MOTOR	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	320
REBOBIN. II	CONTRACUCHILLAS	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RECTIFICADORA TRANSVERSAL		PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	50
RECTIFICADORA TRANSVERSAL		PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	
RECTIFICADORA LONGITUDINAL		PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	50
ITALIANA REBOBINADORA		CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	120
ITALIANA REBOBINADORA		CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	180
ITALIANA REBOBINADORA		CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	120
ITALIANA REBOBINADORA		PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	30
ITALIANA RESMADORA		CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	120
ITALIANA RESMADORA		CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	220
ITALIANA RESMADORA		PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	30
FIMAP		PREVENTIVO	SI	SOLUCIONADO	
FIMAP		CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
FIMAP		CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	1440-2880
FIMAP		CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	180
FLEJADORA		CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	

RECURSO	GRUPO	TIPO	BLOQUEANTE	SITUACIÓN	TIEMPO (MINS)
COMPRESOR	NEUMATICA	CORREC. - PREV.	NO	SOLUCIONADO	
COMPRESOR	NEUMATICA			SOLUCIONADO	
COMPRESOR PISTOLAS DE IMP.	NEUMATICA	PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	300
COMPRESOR PISTOLAS DE IMP.	NEUMATICA	MEJORA	NO	SOLUCIONADO	
TALLER		PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	
TALLER		PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	
TALLER		CORRECTIVO		SOLUCIONADO	45
TALLER		PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	360
VOLTEADOR RB-1 / RB-2		MEJORA	NO	SOLUCIONADO	
VOLTEADOR RB-1 / RB-3		MEJORA		SOLUCIONADO	60
THIMON			NO	EN PROCESO	
THIMON		MEJORA	NO	SOLUCIONADO	
THIMON	HORNO	PREVENTIVO	SI	SOLUCIONADO	30
THIMON	HORNO	PREVENTIVO	SI	SOLUCIONADO	120
THIMON		MEJORA		SOLUCIONADO	60
THIMON		CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	45
THIMON		CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	45
THIMON		CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	180
THIMON		CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	
THIMON		CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	215
THIMON	HORNO	PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	360
THIMON	HORNO	PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	560
THIMON	HORNO	PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	
THIMON	HORNO	PREVENTIVO	NO	SOLUCIONADO	
BASCULA DE CAMIONES		PREVENTIVO	NO	PENDIENTE	
TRASP. 3 TOYOTA	RENTING	CORRECTIVO	SI	SOLUCIONADO	100
CAMIÓN VOLVO	SISTEMA DE REFRIGERACION	CORRECTIVO	NO	APARCADO	
CAMIÓN VOLVO	NEUMATICOS	CORRECTIVO	NO	APARCADO	
CAMIÓN VOLVO	SISTEMA DE DIRECCIÓN	CORRECTIVO	NO	APARCADO	
CAMIÓN VOLVO	CRISTALES / CARROCERIA	CORRECTIVO	NO	APARCADO	
CAMIÓN VOLVO	SISTEMA DE ENCENDIDO	CORRECTIVO	NO	APARCADO	
CAMIÓN VOLVO	A/C	CORRECTIVO	NO	APARCADO	

RECURSO	GRUPO	TIPO	BLOQUEANTE	SITUACIÓN	TIEMPO (MINS)
CAMIÓN VOLVO	SISTEMA DE TRANSMISIÓN	CORRECTIVO	NO	APARCADO	
MUELLES DE CARGA		MEJORA	NO	SOLUCIONADO	
INSTALACIONES ELECTRICAS		INSPECCION	NO	SOLUCIONADO	
APARCAMIENTO CARRET.		MEJORA	NO	APARCADO	
TRANSPORTE BOBINAS		MEJORA		EN PROCESO	
TRANSPORTE BOBINAS				SOLUCIONADO	
TRANSPORTE BOBINAS				SOLUCIONADO	
TRANSPORTE BOBINAS		MEJORA		SOLUCIONADO	
TRANSPORTE BOBINAS		MEJORA		SOLUCIONADO	
TRANSPORTE BOBINAS		MEJORA		SOLUCIONADO	
TRANSPORTE BOBINAS		MEJORA		SOLUCIONADO	
PUERTAS ALAMCEN INTELIGENTE		CORRECTIVO		SOLUCIONADO	15
LINEA DE VIDA		INSPECCION		PENDIENTE	
GOTERAS		INSTALACION		PENDIENTE	
A/C OFICINAS PRODUCCION		CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	30
AIREADORES		INSTALACION		APARCADO	
PISTOLAS DE CLAVAR PALETS	NEUMATICAS	CORRECTIVO	NO	SOLUCIONADO	120
CARRETILLA LINDE		CORRECTIVO		PENDIENTE	
CARRETILLA LINDE		CORRECTIVO		PENDIENTE	
GALERIA DE RESIDUOS		MEJORA		PENDIENTE	
GALERIA DE RESIDUOS		MEJORA		PENDIENTE	

RECURSO	GRUPO	TIPO	BLOQUEANTE	SITUACIÓN	TIEMPO (MINS)
ALMACEN INTELIGENTE		MEJORA		PENDIENTE	
BANDA TRANSPORTE RM04		MEJORA		SOLUCIONADO	
BANDA TRANSPORTE RM04		MEJORA		SOLUCIONADO	
BANDA TRANSPORTE RM04		MEJORA		SOLUCIONADO	
BANDA TRANSPORTE RM04		MEJORA		SOLUCIONADO	
BANDA TRANSPORTE RM04		MEJORA		SOLUCIONADO	
BANDA TRANSPORTE RM05		MEJORA		SOLUCIONADO	45
SISTEMA CONTRAINCENDIOS		MEJORA	NO	PRESUPUESTADO	
CARRETILLA LINDE - STILL R60/50		CORRECTIVO	SI	PRESUPUESTADO	
CARRETILLA TOYOTA		CORRECTIVO	SI	PRESUPUESTADO	
CAMION RENAULT		PREVENTIVO	NO	PRESUPUESTADO	
CAMION RENAULT		PREVENTIVO		PRESUPUESTADO	
CAMION RENAULT		PREVENTIVO		PENDIENTE	
CAMION RENAULT		CORRECTIVO		PENDIENTE	
GASOIL		PREVENTIVO		PENDIENTE	
PUERTA SALIDA REBOBINADORA II	PUERTA DE SALIDA	CORRECTIVO	NO	EN PROCESO	

ANEXO 2. FRECUENCIAS PROPIAS DE LOS ELEMENTOS

A continuación, se muestran los valores de las diferentes frecuencias de vibración obtenidas del excel que se ha realizado para tal fin. Las dimensiones de los rodamientos que en el aparecen se han obtenido de la web oficial del fabricante (SKF), mencionada en la bibliografía.

La tabla 3 siguiente muestra un glosario con las definiciones de las diferentes frecuencias características de los elementos analizados en el presente proyecto.

En la Ilustración 1 se pueden apreciar los diferentes aspectos que pueden presentar los espectros de vibraciones en función de los fallos que puedan ocurrir y donde se encuentren.

Tabla 5. Glosario de frecuencias características

GLOSARIO	
GMF	Frecuencia de engrane
FRD	Frecuencia de repetición de diente
FFE	Frecuencia de fase de ensamblaje
BL	Bandas laterales
BPFO	Frecuencia de deterioro de la pista exterior
BPFI	Frecuencia de deterioro de la pista interior
BSF	Frecuencia de deterioro de los elementos rodantes
FTF	Frecuencia fundamental de tren o de deterioro de la jaula
BFF	Frecuencia fundamental en correas de transmisión

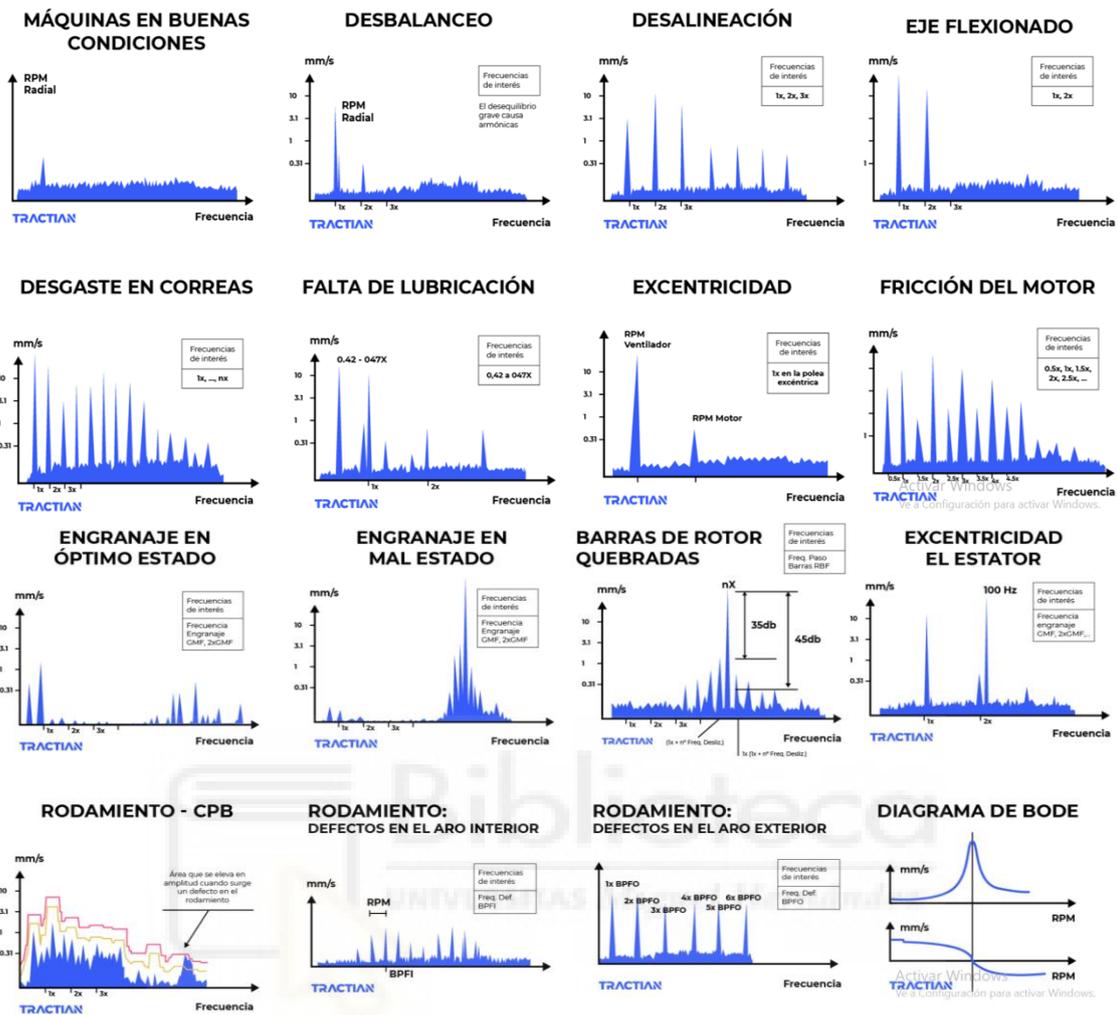


Figure 1. Aspecto de los espectros en diferentes fallos

1. MOTOR DE RODILLO DE TRACCIÓN

Tabla 6. Velocidades de giro y características mecánicas de los elementos que componen el motor rodillo de tracción

VELOCIDAD DE GIRO	
RPM (eje)	272,50
Hz	4,54
RPMc (corona)	55,40
Hz	0,91
RPMp (piñón)	272,00
Hz	4,53
RPMr (rodamiento)	272,50
Hz	4,54
RPMpm (polea motriz)	0,00
Hz	0,00
ENGRANAJES	
Zc (Número de dientes corona)	125
Zp (Número de dientes piñón)	25
NE	25
RODAMIENTO (NU 2312)	
NB (número de elementos rodantes)	18
BD (el diámetro de las bolas o rodillos)	25
PD (diámetro primitivo)	85
α (ángulo)	0

Tabla 7. Frecuencia de los defectos en el eje y/o apoyos en el motor de rodillo de tracción

DESALINEACIÓN	
1x	4,54
2x	9,08
3x	13,63
HOLGURAS	
subarmónicos	equidistantes a 4,54166666666667
desequilibrio o excentricidad	Principalmente radiales
1x	4,54
eje deformado	principalmente axial
1x	4,54
2x	9,08
FALTA DE LUBRICACIÓN	
0,45x	2,04375

Tabla 8. Frecuencias de los defectos en los engranajes en el motor de rodillo de tracción

GMF	113,75
FRD	0,91
FFE	4,55
BL	EQUIDISTANTES A 113,75
DESALINEACION	EJE CORONA
1x	0,91
2x	1,82
1x GMF	113,75
2x GMF	227,5
3x GMF	341,25
DIENTE DEFECTUOSO	
1x GMF	113,75
BL	equidistantes a 113,75
ERROR DE TRANSMISION	
1x GMF	113,75
2x GMF	227,5
3x GMF	341,25

Tabla 9 Frecuencias de los defectos en los rodamientos del motor de rodillo de tracción

DEFECTOS EN EL ARO EXTERIOR	
BPFO	28,85
1x BPFO	28,85
2x BPFO	57,71
3x BPFO	86,56
BPFI	52,90
BL a RPM de BPFI	BPFI $\pm 4,54166666666667$
BSF	7,05
FTF	1,60



2. APOYOS

Tabla 10 Velocidades de giro y características mecánicas de los elementos que componen de los apoyos

VELOCIDAD DE GIRO	
RPM (eje)	272,50
Hz	4,54
RPMc (corona)	55,40
Hz	0,91
RPMp (piñón)	272,50
Hz	4,54
RPMr (rodamiento)	272,50
Hz	4,54
RPMpm (polea motriz)	272,50
Hz	4,54
ENGRANAJES	
Zc (Número de dientes corona)	125
Zp (Número de dientes piñón)	25
NE	25
RODAMIENTO (22215 CCK)	
NB (número de elementos rodantes)	28
BD (el diámetro de las bolas o rodillos)	27
PD (diámetro primitivo)	102,5
α (ángulo)	11
DPM (diámetro de la polea motriz)	0
DC (desarrollo de la correa)	0

Tabla 11. Frecuencias de los defectos en los rodamientos de los apoyos

DEFECTOS EN EL ARO EXTERIOR	
BPFO	63,51
1x BPFO	63,51
2x BPFO	127,02
3x BPFO	190,53
BPFI	63,66
BL a RPM de BPFI	BPFI \pm 5.54
BSF	8,62
FTF	2,27

3. CUCHILLA 1 15-11-24

Tabla 12. Velocidades de giro y características mecánicas de los elementos que componen la cuchilla 1 fecha 15-11-24

VELOCIDAD DE GIRO	
RPM (eje)	66,0
Hz	1,10
RPMc (corona)	66,0
Hz	1,10
RPMp (piñón)	66,0
Hz	1,1
RPMr (rodamiento)	66,0
Hz	1,1
ENGRANAJES	
Zc (Número de dientes corona)	73
Zp (Número de dientes piñón)	73
NE	73
RODAMIENTOS (32024 X)	
NB (número de elementos rodantes)	19
BD (el diámetro de las bolas o rodillos)	37
PD (diámetro primitivo)	150
α (ángulo)	17

Tabla 13. Frecuencia de los defectos en el eje y/o apoyos en la cuchilla 1 fecha 15-11-24

DESALINEACIÓN	
1x	1,10
2x	2,20
3x	3,30
HOLGURAS	
subarmónicos	equidistantes a 1,1
desequilibrio o excentricidad	Principalmente radiales
1x	1,10
eje deformado	principalmente axial
1x	1,10
2x	2,20
FALTA DE LUBRICACIÓN	
0,45x	0,495

Tabla 14. Frecuencias de los defectos en los engranajes en la cuchilla 1 fecha 15-11-24

GMF	80,30
FRD	1,10
FFE	1,10
BL	EQUIDISTANTES A 80,3
DESALINEACION	EJE CORONA
1x	1,10
2x	2,20
1x GMF	80,3
2x GMF	160,6
3x GMF	240,9
DIENTE DEFECTUOSO	
1x GMF	80,30
BL	equidistantes a 80,30
ERROR DE TRANSMISION	
1x GMF	80,30
2x GMF	160,6
3x GMF	240,9

Tabla 15. Frecuencias de los defectos en los rodamientos en la cuchilla 1 fecha 15-11-24

DEFECTOS EN EL ARO EXTERIOR	
BPFO	11,16
1x BPFO	11,16
2x BPFO	22,32
3x BPFO	33,48
BPFI	9,74
BL a RPM de BPFI	BPFI \pm 1,1
BSF	2,22
FTF	0,59

4. CUCHILLA 1 20-12-24

Tabla 16. Velocidades de giro y características mecánicas de los elementos que componen la cuchilla 1 fecha 20-12-24

VELOCIDAD DE GIRO	
RPM (eje)	85,70
Hz	1,43
RPMc (corona)	85,70
Hz	1,43
RPMp (piñón)	85,70
Hz	1,43
RPMr (rodamiento)	85,70
Hz	1,43
ENGRANAJES	
Zc (Número de dientes corona)	73
Zp (Número de dientes piñón)	73
NE	73
RODAMIENTO (32024 X)	
NB (número de elementos rodantes)	19
BD (el diámetro de las bolas o rodillos)	37
PD (diámetro primitivo)	150
α (ángulo)	17

Tabla 17. Frecuencia de los defectos en el eje y/o apoyos en la cuchilla 1 fecha 20-12-24

DESALINEACIÓN	
1x	1,43
2x	2,86
3x	4,29
HOLGURAS	
subarmónicos	equidistantes a 1,42
desequilibrio o excentricidad	Principalmente radiales
1x	1,43
eje deformado	principalmente axial
1x	1,43
2x	2,86
FALTA DE LUBRICACIÓN	
0,45x	0,642

Tabla 18. Frecuencias de los defectos en los engranajes en la cuchilla 1 fecha 20-12-24

GMF	104,27
FRD	1,43
FFE	1,43
BL	EQUIDISTANTES A 104,27
DESALINEACION	EJE CORONA
1x	1,43
2x	2,86
1x GMF	104,27
2x GMF	208,53
3x GMF	312,80
DIENTE DEFECTUOSO	
1x GMF	104,27
BL	equidistantes a 104,27
ERROR DE TRANSMISION	
1x GMF	104,27
2x GMF	208,53
3x GMF	312,80

Tabla 19. Frecuencias de los defectos en los rodamientos en la cuchilla 1 fecha 20-12-24

DEFECTOS EN EL ARO EXTERIOR	
BPFO	14,49
1x BPFO	14,49
2x BPFO	28,98
3x BPFO	43,47
BPFI	12,65
BL a RPM de BPFI	BPFI \pm 1,42
BSF	2,88
FTF	0,76

5. CUCHILLA 2 15-11-24

Tabla 20. Velocidades de giro y características mecánicas de los elementos que componen la cuchilla 2 fecha 15-11-24

VELOCIDAD DE GIRO	
RPM (eje)	66,0
Hz	1,10
RPMc (corona)	66,0
Hz	1,10
RPMp (piñón)	66,0
Hz	1,1
RPMr (rodamiento)	66,0
Hz	1,1
ENGRANAJES	
Zc (Número de dientes corona)	73
Zp (Número de dientes piñón)	73
NE	73
RODAMIENTO (23026 CCK)	
NB (número de elementos rodantes)	50
BD (el diámetro de las bolas o rodillos)	32
PD (diámetro primitivo)	165
α (ángulo)	10

Tabla 21. Frecuencia de los defectos en el eje y/o apoyos en la cuchilla 2 fecha 15-11-24

DESALINEACIÓN	
1x	1,10
2x	2,20
3x	3,30
HOLGURAS	
subarmónicos	equidistantes a 1,1
desequilibrio o excentricidad	Principalmente radiales
1x	1,1
eje deformado	principalmente axial
1x	1,1
2x	2,2
FALTA DE LUBRICACIÓN	
0,45x	0,495

Tabla 22. Frecuencias de los defectos en los engranajes en la cuchilla 2 fecha 15-11-24

GMF	80,30
FRD	1,10
FFE	1,10
BL	EQUIDISTANTES A 80,30
DESALINEACION	EJE CORONA
1x	1,10
2x	2,20
1x GMF	80,30
2x GMF	160,6
3x GMF	240,9
DIENTE DEFECTUOSO	
1x GMF	80,30
BL	equidistantes a 80,30
ERROR DE TRANSMISION	
1x GMF	80,30
2x GMF	160,6
3x GMF	240,9

Tabla 23. Frecuencias de los defectos en los rodamientos en la cuchilla 2 fecha 15-11-24

DEFECTOS EN EL ARO EXTERIOR	
BPFO	31,98
1x BPFO	31,98
2x BPFO	63,95
3x BPFO	95,93
BPFI	23,02
BL a RPM de BPFI	BPFI \pm 1,1
BSF	2,76
FTF	0,64



6. CUCHILLA 2 20-12-24

Tabla 24. Velocidades de giro y características mecánicas de los elementos que componen la cuchilla 2 fecha 20.12.24

VELOCIDAD DE GIRO	
RPM (eje)	85,70
Hz	1,43
RPM (eje)	85,70
Hz	1,43
RPM (eje)	85,70
Hz	1,43
RPM (eje)	85,70
Hz	1,43
ENGRANAJES	
Zc (Número de dientes corona)	73
Zp (Número de dientes piñón)	73
NE	73
RODAMIENTO (23026 CCK)	
NB (número de elementos rodantes)	50
BD (el diámetro de las bolas o rodillos)	32
PD (diámetro primitivo)	165
α (ángulo)	10

Tabla 25. Frecuencia de los defectos en el eje y/o apoyos en la cuchilla 2 fecha 20-12-24

DESALINEACIÓN	
1x	1,43
2x	2,86
3x	4,29
HOLGURAS	
subarmónicos	equidistantes a 1,43
desequilibrio o excentricidad	Principalmente radiales
1x	1,43
eje deformado	principalmente axial
1x	1,43
2x	2,86
FALTA DE LUBRICACIÓN	
0,45x	0,642

Tabla 26. Frecuencias de los defectos en los engranajes en la cuchilla 2 fecha 20-12-24

GMF	104,27
FRD	1,43
FFE	1,43
BL	EQUIDISTANTES A 104,27
DESALINEACION	EJE CORONA
1x	1,43
2x	2,86
1x GMF	104,27
2x GMF	208,53
3x GMF	312,80
DIENTE DEFECTUOSO	
1x GMF	104,27
BL	equidistantes a 104,27
ERROR DE TRANSMISION	
1x GMF	104,27
2x GMF	208,53
3x GMF	312,80

Tabla 27. Frecuencias de los defectos en los rodamientos en la cuchilla 2 fecha 20-12-24

DEFECTOS EN EL ARO EXTERIOR	
BPFO	41,52
1x BPFO	41,52
2x BPFO	83,04
3x BPFO	124,56
BPFI	29,90
BL a RPM de BPFI	BPFI ±41,42
BSF	3,58
FTF	0,83



7. MOTOR CINTA LENTA 15-11-24

Tabla 28. Velocidades de giro y características mecánicas de los elementos que componen el motor de cinta lenta fecha 15-11-24

VELOCIDAD DE GIRO	
RPM (eje)	571
Hz	9,52
RPMc (corona)	571
Hz	9,52
RPMp (piñón)	0
Hz	0
RPMr (rodamiento)	571
Hz	9,52
RPMpm (polea motriz)	571
Hz	9,52
ENGRANAJES	
Zc (Número de dientes corona)	32
Zp (Número de dientes piñón)	32
NE	32
RODAMIENTO (6217 2RS)	
NB (número de elementos rodantes)	9
BD (el diámetro de las bolas o rodillos)	33,1
PD (diámetro primitivo)	117,5
α (ángulo)	0
CORREAS	
DPM (diámetro de la polea motriz)	156
DC (desarrollo de la correa)	2310

Tabla 29. Frecuencia de los defectos en el eje y/o apoyos en el motor de cinta lenta fecha 15-11-24

DESALINEACIÓN	
1x	9,52
2x	19,03
3x	28,55
HOLGURAS	
subarmónicos	equidistantes a 0,52
desequilibrio o excentricidad	Principalmente radiales
1x	9,52
eje deformado	principalmente axial
1x	9,52
2x	19,03
FALTA DE LUBRICACIÓN	
0,45x	4,28

Tabla 30. . Frecuencias de los defectos en los engranajes en el motor de cinta lenta fecha 15-11-24

GMF	304,53
FRD	9,52
FFE	9,52
BL	EQUIDISTANTES A 304,53
DESALINEACION	EJE CORONA
1x	9,52
2x	19,03
1x GMF	304,53
2x GMF	609,06
3x GMF	913,6
DIENTE DEFECTUOSO	
1x GMF	304,53
BL	equidistantes a 304,53
ERROR DE TRANSMISION	
1x GMF	304,53
2x GMF	609,06
3x GMF	913,6

Tabla 31. Frecuencias de los defectos en los rodamientos en el motor de cinta lenta fecha 15-11-24

DEFECTOS EN EL ARO EXTERIOR	
BPFO	30,76
1x BPFO	30,76
2x BPFO	61,52
3x BPFO	92,28
BPFI	54,91
BL a RPM de BPFI	BPFI \pm 9,52
BSF	15,56
FTF	3,42

Tabla 32. Frecuencia de fallo en las correas en el motor de cinta lenta fecha 15-11-24

FRECUENCIAS DE FALLO EN CORREAS (Hz)	
BFF	2,02
1x BFF	2,02
2x BFF	4,04
3x BFF	6,06

8. MOTOR CINTA LENTA 20-12-24

Tabla 33. Velocidades de giro y características mecánicas de los elementos que componen el motor de cinta lenta fecha 20-12-24

VELOCIDAD DE GIRO	
RPM (eje)	352
Hz	5,87
RPMc (corona)	352
Hz	5,87
RPMp (piñón)	0
Hz	0
RPMr (rodamiento)	352
Hz	5,87
RPMpm (polea motriz)	352
Hz	5,87
ENGRANAJES	
Zc (Número de dientes corona)	32
Zp (Número de dientes piñón)	32
NE	32
RODAMIENTO (6217 2RS)	
NB (número de elementos rodantes)	9
BD (el diámetro de las bolas o rodillos)	33,1
PD (diámetro primitivo)	117,5
α (ángulo)	0
CORREAS	
DPM (diámetro de la polea motriz)	156
DC (desarrollo de la correa)	2310

Tabla 34. Frecuencia de los defectos en el eje y/o apoyos en el motor de cinta lenta fecha 20-12-24

DESALINEACIÓN	
1x	5,87
2x	11,73
3x	17,60
HOLGURAS	
subarmónicos	equidistantes a 5,87
desequilibrio o excentricidad	Principalmente radiales
1x	5,87
eje deformado	principalmente axial
1x	5,87
2x	11,73
FALTA DE LUBRICACIÓN	
0,45x	2,64

Tabla 35. Frecuencias de los defectos en los engranajes en el motor de cinta lenta fecha 20-12-24

GMF	187,73
FRD	5,87
FFE	5,87
BL	EQUIDISTANTES A 187,73
DESALINEACION	EJE CORONA
1x	5,87
2x	11,73
1x GMF	187,73
2x GMF	375,46
3x GMF	563,2
DIENTE DEFECTUOSO	
1x GMF	187,73
BL	equidistantes a 187,73
ERROR DE TRANSMISION	
1x GMF	187,73
2x GMF	375,46
3x GMF	563,2

Tabla 36. Frecuencias de los defectos en los rodamientos en el motor de cinta lenta fecha 20-12-24

DEFECTOS EN EL ARO EXTERIOR	
BPFO	30,77
1x BPFO	30,77
2x BPFO	61,54
3x BPFO	86,56
BPFI	54,91
BL a RPM de BPFI	BPFI \pm 9,52
BSF	15,56
FTF	3,42

Tabla 37. Frecuencia de fallo en las correas en el motor de cinta lenta fecha 20-12-24

FRECUENCIAS DE FALLO EN CORREAS (Hz)	
BFF	1,24
1x BFF	1,24
2x BFF	2,49
3x BFF	3,73

9. MOTOR CINTA RÁPIDA

Tabla 38. Velocidades de giro y características mecánicas de los elementos que componen el motor de cinta rápida

VELOCIDAD DE GIRO	
RPM (eje)	308
Hz	5,13
RPMc (corona)	55,40
Hz	0,91
RPMp (piñón)	272,50
Hz	4,54
RPMr (rodamiento)	272,50
Hz	4,54
ENGRANAJES	
Zc (Número de dientes corona)	0
Zp (Número de dientes piñón)	0
NE	0
RODAMIENTO (22212 E)	
NB (número de elementos rodantes)	38
BD (el diámetro de las bolas o rodillos)	24
PD (diámetro primitivo)	85
α (ángulo)	10

Tabla 39. Frecuencia de los defectos en el eje y/o apoyos en el motor de cinta rápida

DESALINEACIÓN	
1x	5,13
2x	10,27
3x	15,40
HOLGURAS	
subarmónicos	equidistantes a 5,13
desequilibrio o excentricidad	Principalmente radiales
1x	5,13
eje deformado	principalmente axial
1x	5,13
2x	10,27
FALTA DE LUBRICACIÓN	
0,45x	2,31

Tabla 40. Frecuencias de los defectos en los rodamientos en el motor de cinta rápida

DEFECTOS EN EL ARO EXTERIOR	
BPFO	120,64
1x BPFO	120,64
2x BPFO	241,28
3x BPFO	361,92
BPFI	74,43
BL a RPM de BPFI	BPFI \pm 5,13
BSF	8,58
FTF	3,17