

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO – CHILE



**MODELO DE SISTEMA DE MEDICIÓN DE
VIBRACIONES PARA STAND DE LAMINACIÓN DE
ACERO EN CALIENTE**

ANTON SALOMÓN TROPA FLORES

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MECÁNICO**

PROFESOR GUÍA: DR. ING. DANILO ESTAY BARRIENTOS

PROFESOR CO-REFERENTE: ING. MARTÍN GUTIÉRREZ DURÁN

MAYO – 2023

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia, en especial a mi madre y hermanas por el apoyo incondicional durante todos mis años de estudio. Agradecer a mis amigos que hice en la universidad como Gabriel, Iván, Miguel y Cristian por su buena onda, carisma y apoyo. También agradecer a mi profesor guía Danilo Estay por su buena disposición y conocimientos durante el desarrollo de esta memoria.

Un agradecimiento especial para los trabajadores del Laminador Colina en AZA, en particular a Yuliano y Carolina por compartir su experiencia y conocimientos conmigo, también por la buena disposición, simpatía y el buen ambiente de trabajo. También agradecer a Martín por su buena disposición y por darme la oportunidad de desarrollar esta memoria y permitirme seguir creciendo dentro de la empresa. A Nicole quien ha sido una de las personas más cercanas de la empresa y me ha dado muy buenos consejos además de su buena onda y simpatía.

Resumen

El presente trabajo de titulación es la determinación de un sistema de medición de vibraciones que permita predecir fallas en un stand de laminación en caliente para reducir los costos de detenciones no planificadas, los costos de mantenimiento y los riesgos a la seguridad del personal.

El objetivo general de este trabajo es determinar un sistema de medición de vibraciones apropiado capaz de predecir fallas en un stand de laminación en caliente.

Esta memoria se desarrolla en Aceros AZA S.A., el mayor productor de acero verde (a partir de chatarra ferrosa) del país. Su oferta consiste en barras y rollos de refuerzo para hormigón, alambrón, perfiles laminados en caliente y barra helicoidal Saferock destinados a diferentes mercados. El área de enfoque es Laminación Colina, donde se realiza el proceso de laminación para que el acero adopte la forma del producto final.

Primero se investigó sobre el mantenimiento condicional y las herramientas que entrega para la prevención y predicción de fallas y defectos en los equipos. Dentro de estas técnicas se encontraron 3 ampliamente utilizadas en la industria de laminación: análisis de aceite, análisis de vibraciones y termografía infrarroja. Se describió cada una de estas 3 técnicas y sus aplicaciones en la industria.

Posteriormente, se realizó un análisis de fallas a partir de los datos de las interrupciones recolectados entre los años 2019 y 2022. A estos datos se les aplicaron diferentes filtros para cuantificar el tiempo de interrupción generado por los componentes de los stands de laminación. Se procedió a determinar el stand más crítico y a calcular el impacto económico de las fallas por rodamientos, tanto por costos de no producción como por costos de mantenimiento. Con esto se decidió avanzar en un plan piloto para el stand M11H.

Luego, se detalló la condición operacional del stand M11H y las propuestas de sistemas de monitoreo de vibraciones cotizadas para continuar con el plan piloto. Con la elección de una de las propuestas se llevó a cabo la puesta en marcha del sistema de monitoreo y se realizaron dos periodos de monitoreo donde se recolectaron los datos de los acelerómetros para las métricas de temperatura y vibración en velocidad y aceleración.

Con lo anterior, se estimaron los valores de alerta temprana preventiva y críticos para cada sensor montaje en el stand utilizando como referencia la norma ISO 20816-3:2022 para la vibración RMS en velocidad y se homologó para las otras dos métricas. Además, se formularon los avisos en la plataforma de monitoreo con la finalidad de detectar alteraciones en el funcionamiento del equipo e intervenirlos antes de que se produzca la falla.

Finalmente, se presentaron las conclusiones del trabajo realizado y algunas recomendaciones para futuros trabajos que tengan base en esta memoria.

Palabras claves: predicción de fallas, análisis de vibraciones, sistema de monitoreo de vibraciones, acelerómetro, stand de laminación en caliente, valor críticos.

Abstract

The present degree work is the determination of a vibration measurement system that allows predicting failures in a hot rolling mill stand to reduce the costs of unplanned stops, maintenance costs and risks to the safety staff.

The overall objective of this work is to determine an appropriate vibration measurement system capable of predicting failures in a hot rolling mill stand.

This report is developed in Aceros AZA S.A., the largest producer of green steel (from ferrous scrap) in the country. Its offer consists of reinforcing bars and rolls for concrete, wire rod, hot rolled profiles for different markets. The focus area is Laminación Colina, where the hot rolling process is carried out so that the steel takes the shape of the final product.

First, conditional maintenance and the tools it provides for the prevention and prediction of equipment failures and defects were investigated. Within these techniques, 3 were widely used in the hot rolling industry: oil analysis, vibration analysis and infrared thermography. Each of these 3 techniques and their applications in industry were described.

Afterwards, a failure analysis was carried out based on the interruption data collected between the years 2019 and 2022. Different filters were applied to these data to quantify the delays generated by the components of the rolling mill stands. The most critical rolling mill stand was determined, and the economic impact of bearing failures was calculated, both due to non-production costs and maintenance costs. With this, the decision was made to advance in a pilot plan at rolling mill M11H.

Then, the operational condition of rolling mill M11H and the proposed vibration monitoring systems listed to continue with the pilot plan were detailed. With the choice of one of the proposals, the implementation of the monitoring system was carried out and two monitoring periods were carried out where the data from the accelerometers were collected for the temperature and vibration metrics in speed and acceleration.

With the above, the preventive and critical early warning values for each sensor mounted on the roll mill were estimated using the ISO 20816-3:2022 standard for speed RMS vibration as a reference and standardized for the other two metrics. In addition, the warnings were formulated on the monitoring platform to detect alterations in the operation of the equipment and intervene before the failure occurs.

Finally, the conclusions of the work carried out and some recommendations for future work based on this report were presented.

Keywords: predicting failures, vibration analysis, vibration monitoring system, hot rolling mill stand, accelerometer, warning values

Glosario

[g RMS]: Medida de la aceleración en términos de la aceleración de gravedad, la cual es aproximadamente 9,81 [mm/s²] a nivel del mar.

1x: Velocidad de rotación de la flecha.

Cobble: Pérdida de la barra de acero producto de un mal funcionamiento de la línea de producción.

Frecuencia: Número de ciclos que ocurren en un segundo, su unidad es el Hertz (Hz).

Flecha: Elemento rotatorio, por lo general, de sección transversal circular, que se emplea para transmitir potencia o movimiento.

Gorrones: Las partes de los ejes que giran en los apoyos.

Máquina: Objeto fabricado y compuesto por un conjunto de piezas ajustadas entre sí que se usa para facilitar o realizar un trabajo determinado, generalmente transformando una forma de energía en movimiento o trabajo.

RPM: Revoluciones por minuto, son una unidad de medida utilizada para expresar frecuencia o velocidad angular e indican la cantidad de rotaciones por minuto que completa un cuerpo que gira.

Rodamiento: Elemento mecánico de precisión, utilizado para transferir el movimiento; soportar y guiar los elementos giratorios u oscilantes de las máquinas, y transfieren las cargas entre los componentes de la máquina. Ofrecen gran precisión y baja fricción y, por lo tanto, admiten velocidades de giro elevadas al tiempo que reducen el ruido, el calor, el consumo de energía y el desgaste.

Índice

Agradecimientos	II
Resumen	III
Abstract	IV
Glosario	V
Índice	VI
Índice de figuras	VIII
Índice de tablas	X
Introducción	XI
Objetivos	XII
Plan de trabajo	XIII
1. Antecedentes generales de la empresa Aceros AZA	1
1.1. Misión	1
1.2. Visión	2
1.3. Valores	2
1.4. Ubicación	2
1.5. Proceso productivo de la empresa.....	3
2. Planteamiento del problema	5
2.1. El problema.....	5
2.2. Justificación	7
3. Marco teórico	8
3.1. Tipos de fallas	8
3.2. Mantenimiento condicional	8
3.2.1. Mantenimiento predictivo.....	9
3.2.2. Mantenimiento proactivo.....	10
3.3. Técnicas de mantenimiento condicional utilizadas en laminación en caliente	11
3.3.1. Análisis de aceite	11
3.3.2. Análisis de vibraciones.....	15
3.3.3. Termografía infrarroja	33
4. Análisis de fallas	37
4.1. Stand de laminación tren medio.....	37

4.2.	Análisis de fallas	40
4.3.	Impacto económico de las fallas	45
5.	Caja M11H y propuestas de medición y monitoreo de vibraciones	47
5.1.	Propuestas de sistemas de monitoreo.....	52
5.1.1.	Propuesta de sistema de monitoreo online para stands de laminación, empresa RODACENTER de SKF	52
5.1.2.	Propuesta para monitoreo remoto continuo con sensores WIFI para stand de laminación, empresa SODYCOR de RYASA MX	57
5.2.	Selección del sistema de medición de vibraciones	62
6.	Puesta en marcha del sistema, selección de métricas y análisis de valores obtenidos.....	65
7.	Estimación de valores críticos y formulación de avisos preventivos.....	76
7.1.	Velocidad	76
7.2.	Aceleración	78
7.3.	Temperatura	79
Conclusiones.....		83
Bibliografía.....		85
Anexos.....		87
	Sistema motriz stands de Laminación Colina.....	87
	Componentes stand de laminación de tren medio	88
	Velocidades de giro de cardanes en base receta HMI	90
	Sensor de vibraciones acelerómetro SKF	91
	Sensor de vibraciones acelerómetro DODGE	92
	Monitoreo de vibraciones primer periodo de monitoreo	95
	Monitoreo de vibraciones segundo periodo de monitoreo	97

Índice de figuras

Figura 0.1: Operación de stand de laminación en caliente de acero en planta Colina, Aceros AZA. [1]	XI
Figura 1.1: Aeropuerto de Santiago, AZA en obras. [1]	1
Figura 1.2: Ubicación de la planta Colina de AZA.	2
Figura 1.3: Diagrama proceso productivo Planta Colina Aceros AZA S.A. [1]	3
Figura 1.4: Layout general del proceso en Laminación Colina, Aceros AZA. [1]	4
Figura 2.1: Stand o caja de laminación en caliente D1H.....	5
Figura 2.2: Cobble en tren medio por trabamiento de barra en un stand.	6
Figura 3.1: Intervalo de reversibilidad entre mantenimiento preventivo y proactivo. [6]....	10
Figura 3.2: Diagrama simplificado de la obtención del aceite lubricante mineral. [6]	11
Figura 3.3: Concentración de partículas de acuerdo con el código ISO 4406. [6]	14
Figura 3.4: Movimiento armónico simple. [7]	15
Figura 3.5: Dominio del tiempo vs dominio de la frecuencia. [7].....	17
Figura 3.6: Espectro de una señal periódica. [7]	19
Figura 3.7: Espectro de una onda senoidal modulada en frecuencia. [7]	20
Figura 3.8: Espectro de una onda modulada en amplitud. [7].....	21
Figura 3.9: Ejemplo de modulación de amplitud en rodamientos cuando hay una grieta. [7]	21
Figura 3.10: Forma de onda rectificada de señal de rodamiento. [7]	22
Figura 3.11: Envolvente de la señal del rodamiento. [7].....	22
Figura 3.12: Ejemplo de un montaje de transductor de desplazamiento. [7]	23
Figura 3.13: Ejemplo de sensor de velocidad. [7]	24
Figura 3.14: Esquema básico de un acelerómetro. [6]	25
Figura 3.15: Ejemplo de ubicaciones correctas e incorrectas de un acelerómetro. [7]	26
Figura 3.16: Geometría de un rodamiento para las frecuencias características.....	30
Figura 3.17: Modulación de amplitud al ritmo FTF. [7]	31
Figura 3.18: Excesivo calentamiento por falla sintomática en rodamientos. [6]	36
Figura 4.1: Disposición orientativa de los grupos y sistemas principales de la caja de laminación.	38
Figura 4.2: Sistema motriz de un stand de laminación horizontal.....	39
Figura 4.3: Diagrama de Pareto de las interrupciones en el Laminador Colina, periodo 2019 - 2022.....	40
Figura 4.4: Gráfico duración interrupciones cajas de laminación desde el año 2019 hasta agosto 2022.....	41
Figura 4.5: Gráfico duración interrupciones mecánicas y de equipo de cambio en cajas de laminación.	42
Figura 4.6: Gráfico duración fallas en cajas de laminación asociadas a rodamientos.....	43
Figura 4.7: Diagrama de Pareto duración total en cajas de laminación asociadas a rodamientos.	44
Figura 5.1: Dimensiones del rodamiento RBC4-0103 F. [14]	47

Figura 5.2: Búsqueda y selección del rodamiento en SKF Bearing Select. [15].....	48
Figura 5.3: Frecuencias del rodamiento para la velocidad mínima de giro en la caja M11H. [15].....	49
Figura 5.4: Sistema de lubricación de bastidores (con distribuidor) en stand de laminación.	51
Figura 5.5: Valorización propuesta de sistema de monitoreo online RODACENTER.....	53
Figura 5.6: Ubicación de acelerómetros según propuesta de RODACENTER.	54
Figura 5.7: Unidad de monitoreo IMX-16 SKF, propuesta RODACENTER.....	55
Figura 5.8: Tacómetro MFS211, propuesta RODACENTER.	55
Figura 5.9: Certificado acelerómetro piezoeléctrico inalámbrico DODGE, propuesta SODYCOR.	58
Figura 5.10: Modelo de etapa 3, propuesta SODYCOR de RYASA MX.....	60
Figura 5.11: Ejemplo de visualización en Power BI de un monitoreo de vibraciones realizado por RYASA MX.	61
Figura 6.1: Definición de posiciones de los sensores en stand M11H.	65
Figura 6.2: Limpieza de las zonas de interés en stand M11H.	66
Figura 6.3: Bases roscadas para el montaje de los acelerómetros.	66
Figura 6.4: Instalación de bases para sensores al stand M11H.	67
Figura 6.5: Montaje de prueba de acelerómetros en taller de mantenimiento.....	67
Figura 6.6: Padrón de montaje de sensores acelerómetros en stand M11H.	68
Figura 6.7: Dashboard en Dodge Optify con el usuario administrador. [17]	69
Figura 6.8: Gráfico de temperatura para el sensor LOM1 en el día 13/01/2023. [17]	70
Figura 6.9: Gráficos de aceleración y velocidad para 4 sensores.	70
Figura 6.10: Plant, equipos monitoreados más información y configuración de los sensores. [17].....	71
Figura 6.11: Stand M11H en proceso con sensores montados, Laminación Colina.	72
Figura 6.12: Estado rodamiento bastidor superior LM, stand M11H.....	73
Figura 7.1: Ventana Assets, sección Last Measurement. [17].....	80
Figura 7.2: Ventana Assets, fijación de alertas para el sensor LOM1. [17]	81
Figura 7.3: Prueba de notificación de alarmas por correo electrónico.	82

Índice de tablas

Tabla 3.1: División del espectro infrarrojo.....	34
Tabla 4.1: Costo total anual por fallas en cajas de laminación asociadas a rodamientos.....	45
Tabla 4.2: Costos de mantenimiento asociados a la reparación de stands y rodamientos....	46
Tabla 5.1: Frecuencias del rodamiento BC4-0103 (genérico) en función de las velocidades de giro. [15]	49
Tabla 5.2: Estimaciones de las frecuencias del rodamiento BC4-0103 en función de las velocidades de giro.	50
Tabla 5.3: Designación de elementos de medición y recopilación de datos.	57
Tabla 5.4: Evaluación multicriterial para la selección del sistema de medición de vibraciones, MMC.	62
Tabla 5.5: Evaluación del impacto en el CAPEX producto de adicionales asociados a la ejecución del proyecto, MMC.	63
Tabla 5.6: Análisis comercial del proyecto, para la selección del mejor oferente, MMC. ..	64
Tabla 7.1: Tabla de severidad de vibración para velocidad en [mm/s], valores RMS.	77
Tabla 7.2: Tabla de severidad de vibración para aceleración en [g RMS], valores RMS....	78
Tabla 7.3: Tabla de severidad de temperatura, [°C].	79
Tabla 7.4: Resumen valores de alerta temprana preventiva y críticos para cada métrica del stand M11H.	80

Introducción

Actualmente las empresas productivas basan su operación en los niveles de producción y en la calidad de sus productos que los distinga del resto de sus competidores, pero también en los compromisos sociales y medioambientales con las comunidades en las que se encuentran insertas. Para aumentar los niveles de producción y calidad de los productos, se aplican estrategias de mantenimiento y técnicas de mejoramiento continuo, con el fin de reducir los costos de operación, aumentar la calidad del producto, disminuir los costos de mantenimiento y asegurar la seguridad de sus trabajadores. Por otro lado, dentro de los compromisos sociales y medioambientales, las empresas buscan aplicar modelos de sostenibilidad desde sus raíces.

La empresa en la que se desarrolló esta memoria, Aceros AZA, es el mayor productor de acero reciclado de Chile. También es denominado acero verde, ya que es fabricado a partir de chatarra ferrosa con la menor huella de carbono del país y una de las más bajas del mundo [1]. Es vital que los equipos de laminación como el stand del tren laminador mostrado en la Figura 0.1, puedan cumplir su función a cabalidad evitando las posibles fallas durante su operación.



Figura 0.1: Operación de stand de laminación en caliente de acero en planta Colina, Aceros AZA. [1]

La laminación o laminado es un proceso industrial mediante el cual se reduce el espesor de un material, en este caso una palanquilla de acero, utilizando cajas o stands de laminación, que se componen de dos cilindros de trabajo que giran a ciertos rpm. La palanquilla es arrastrada por la contra rotación de los cilindros, y el espacio entre estos controla el grado de la reducción de la sección y el cambio de la forma en el material laminado entre las cajas subsiguientes. Debido a la presión que ejercida a la palanquilla sumado con la alta temperatura a la que viene el material (cercano a los 1000 °C), se logra una reducción de la sección transversal con mayor facilidad debido a la alta ductilidad que presenta el acero a altas temperaturas [1].

Objetivos

A continuación, se enuncia el objetivo principal de esta memoria, junto con los objetivos específicos como los pasos a seguir para el cumplimiento del objetivo principal:

Objetivo general:

- Determinar un sistema de medición de vibraciones apropiado capaz de predecir fallas en un stand de laminación en caliente.

Objetivos específicos:

- Identificar los diferentes sistemas de detección de fallas en la industria de laminación en caliente.
- Realizar un levantamiento de las fallas ocurridas en los stands de laminación en caliente de la empresa.
- Escoger tipo de sensores a utilizar para el sistema de medición y su ubicación en el montaje en base a las propuestas de sistemas de monitoreo de vibraciones.
- Estimar los valores críticos característicos y los de alerta temprana del sistema para prevenir fallas en los rodamientos del stand.
- Formular los avisos preventivos de falla en base a los valores críticos característicos.

Plan de trabajo

El plan de trabajo se basa en seguir ordenadamente los objetivos específicos planteados en los Objetivos.

La primera etapa se desarrolla en el capítulo **Marco teórico** y consiste en identificar los sistemas de detección de fallas utilizados en la industria de laminación y justificar por qué se decide continuar con el análisis de vibraciones por sobre las demás herramientas.

En la segunda etapa se realiza un levantamiento de las fallas ocurridas en los stands de laminación en caliente que posee la empresa. Esto se muestra en el capítulo **Análisis de fallas**, donde se parte con una descripción del stand de laminación para un mejor entendimiento del equipo, y se analizan los informes de hecho-causa-acción desde el año 2019 con la finalidad de identificar el tipo de falla en el stand, su localización, el tiempo de detención que provocó dicha falla y el impacto económico que tiene esta interrupción.

La tercera etapa descrita en el capítulo **Caja M11H y propuestas de medición y monitoreo de vibraciones**, se basa en escoger los sensores adecuados para el sistema de medición de vibraciones como parte de un plan piloto para un stand de laminación. Esto se realiza en base al análisis de las propuestas de sistemas de monitoreo recibidas, ya con la determinación del stand más crítico, se plantea la ubicación de los sensores en el montaje del equipo.

En la cuarta etapa se narra el montaje de los sensores y se realiza un análisis de los datos obtenidos en el monitoreo de vibraciones, en el capítulo **Puesta en marcha del sistema, selección de métricas y análisis de valores obtenidos**. Adicionalmente se estiman los valores críticos de vibraciones y los valores de alerta temprana para prevenir y predecir fallas en los rodamientos del stand por cada sensor en base a los periodos de monitoreo realizados, esto se desarrolla en el capítulo **Estimación de valores críticos y formulación de avisos preventivos**.

Finalmente, en la quinta etapa también mostrada en el capítulo **Estimación de valores críticos y formulación de avisos preventivos**, se realiza la formulación de los avisos preventivos de falla y los avisos críticos en base a los valores previamente definidos, con la finalidad de facilitar la reportabilidad a los encargados de los equipos y a las jefaturas encargadas.

1. Antecedentes generales de la empresa Aceros AZA

Aceros AZA, en adelante AZA, es el mayor reciclador de Chile con una capacidad instalada para producir 520 mil toneladas de acero al año, provenientes de más de 500 mil toneladas de chatarra ferrosa reciclada. El acero verde de AZA está presente en grandes obras del país contribuyendo a su desarrollo sostenible. La empresa cuenta con una dotación de 572 trabajadores, donde el 15% son mujeres [1].

Cabe agregar que, solo el 2021 la chatarra reciclada por AZA fue de 561.852 toneladas.

La principal oferta de AZA se concentra en barras y rollos de refuerzo para hormigón, alambρόn, perfiles laminados en caliente y barra helicoidal Saferock, la que se destina a los mercados de la construcción civil, industria metalmecánica y minería. La Figura 1.1 muestra un ejemplo de AZA en obras; el Aeropuerto de Santiago. [1]

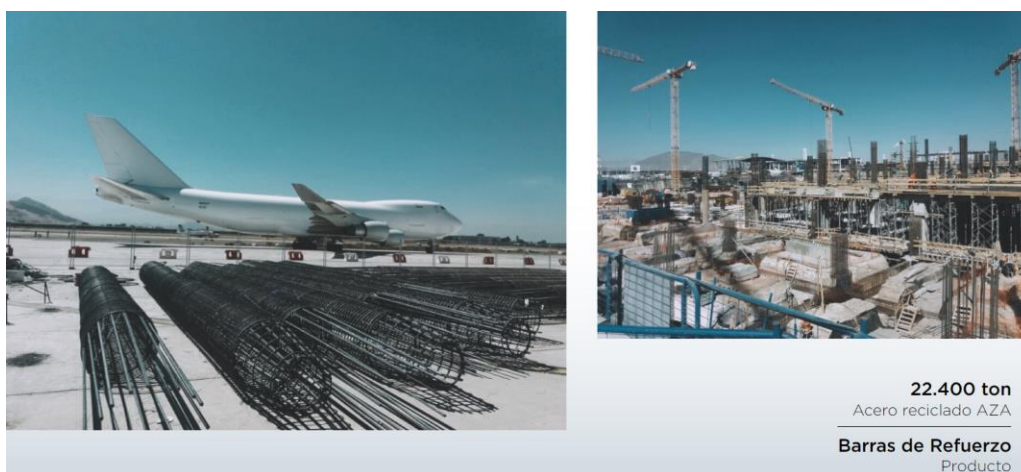


Figura 1.1: Aeropuerto de Santiago, AZA en obras. [1]

La economía circular es el corazón del negocio de AZA, lo que sumado al compromiso de reducción de huella de carbono en un 50% al 2030, la sitúa como la primera empresa latinoamericana del sector en obtener la validación de su compromiso de carbono neutralidad ante el Science Based Target (SBTi) [1].

1.1. Misión

Crear valor para nuestros clientes, proveedores, accionistas, colaboradores y la sociedad; reciclando, produciendo, transformando y comercializando acero y sus coproductos en forma sostenible.

1.2. Visión

Ser referentes en los negocios en que actuamos.

1.3. Valores

Cuidamos la vida, Nos conectamos como equipo, Creamos valor a nuestros clientes, Innovamos, Vivimos la excelencia, Somos sostenibles, Somos íntegros, Hacemos que las cosas pasen

1.4. Ubicación

AZA tiene 2 plantas productivas en el país. La casa matriz de AZA se encuentra en Renca, y la planta más moderna se encuentra en Colina. Además, AZA cuenta con 3 centros de reciclaje de capacidad industrial en Antofagasta, Concepción y Temuco. La chatarra es derivada a la planta ubicada en Colina, la que es fundida en un horno eléctrico para transformarse en “palanquillas”.



Figura 1.2: Ubicación de la planta Colina de AZA.

La Figura 1.2 muestra la ubicación geográfica de la planta Colina. La planta se encuentra encerrada en negro a la altura del kilómetro 18 ½ de la Panamericana Norte, y como referencia está la intersección de Panamericana Norte con la autopista Nororiente encerrada rojo.

1.5. Proceso productivo de la empresa

El diagrama del proceso productivo en la planta Colina se muestra en la Figura 1.3, donde se señalan 4 grandes etapas.

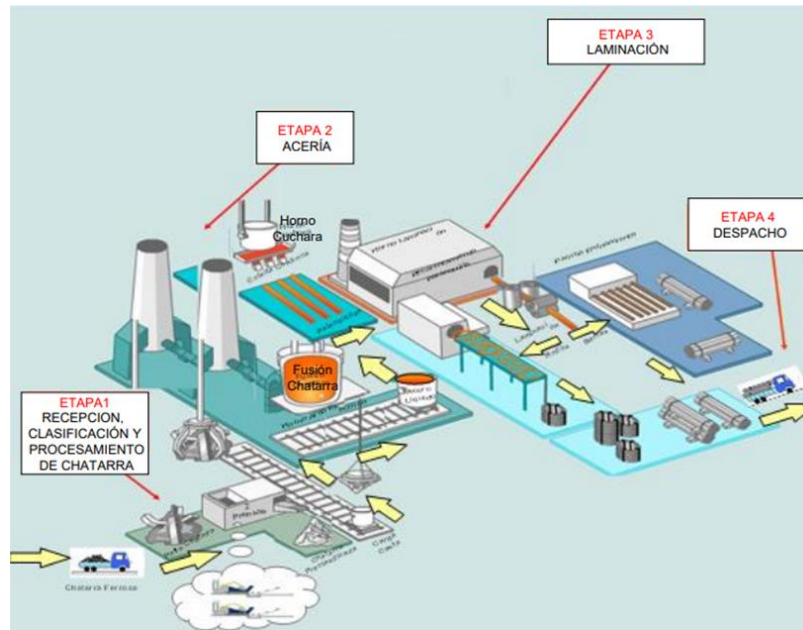


Figura 1.3: Diagrama proceso productivo Planta Colina Aceros AZA S.A. [1]

En la etapa 1: “Recepción, clasificación y procesamiento de chatarra”, la chatarra recibida en planta es introducida en una prensa, donde se fragmenta a una densidad adecuada para separar magnéticamente los productos no ferrosos de la chatarra. La chatarra se clasifica en función de su tamaño, peso, composición química, densidad de material, grado de impurezas y proceso de descarga estableciendo las siguientes denominaciones para identificar cada tipo: chatarra lista, oxicorte o prensa. Posteriormente, con ayuda de un electroimán se prepara una cesta con chatarra que alimentará el horno eléctrico de la acería.

En la etapa 2: “Acería”, se divide en horno eléctrico y colada continua. Primero el horno completa su carga de chatarra, se cierra e inicia el proceso de fusión mediante la energía liberada por un arco eléctrico entre tres electrodos de grafito. En aproximadamente una hora, 60 toneladas de acero líquido a unos 1700 °C son vaciados a un recipiente llamado cuchara. Posteriormente, el acero inicia un proceso de refinación en la misma cuchara, donde termina de ajustarse la composición química final. Luego, la cuchara con el acero líquido es trasladada a la etapa de colada continua. Aquí comienza el proceso de solidificación, vaciando todo el acero líquido a un receptáculo o distribuidor, que permite alimentar a varias lingoteras metálicas refrigeradas con agua. A medida que el acero pasa por las lingoteras, se va solidificando, hasta formar un hilo continuo de acero ya sólido, que da lugar a la palanquilla.

En la etapa 3: “Laminación”, primero se vuelve a recalentar la palanquilla a una temperatura uniforme de 1200°C en un horno horizontal. A esta temperatura el acero se comporta en forma plástica, facilitando su deformación en la laminación. Luego, la palanquilla alimenta un tren de laminación, donde se va reduciendo su sección en forma secuencial, hasta alcanzar la forma del producto final. Este producto final puede ser barra recta o rollo.

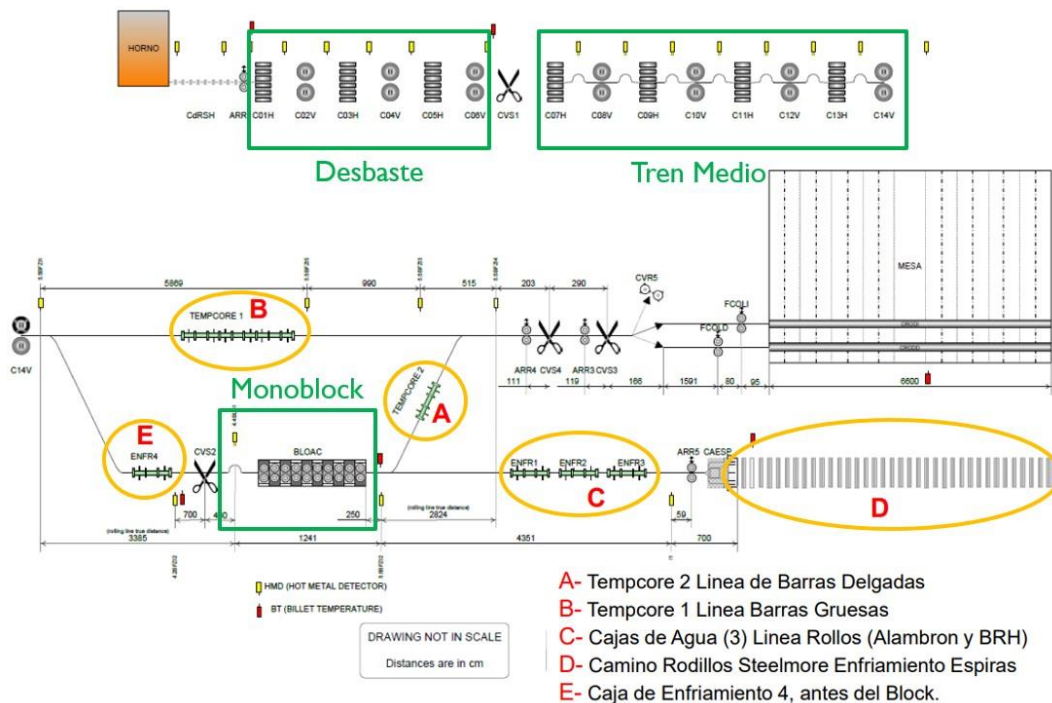


Figura 1.4: Layout general del proceso en Laminación Colina, Aceros AZA. [1]

El proceso de laminación en la planta Colina se aprecia con mayor detalle en el Layout mostrado en la Figura 1.4. La palanquilla sale del horno y entra al tren laminador donde se encuentran los stands de laminación, estos se dividen en Desbaste y Tren Medio. Luego la barra tiene 3 caminos posibles; 2 de estos son para producir barras rectas ("B", "E-A") que luego son depositadas en una parrilla de enfriamiento, donde terminan de enfriarse en forma rectilínea y homogénea, y una vez frías, las barras son cortadas en largos comerciales para luego formar paquetes de 1000 o 2000 [kg]. El otro camino es para rollo y alambres ("E-C-D"), donde la barra se vuelve a laminar en un segundo grupo de stands más pequeños llamado Monoblock, para luego alimentar un equipo formador de espiras, desde donde se trasladan y enfrían las espiras, hasta generar un rollo de aproximadamente 1500 [kg].

En la etapa 4: “Despacho”, El acero se almacena en una nave de productos terminados para su despacho al cliente. La terminación del proceso permite que los productos se encuentren debidamente etiquetados, donde se identifica: tipo de producto, peso, calidad del acero, diámetro nominal, entre otros. [1]

2. Planteamiento del problema

2.1. El problema

La operación del proceso de laminación en la planta se realiza las 24 hrs del día, los 7 días de la semana (con ciertas excepciones de días festivos), con el paso de los años han ido en aumento los niveles de producción de acero laminado, por lo que se requiere un sistema de producción confiable y duradero, donde no se produzcan fallas en los stands de laminación que son los encargados de darle la forma y el estriado a la barra de acero. El tren de laminación la planta Colina tiene un total de 14 stands, donde los primeros 6 se consideran de desbaste y los otros 8 del tren medio.

La Figura 2.1 muestra el stand (caja) horizontal n°1, también denominado H-1 (H: Horizontal), en el cual se aprecia cómo es la estructura de un stand, junto con los dos cilindros laminadores por entremedio de los cuales pasa la palanquilla en caliente a una temperatura cercana a los 1000 °C.



Figura 2.1: Stand o caja de laminación en caliente D1H.

Cuando se produce una falla en un stand de laminación, se detiene abruptamente el tren laminador, produciéndose una detención no planificada. Esta detención afecta la producción de barra laminada y genera un costo de no producción.

Si en el momento de la falla justo se estaba laminando una palanquilla, puede producirse un “cobble”.

Un “cobble” puede ocurrir cuando hay un mal funcionamiento de la línea los cilindros, la línea de acero se desvía de la trayectoria de los cilindros, o porque el extremo de la palanquilla de acero se parte. Si un cobble ocurre en el frente de la palanquilla, el resto del material que se encuentra detrás sigue siendo empujado por los cilindros de los otros stands. El acero al frente de la línea no tiene adónde ir y aumenta la presión rápidamente sobre la barra laminada, el material comienza a enrollarse y de golpe sale expulsado de la línea el tren laminador al rojo vivo, tal y como se muestra en Figura 2.2:



Figura 2.2: Cobble en tren medio por trabamiento de barra en un stand.

Una falla y un posible cobble en el tren laminador puede provocar daño material a los equipos y/o daño a un colaborador. Además, se debe activar el plan de contingencia en el que los operadores cortan el acero, por medio de oxicorte, por tramos para destrabar el acero del tren laminador que se encuentra al rojo vivo, pudiendo sufrir quemaduras en el proceso.

2.2. Justificación

Con lo descrito en la sección de El problema, la justificación para desarrollar un sistema de medición de vibraciones en los stands del tren laminador se basa en 3 pilares fundamentales:

- Reducción de los costos de ineficiencia asociados a las detenciones no planificadas de los stands del tren laminador.
- Reducción de los costos de mantenimiento asociados a repuestos.
- Prevención de accidentes durante la falla o tratando de solucionar esta.

Las detenciones no planificadas generan costos de ineficiencia asociados a la no producción, y al no tener como identificar con anticipación las fallas en los stands, estos fallan en el proceso. Actualmente, por hora de detención no planificada en el proceso se genera un costo cercano a los 8070 USD, sin considerar averías de equipos ni cobbles. Por lo tanto, se apunta a reducir en un 50% las interrupciones por cada caja que tenga el sistema de medición y monitoreo de vibraciones.

Los costos de mantenimiento asociados a los repuestos del equipo, como rodamientos, sellos, guías, entre otros, han sido significativos los últimos años. Al implementar un sistema de medición y monitoreo de vibraciones será posible anticiparse a las fallas y a las detenciones no planificadas en la línea de producción, lo que permitirá reducir en hasta un 50% los costos de mantenimiento asociados a repuestos, ya que será posible corregir la condición del stand con anticipación.

Los posibles accidentes durante la falla se pueden dar en el caso de que un trabajador esté cerca del proceso o tratando de solucionarla, tales como quemaduras con la barra de acero o con la cascara que bota esta (también llamada laminilla) y caídas al momento de sacar los trozos de barra atorados en la línea.

La presente memoria aborda el análisis realizado para determinar el sistema de medición de vibraciones más apropiado para predecir fallas y generar alertas tempranas preventivas en el funcionamiento de los rodamientos de los stands de laminación del tren laminador. Todo fundamentado en los 3 pilares ya mencionados.

White [2] señala que la medición de vibraciones se enmarca como una prueba no destructiva para percibir los síntomas con los que la máquina o equipo advierte antes de fallar. Además, señala que el análisis periódico de vibraciones es la técnica que proporciona la información más importante acerca de su funcionamiento interno.

Los productos fabricados deben cumplir con altos estándares de calidad como lo es la norma chilena NCh204-2020: Acero - Barras laminadas en caliente para hormigón armado [3] y la norma NCh3334 [4]. Por lo tanto, es de vital importancia el buen funcionamiento de los stands de laminación para obtener un producto laminado que cumpla los estándares de calidad.

3. Marco teórico

En este capítulo se desarrollan las descripciones de los principales temas y conceptos que componen la teoría de esta memoria. Esta información ha sido recopilada de libros y papers científicos además de memorias realizadas en siderúrgicas del mundo.

3.1. Tipos de fallas

La falla según Pistarelli, es la pérdida de capacidad, ya sea total o parcial, de un activo mantenible para satisfacer un nivel de operación establecido por su función. Cabe agregar que la avería es un caso particular de falla, donde esta impide el funcionamiento total del equipo. Además, es posible agrupar las fallas en 4 tipos: funcional, sintomática, simultánea y recurrente [5].

3.2. Mantenimiento condicional

El mantenimiento se puede definir como un proceso que tiene como objetivo lograr los niveles establecidos de disponibilidad para las funciones de la instalación en su contexto operativo. Esto se logra con mecanismos de gestión y control, activos, y personas, con el fin de satisfacer los niveles de producción o servicios comprometidos por la organización durante un determinado horizonte de tiempo con los estándares de seguridad vigentes y sin incurrir en gastos que no contribuyan con el sostenimiento de las condiciones anteriores. [5]

Además, Pistarelli [5] señala que el mantenimiento también persigue anticiparse a las fallas aplicando métodos de análisis para evitar su recurrencia o mitigar sus consecuencias. Y es precisamente en ese contexto donde entra el mantenimiento predictivo.

El mantenimiento condicional busca poner en evidencia los defectos, desvíos o fallas sintomáticas con la mayor anticipación posible. Esto se realiza con la ayuda de instrumentos o pruebas no destructivas, minimizando el perjuicio sobre la producción. Existen 2 tipos de mantenimiento condicional: mantenimiento predictivo y mantenimiento condicional. [5]

3.2.1. Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo es un tipo de Mantenimiento Condicional, en el cual se mide el deterioro progresivo de cada equipo por separado (o de los síntomas prematuros de los defectos de sus partes) sin incurrir en desarmes mayores, tiempo antes de que se produzca la detención del equipo [6]. Por lo tanto, los componentes o piezas del equipo se utilizan hasta el límite de su vida remanente, es decir, si estas están bien se dejan funcionar, en caso contrario, las piezas se reemplazan o restauran.

Respecto de las ventajas del mantenimiento predictivo destacan la reducción de los tiempos de parada no planificada (no programada) al pronosticar la falla imprevista con la mínima interrupción del equipo, y también destaca la optimización de los recursos al programar las tareas de restauración o correctivas. Sin embargo, la desventaja de este tipo de mantenimiento es que solo permite identificar las fallas sintomáticas irreversibles, a diferencia del mantenimiento proactivo que permite identificar las fallas sintomáticas reversibles [6].

Dentro de las técnicas utilizadas en el mantenimiento predictivo se encuentran:

- Análisis de vibraciones.
- Análisis de aceite y de partículas de desgaste.
- Cromatografía de líquidos y gases.
- Emisión acústica.
- Estetoscopia industrial.
- Inspección por sentidos humanos.
- Inspección por tintas penetrantes.
- Inspección por ultrasonido.
- Pirometría óptica.
- Termografía infrarroja.

White [2] señala que, dentro de las técnicas utilizadas en el mantenimiento predictivo, la técnica que proporciona la información más importante acerca del funcionamiento interno de la máquina o equipo es el análisis periódico de vibraciones.

Otras técnicas como el análisis de aceite y el análisis de partículas de desgaste son partes importantes en equipos críticos o muy caros. Y la termografía, donde se miden las temperaturas de superficie por detección infrarroja es una técnica muy útil en la detección de problemas en interruptores y áreas de acceso difícil. Estas técnicas pueden practicarse en forma continua, periódica o discrecional [2].

3.2.2. Mantenimiento proactivo

El mantenimiento proactivo busca anticiparse al momento en que una causa raíz de falla puede convertirse en una falla sintomática irreversible. En muchos casos, las acciones de mantenimiento proactivo permiten revertir una situación que habría terminado en una falla sintomática irreversible, y luego en una falla funcional. Estas acciones son habitualmente de carácter investigativo [6].

Respecto de los beneficios del mantenimiento proactivo destacan la reducción de gastos por fallas irreversibles, provee información para trabajar sobre las causas y no sobre los efectos de los fallos. Sin embargo, este tipo de mantenimiento puede resultar muy costoso y poco efectivo si no existe una buena planificación ni un buen nivel de capacitación [6].

Dentro de las técnicas utilizadas en el mantenimiento proactivo se encuentran:

- Análisis fisicoquímico de lubricantes.
- Alineación y balanceo.
- Recuento de partículas contaminantes.
- Verificación de metales y aleaciones.
- Seguimiento de niveles térmicos.

Es difícil marcar la frontera entre un mantenimiento predictivo y un proactivo, pero sí se puede mencionar que, si al aplicar una técnica se evita la sustitución final del componente o pieza, entonces se habla de mantenimiento proactivo.

La Figura 3.1 muestra en intervalo de reversibilidad del componente, pieza o equipo que se desea intervenir con respecto al estado paramétrico de estos, teniendo en cuenta el grado de anticipación en el descubrimiento de la falla sintomática.

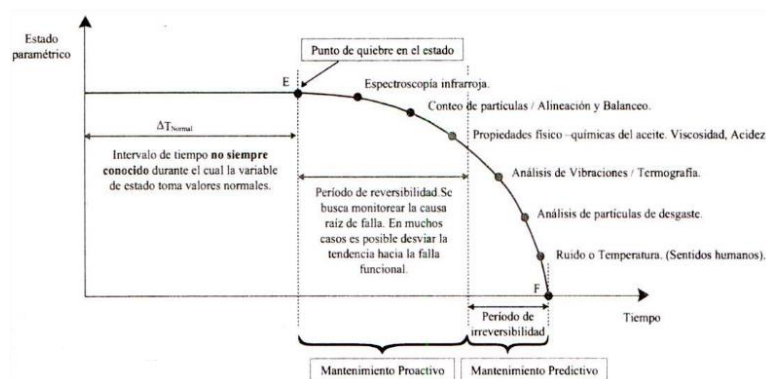


Figura 3.1: Intervalo de reversibilidad entre mantenimiento preventivo y proactivo. [6]

3.3. Técnicas de mantenimiento condicional utilizadas en laminación en caliente

A partir de las técnicas de mantenimiento condicional mencionadas en el punto 3.2, sumado al análisis de Pistarelli [6] y White [7], de la propuesta de mantenimiento realizada por Verdezoto [8], de la memoria realizada por Vásquez [9] y de las técnicas aplicadas en la planta de Colina de AZA se obtienen las técnicas más utilizadas en la industria de laminación en caliente y la justificación en la utilización del análisis de vibraciones para la detección temprana de fallas en los stands de laminación. Estas técnicas son:

- Análisis de aceite.
- Análisis de vibraciones.
- Termografía infrarroja.

A continuación, se explican estas técnicas en base a las referencias nombradas.

3.3.1. Análisis de aceite

La propiedad fundamental de los aceites lubricantes es la viscosidad, y la función de estos aceites es mantener separadas las superficies en movimiento con el fin de controlar la fricción y disminuir los desgastes. Dichos desgastes pueden ser producidos por rotación, deslizamiento, o rodadura entre componentes.

La mayoría de los aceites lubricantes son desarrollados con base mineral, el cual se lleva a cabo en refinerías y es un proceso bastante complejo. No obstante, se puede simplificar en 5 grandes pasos, los cuales se muestran la Figura 3.2:

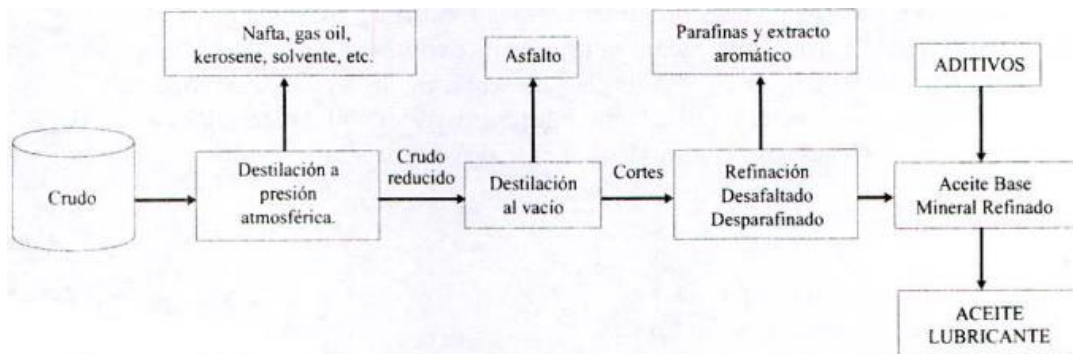


Figura 3.2: Diagrama simplificado de la obtención del aceite lubricante mineral. [6]

En el primer paso se hace la destilación a presión atmosférica del crudo con el fin de separar las impurezas, obteniendo los cortes más livianos como kerosene, nafta, entre otros. El resultado de este proceso es crudo reducido. En el segundo paso al crudo reducido se le aplica una destilación al vacío, donde se eliminan los asfaltos. Al resultado se le denomina cortes. En el tercer paso los cortes son refinados, desfaltados y desparafinados, como resultado se obtiene aceite base mineral refinado. En el último paso se le incorporan a este aceite los aditivos en hasta un 30% en volumen, tales como antioxidantes, inhibidores de corrosión, antiespumantes, mejoradores del índice de viscosidad, dispersantes, entre otros. El resultado es el lubricante con base mineral en su estado final.

Otro tipo de aceite lubricante usado es el aceite con base sintética, el cual se obtiene por síntesis química. Este tipo de lubricante no posee azufre, nitrógeno, ni metales pesados, lo que los hace más puros que los elaborados a partir de base mineral. Además, estos aceites tienen mayor resistencia a las fuerzas de corte internas (mejor índice de viscosidad), mayor resistencia a la oxidación, mayor resistencia a operar a altas temperaturas y mejor lubricación a bajas temperaturas. Sin embargo, suelen ser más costosos, algunos compuestos pueden ser tóxicos o incompatibles con sellos, elastómeros y juntas.

Cabe agregar que, el índice de viscosidad (IV) representa la variación de la viscosidad entre los 40 y 100 [°C], y es un indicador de la capacidad que tiene el fluido de mantener su viscosidad conforme aumenta la temperatura. Por lo tanto, mientras más alto es el valor de IV, menor será el cambio de la viscosidad con la temperatura.

El análisis de aceite es una técnica ampliamente usada ya que se puede aplicar a cualquier mecanismo que utilice un aceite lubricante para su funcionamiento, como turbinas de gas y de vapor, bombas, reductores, sistemas hidráulicos, motores de combustión, transformadores eléctricos, entre otros. Este análisis se puede realizar periódicamente mediante controles de seguimiento.

Dentro de los objetivos de los análisis de aceite se encuentran:

- Aprovechar al máximo la vida de los componentes o piezas.
- Disminuir el consumo de energía.
- Disminuir el consumo específico de lubricante.
- Disminuir el riesgo medio ambiental y de seguridad.
- Disminuir el costo integral de mantenimiento.
- Incrementar la confiabilidad y la disponibilidad de los activos (máquinas/equipos).

Existen 3 pasos desde los cuales se debe abordar un buen análisis de aceite. El primer paso consiste en monitorear el estado fisicoquímico del aceite.

En el segundo paso se realiza un estudio de contaminantes en los mecanismos que están expuestos al lubricante. Por último, un estudio de partículas de desgaste sobre los componentes del equipo.

Los contaminantes encontrados en los aceites disminuyen la vida útil de este y provocan fallas en los equipos. En los análisis de aceites usados los tipos de partículas encontrados indican la fuente de la contaminación y, por tanto, ayudan a identificar el problema permitiendo reducir los costos de mantenimiento asociados a la reparación del equipo. Por ejemplo, el agua produce herrumbre y rayado en la superficie del equipo junto con promover la oxidación en metales como el cobre y el hierro además de degradar el aceite. El anticongelante produce un incremento del desgaste por pérdida de la resistencia de la película del lubricante. Las partículas producen un desgaste superficial por abrasión y fatiga, además de dañar los filtros y producir sedimentación

Las partículas sufren un proceso de fragmentación y propagación. Las más grandes, en contacto con los mecanismos, se multiplican generando partículas de menor tamaño. Las características más perjudiciales de una partícula son la cantidad, el tamaño y la dureza. La limpieza de los lubricantes se mide en “unidades de limpieza” y su nivel afecta la vida del equipo.

Todos los análisis de aceite reportan partículas de materiales a causa del desgaste provocado entre componentes. Por lo tanto, se debe tener conocimiento de los materiales que componen estos para identificar el problema.

Existen procedimientos para tomar la muestra desde un punto representativo y sin que se contamine con agentes externos al momento de la recolección. Es por esto que, para la recolección se recomienda:

- Asegurar que el punto desde donde se extraerá la muestra está limpio, y en caso contrario se debe limpiar con un paño que no desprenda hilachas.
- Se utiliza un frasco plástico transparente de 120 [cm³] de capacidad y con tapa hermética.
- El frasco debe tener una etiqueta con la siguiente información:
 - Fecha de recolección
 - Nombre de la empresa
 - Nombre o código del equipo
 - Tipo de aceite lubricante
 - Horas de operación del aceite
- Para la extracción de la muestra, utilizar una bomba de aspiración completamente limpia con tubo de polietileno desechable por cada muestra recolectada.

Una vez que se tiene la muestra, para medir la limpieza del aceite lubricante se utiliza la norma ISO 4406 [10]. Esta norma contiene el código utilizado para cuantificar la concentración de partículas metálicas y no metálicas hay en el aceite. El método utilizado consiste en hacer pasar cierto volumen de aceite [cm³] a través de una membrana normalizada de 0,8 [μm] (micrones) y luego observar en un microscopio. El observador debe determinar la cantidad de partículas para cada tamaño y definir el número ISO valiéndose de una tabla y de una técnica de 3 números como se muestra en Figura 3.3:

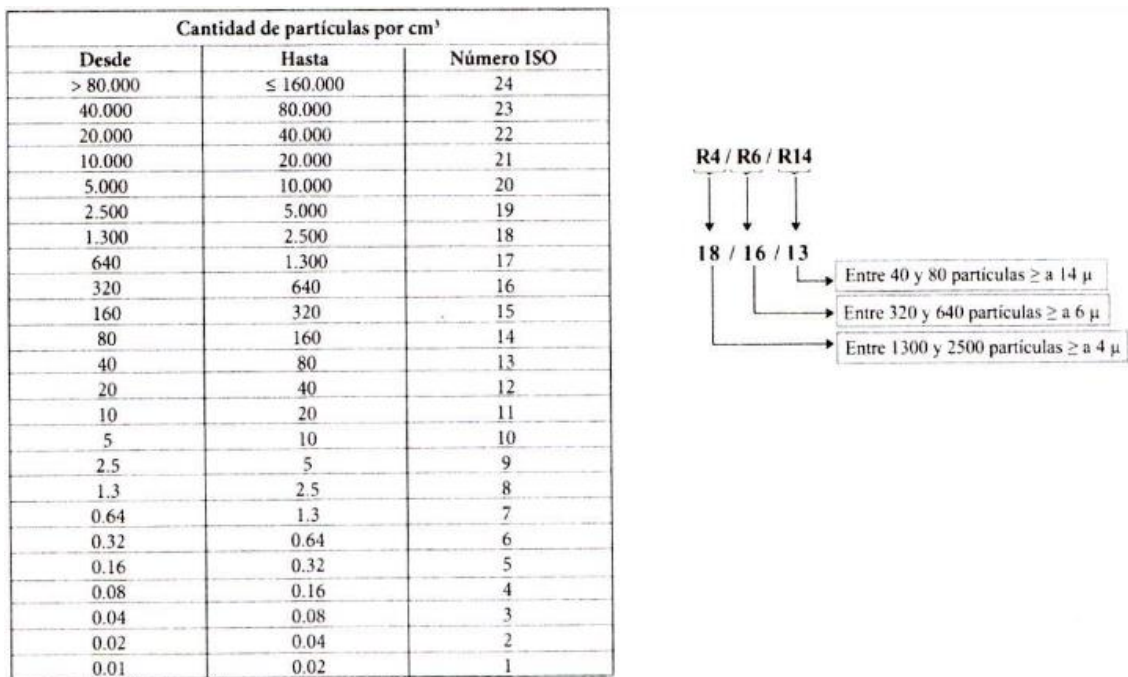


Figura 3.3: Concentración de partículas de acuerdo con el código ISO 4406. [6]

Los 3 números mostrados a la derecha de la Figura 3.3 representan la cantidad de partículas iguales o mayores a 4, 6 y 14 micrones respectivamente (de izquierda a derecha). Para el ejemplo mostrado, el primer número es un 18, lo que significa que hay entre 1300 y 2500 partículas mayores a iguales a 4 [μm] (micrones) en un centímetro cúbico.

Finalmente, se puede señalar que mejorando en una unidad la limpieza del lubricante, se quintuplica la vida del equipo, debido a que la vida de los mecanismos está directamente relacionada con el grado de limpieza del lubricante.

3.3.2. Análisis de vibraciones

Cuando una máquina sufre un deterioro en alguno de sus componentes, las fuerzas externas e internas que son parte del sistema aumentan su intensidad, provocando una variación en los niveles de vibración. Es por esto que, muchas fallas sintomáticas producidas en equipos en rotación pueden identificarse con la técnica de análisis de vibraciones, para ello debe establecerse la relación parámetro medido – estado del componente.

Para entrar en detalle respecto de esta técnica es necesario definir qué es la vibración. En términos simples, la vibración se puede considerar como la oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio, donde la posición de equilibrio es a la que llegará el objeto cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero. Esta vibración es causada por una fuerza de excitación, la cual puede ser interna o externa al cuerpo.

El movimiento vibratorio de un cuerpo entero se puede describir completamente como una combinación de movimientos individuales de 6 tipos diferentes: 3 traslaciones en las tres direcciones ortogonales x, y, z, y 3 rotaciones alrededor de los ejes x, y, z. Cualquier movimiento complejo que el cuerpo pueda presentar se puede descomponer en una combinación de esos 6 movimientos. Además, a cada movimiento se le asocia un grado de libertad, de tal forma que un cuerpo que tenga estos 6 movimientos tendrá 6 grados de libertad.

- Movimiento Armónico Simple:

El movimiento armónico simple es el movimiento en una dirección, como el de una masa controlada por un resorte único. Este sistema mecánico se muestra en la Figura 3.4 y se denomina sistema resorte-masa, con un grado único de libertad.

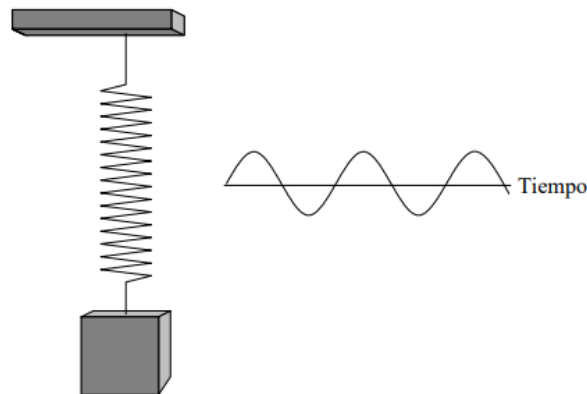


Figura 3.4: Movimiento armónico simple. [7]

Cuando la masa de la Figura 3.4 se desplaza de su punto de equilibrio y luego se suelta, el resorte intentará regresarla a dicha posición, pero la masa tendrá cierta energía cinética y rebasará la posición de equilibrio en el sentido opuesto al que fue desplazada. Como el resorte nuevamente intentará regresar la masa al punto de equilibrio, esta irá perdiendo su velocidad con el paso del tiempo hasta que después de una cantidad de ciclos, el resorte logre devolver la masa hasta su punto de equilibrio.

Si no existe fricción en el sistema de la Figura 3.4, la oscilación de la masa continuará con la misma amplitud a lo largo del tiempo, tal y como se muestra en el gráfico del movimiento de la masa respecto del tiempo. Sin embargo, los sistemas reales presentan fricción (roce) y esto hace que la amplitud de la vibración disminuya gradualmente con el paso del tiempo, ya que la energía es disipada en forma de calor.

Aparte de un desplazamiento variable, un objeto vibrando tendrá una velocidad y una aceleración variable.

Respecto de la medición de la amplitud de la vibración, se definen los siguientes conceptos:

- Amplitud pico (P_k): distancia máxima de la onda del punto cero o del punto de equilibrio.
- Amplitud pico a pico ($P_k - P_k$): distancia desde una cresta negativa hasta una cresta positiva. Si la onda es senoidal, este valor es igual a 2 veces P_k
- Valor RMS (Root Mean Square): raíz cuadrada del promedio de los valores instantáneos de la vibración elevados a 2. Si la onda es senoidal, el valor RMS es igual a 0,707 de P_k .

Otro concepto importante en las ondas senoidales es la fase. La fase es una medida de la diferencia de tiempo entre dos ondas senoidales, y se mide en términos de ángulos (grados o radianes). El desplazamiento de fase entre dos ondas puede ser negativo o positivo, ya que una onda puede retrasarse (atraso de fase) o adelantarse (avance de fase) con respecto a la otra.

Si se le aplica energía a un sistema compuesto por un resorte y una masa como el de la Figura 3.4, el sistema vibrará en su frecuencia natural y el nivel de las vibraciones dependerá de la fuente de energía y de la absorción inherente al sistema. La frecuencia natural se define como la frecuencia a la que una estructura vibrará si uno la desvía y después la suelta.

- Sistemas lineales y no lineales:

Para ayudar a entender la transmisión de vibración a través de una máquina es conveniente investigar el concepto de linealidad y lo que significa sistemas lineales y no lineales. Un sistema es cualquier aparato o estructura que puede aceptar una señal de entrada o estímulo en alguna forma y producir una señal de salida o respuesta. Ejemplos de sistemas son grabadoras y amplificadoras, que funcionan con señales eléctricas y estructuras mecánicas en las que las señales de entrada son fuerzas de vibración y las señales de salida son desplazamientos, velocidades y aceleraciones de vibraciones.

Un sistema es lineal no producirá frecuencias de salida, que no estén presentes en la entrada. Esto no se debe confundir con que la salida del sistema es la misma que la de entrada. En el caso de estructuras mecánicas como máquinas consideraremos la entrada como una fuerza vibratoria y la salida como la vibración medida.

La linealidad perfecta no existe en los sistemas reales, aunque muchos sistemas actuales se acercan a la linealidad cuando los niveles en la entrada son pequeños. Por lo tanto, si un sistema no es lineal, producirá frecuencias en su salida que no existían en su entrada.

- Análisis de frecuencia y tipos de señales:

Debido a que el análisis de la forma de onda (dominio del tiempo) presenta limitaciones, la práctica más común es realizar un análisis de espectro (dominio de la frecuencia), donde el tiempo es igual a uno dividido en frecuencia.

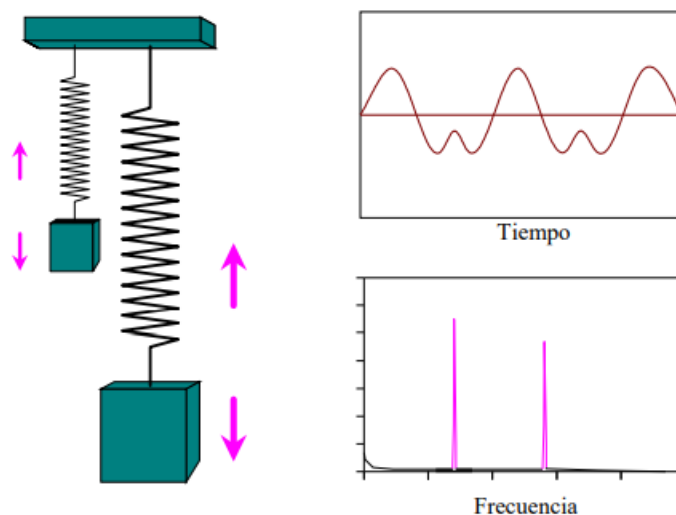


Figura 3.5: Dominio del tiempo vs dominio de la frecuencia. [7]

En la Figura 3.5 se observa un sistema compuesto por dos masas y dos resortes, junto con las gráficas generadas durante su movimiento en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. Se puede apreciar que algunos eventos que se traslapan y son confusos en el dominio del tiempo, están separados en sus componentes individuales en el dominio de la frecuencia.

La forma de la onda de vibración contiene una gran cantidad de información que no es aparente. Parte de la información está en las componentes de nivel muy bajo, y pueden ser importantes si son una indicación de un problema que está creciendo, como una falla en un rodamiento. Por lo tanto, para un análisis más completo del equipo, se debe agregar el análisis del espectro en el monitoreo de vibraciones.

Para hacer un análisis de espectro primero es necesario conocer los tipos de señales. Las señales del dominio del tiempo se pueden dividir en dos grandes tipos: estacionarias y no estacionarias.

Las ondas estacionarias son constantes en sus parámetros estadísticos sobre tiempo. Estas ondas a su vez se dividen en: deterministas y aleatorias. Las ondas deterministas tienen un contenido de frecuencia y de nivel relativamente constante por un largo periodo de tiempo. Este tipo de señales son probablemente las más importantes en el análisis de vibraciones además de ser generadas por maquinaria rotativa. En cambio, las señales aleatorias son impredecibles en cuanto a su contenido de frecuencia y a su nivel de amplitud, pero todavía tienen características estadísticas relativamente uniformes sobre tiempo.

Por otro lado, las señales no estacionarias se dividen en continuas y transientes. Un ejemplo de señales no estacionarias continuas es la vibración producida por una perforadora manual. Las ondas transientes se definen como señales que empiezan y terminan al nivel cero y duran una cantidad de tiempo finita, y pueden ser muy breves o bastante largos. Un ejemplo de transientes es la firma de vibración de una máquina arrancando o terminando de funcionar.

- Ejemplos de ondas y sus espectros:

Una máquina desbalanceada tiene una fuerza de excitación que es una onda senoidal en $1x$. Si la máquina fuera perfectamente lineal, en su respuesta, la vibración resultante sería una onda senoidal pura. En muchas máquinas con desbalanceo, la forma de onda si se parece a una onda senoidal y en el espectro hay un pico de vibración importante en $1x$.

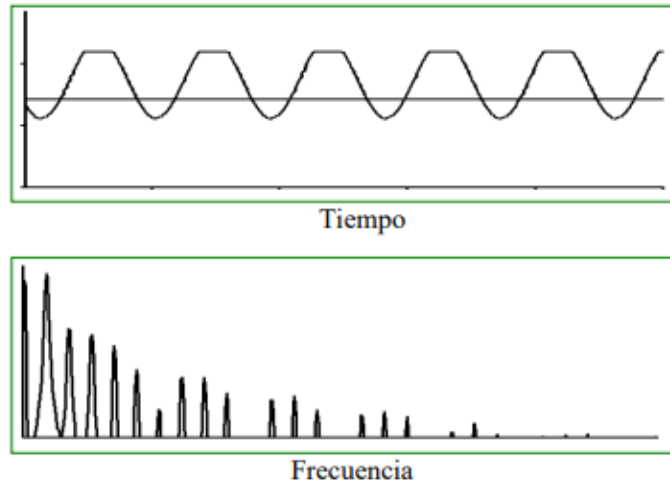


Figura 3.6: Espectro de una señal periódica. [7]

En la Figura 3.6 se aprecia un espectro armónico, en este caso una onda senoidal recortada. El espectro contiene componentes a distancias iguales de 1 dividido en el periodo de la forma de onda. El más bajo de los componentes arriba de la frecuencia cero se llama la fundamental y los otros los armónicos. Esta forma de onda viene de un generador de señal y se puede ver que alrededor de la línea cero no es simétrica. Eso quiere decir que tiene un componente CD y este se ve como la primera línea a la izquierda del espectro. Este sirve para ilustrar que un análisis de espectro puede extenderse toda la distancia, hasta la frecuencia cero (hasta CD). Es común en firmas de vibración de máquinas de ver una forma de onda recortada, lo que indica holguras en la máquina y que algo está restringiendo su movimiento en una dirección.

Generalmente no es deseable incluir frecuencias tan bajas en el análisis del espectro. La frecuencia más baja que se considera de interés es alrededor de 0,3 órdenes. En algunas máquinas este será abajo de 1 Hz.

- Modulación:

Es un efecto no lineal en el cual varias señales interactúan unas con otras para producir nuevas señales con frecuencias que no estaban presentes en las señales originales. Existen 2 tipos de modulación típicas, la modulación de frecuencia y la modulación de amplitud.

La modulación de frecuencia (FM) es la variación en frecuencia de una señal debido a la influencia de otra señal, generalmente de frecuencia más baja. A la frecuencia que se está modulando se le llama cargadora.

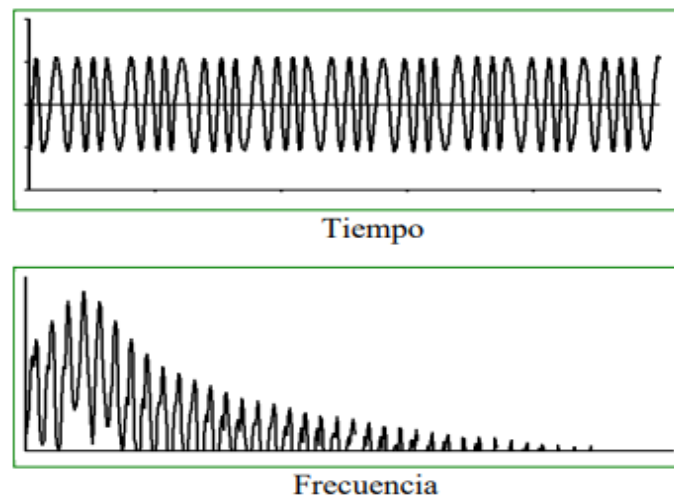


Figura 3.7: Espectro de una onda senoidal modulada en frecuencia. [7]

En el espectro mostrado en la Figura 3.7, el componente más importante es la cargadora, y los otros componentes que parecen armónicos se llaman bandas laterales. Estas bandas laterales se ubican simétricamente de cada lado de la cargadora, y su distancia es igual a la frecuencia moduladora. Este tipo de modulación ocurre en espectros de vibración de cajas de engranes, donde la frecuencia del engranaje está modulada por las RPM del engrane.

La modulación de amplitud se produce frecuentemente en engranes y rodamientos con defectos, y es posible identificar este tipo de señal por las bandas laterales en el espectro. Estas bandas de frecuencia están a una distancia de la cargadora, igual a la frecuencia de la señal moduladora.

En la Figura 3.8 se muestra un ejemplo de una modulación en amplitud a cerca del 50% de la modulación total. Se puede apreciar que la frecuencia de la forma de onda parece ser constante y que el nivel está fluctuando en una proporción constante. En el espectro, la onda tiene un pico en la frecuencia cargadora y dos componentes suplementarios que son las bandas laterales.

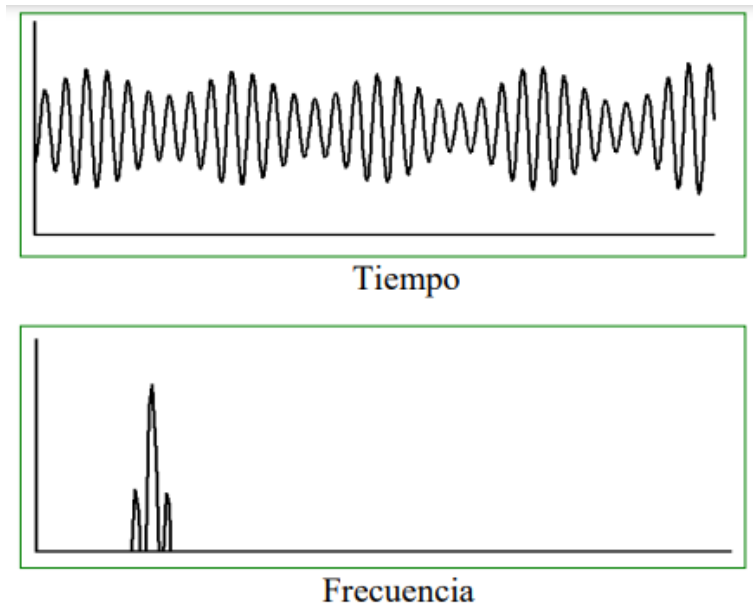


Figura 3.8: Espectro de una onda modulada en amplitud. [7]

Un ejemplo de modulación de amplitud en rodamientos ocurre cuando los elementos rodantes impactan las pequeñas grietas en los anillos del rodamiento, causando resonancia en los mismos anillos. Las frecuencias de resonancias de los anillos son por lo general muy altas (entre 2 y 10 KHz). Las resonancias tienen una alta amortiguación, debido al montaje físico del rodamiento, por lo que el rodamiento producirá una serie de "pings" muy cortos al ritmo de las bolas pasando por la falla. Cada ping está en la frecuencia de resonancia y a la distancia del periodo de la frecuencia del paso de las bolas.

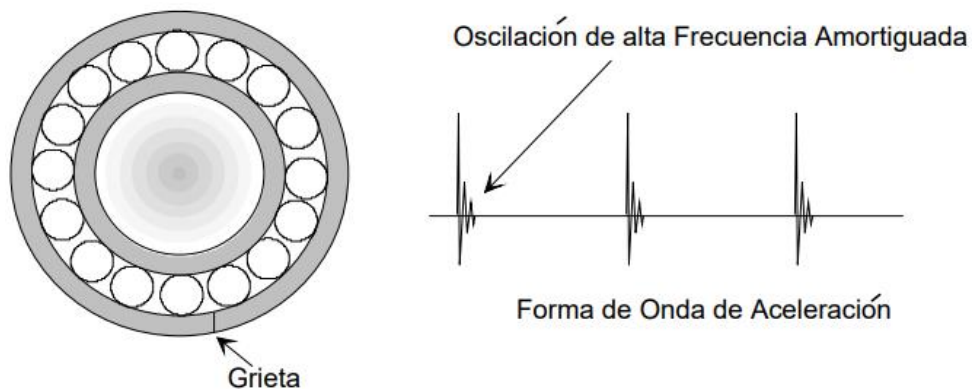


Figura 3.9: Ejemplo de modulación de amplitud en rodamientos cuando hay una grieta. [7]

Al examinar la forma de producida por el rodamiento que se muestra en la Figura 3.9, el tono de la alta frecuencia de la resonancia del rodamiento está modulada por los impactos de las bolas contra la grieta del anillo exterior.

Si se pasa esta señal de tiempo a través de un rectificador a diodo, de un detector, los picos negativos se convierten en picos positivos, por lo que la onda es positiva en su totalidad, tal y como se observa en la Figura 3.10:

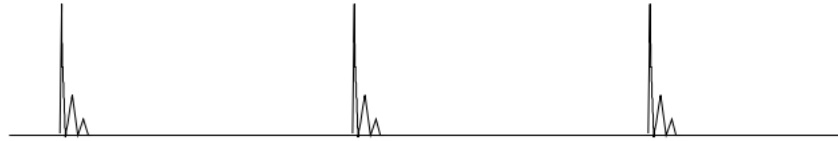


Figura 3.10: Forma de onda rectificada de señal de rodamiento. [7]

Al pasar esta señal positiva por un filtro de paso bajo se elimina la oscilación causada por la resonancia y solo queda la envolvente, mostrada en la Figura 3.11:

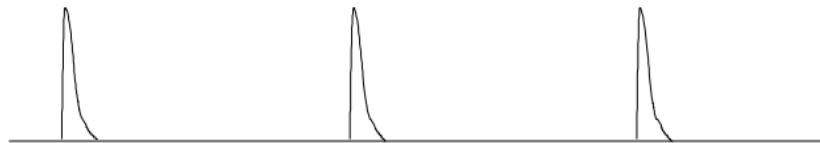


Figura 3.11: Envolvente de la señal del rodamiento. [7]

La señal envolvente tiene una proporción de repetición igual a la frecuencia del paso de bolas, pero con más energía en la frecuencia fundamental, ya que los pulsos son más anchos o largos en duración.

A este proceso se le llama demodulación de amplitud, y es el mismo proceso que se utiliza en los receptores de radio AM. A la señal demodulada se le puede hacer un análisis de frecuencias, donde la frecuencia de paso de bolas será el componente más grande en el espectro.

- Resonancia:

La resonancia es un estado de operación en el que la frecuencia de la fuerza aplicada es igual a la frecuencia natural de la estructura de la máquina (f_n). Una estructura típica tendrá muchas frecuencias naturales. Cuando ocurre la resonancia, se pueden generar vibraciones tan altas como para llegar a fallas catastróficas. Por lo tanto, en ninguna circunstancia se debe operar una máquina a la frecuencia de resonancia.

Para determinar si una máquina tiene resonancias prominentes se pueden llevar a cabo varias pruebas con el fin de encontrarlas, tales como: prueba del impacto, el arranque y rodamiento libre, y la prueba de la velocidad variable. Además, se establece la zona resonante entre un 20% bajo f_n y un 15% sobre ella. Ejemplos de resonancias en máquinas son las llamadas frecuencias críticas de flechas rotativas, donde el ángulo de fase entre la vibración de la fuente de

excitación y la respuesta de la estructura es de 90 grados a la frecuencia natural. Para el caso de rotores largos, como en turbinas, las frecuencias naturales se llaman "frecuencias críticas" o "velocidades críticas" y se debe evitar que estas máquinas operen a velocidades donde 1x o 2x corresponde a esas frecuencias críticas.

- Transductor de vibraciones:

El transductor de vibraciones es un aparato que produce una señal eléctrica, que es una réplica o análogo del movimiento vibratorio al cual está sujeto. Un buen transductor no debe agregar falsos componentes a la señal y debería producir señales uniformes en todo el rango de frecuencias de interés.

Existen diferentes tipos de transductores dependiendo del parámetro de la fuente de vibración (desplazamiento, velocidad o aceleración).

El sensor de proximidad responde al desplazamiento. También llamado “transductor de desplazamiento” es una unidad de montaje permanente, y necesita un amplificador que condiona la señal para generar un voltaje de salida proporcional a la distancia entre el transductor y la extremidad de la flecha. Sirven para establecer, sin contacto, el desplazamiento de un eje en toda su órbita y vibración relativa. Sin embargo, debido a que su operación está basada en un principio magnético, es sensible a las anomalías magnéticas en la flecha. Este transductor generalmente se utiliza para hallar anomalías en chumaceras de aceite, donde se usa para detectar fallas en los rodamientos y para apagar la máquina antes de que ocurra una falla catastrófica.

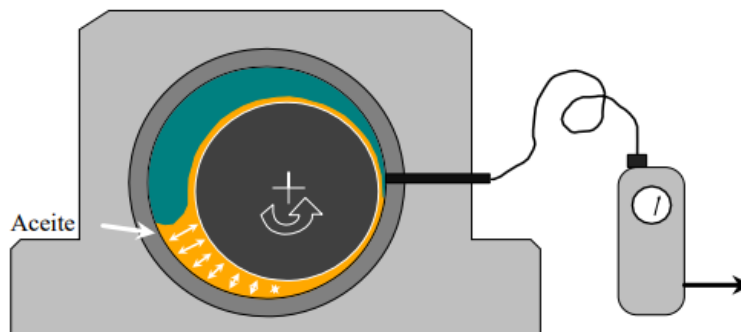


Figura 3.12: Ejemplo de un montaje de transductor de desplazamiento. [7]

En la Figura 3.12 se muestra un montaje de un transductor de desplazamiento. Estos transductores se usan mucho en pares, separados por una diferencia de orientación de 90°. Se pueden conectar a los platos horizontales y verticales de un osciloscopio para señalar la órbita o la ruta del gorrón, cuando está dando vueltas en el rodamiento. Tiene muy buena respuesta a bajas

frecuencias (0 – 1.0000 Hz). Su uso es apropiado para máquinas de bajas revoluciones.

El sensor de velocidad, mostrado en la Figura 3.13, consiste en una bobina de alambre y de un imán colocado de tal manera que, si se mueve el cárter, el imán tiende a permanecer inmóvil debido a su inercia. El movimiento relativo entre el campo magnético y la bobina induce una corriente proporcional a la velocidad del movimiento. De esta manera, la unidad produce una señal directamente proporcional a la velocidad de la vibración. Posee una impedancia eléctrica de salida relativamente baja, por lo que es poco sensible a la inducción del ruido.

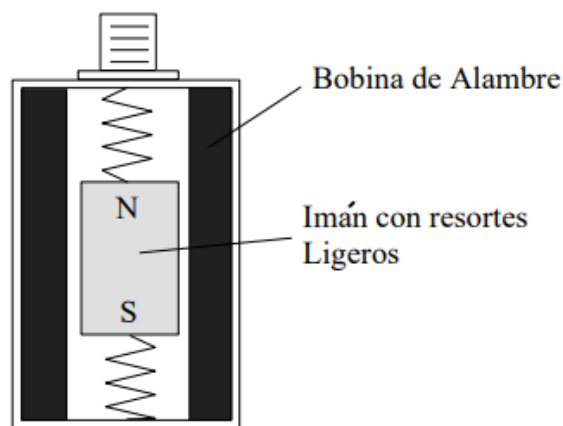


Figura 3.13: Ejemplo de sensor de velocidad. [7]

Midiendo la velocidad es posible identificar patrones de falla primaria y de otros componentes, tales como:

- Desalineación
- Desbalanceo
- Soltura mecánica
- Fricciones abrasivas
- Problemas estructurales
- Pulsaciones
- Resonancias

A pesar de las ventajas y aplicaciones del sensor de velocidad, este tiene desventajas que lo vuelven casi obsoleto para instalaciones nuevas. Esto se debe a que es relativamente complejo y pesado, tiene un rango de aplicación que abarca frecuencias de entre 10 a 1.000 Hz lo cual es bajo. Por último, este sensor requiere de una resonancia altamente amortiguada, y la amortiguación es sensible a la temperatura, lo que implica que las respuestas de frecuencia y de fase se verán afectadas por las condiciones de temperatura.

El sensor de aceleración, también llamado acelerómetro, es el instrumento con mayor difusión. En la Figura 3.14 se muestra un esquema básico de un acelerómetro con sus respectivos componentes.

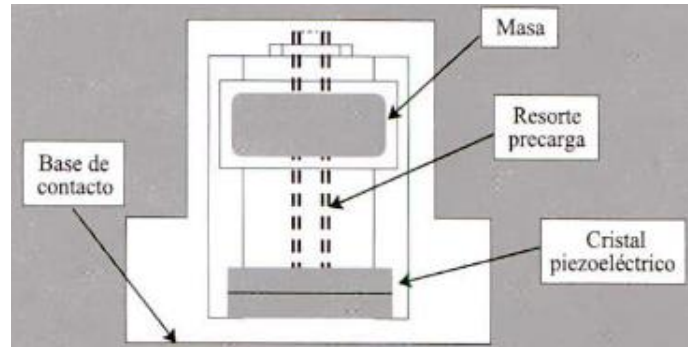


Figura 3.14: Esquema básico de un acelerómetro. [6]

Se puede considerar al acelerómetro piezoeléctrico como el transductor estándar para la medición de vibración en máquinas. El elemento piezoeléctrico emite un voltaje según las variaciones en las fuerzas internas producidas por las vibraciones. El conjunto masa-resorte y un circuito electrónico completan los elementos de equilibrio dinámico y amplificación. La señal de salida muestra proporcionalmente el estado de la máquina respecto de la vibración que emite.

Los acelerómetros son lineales en el sentido de la amplitud, por lo que tienen un rango dinámico muy largo. Los niveles más bajos de aceleración que puede detectar son determinados por el ruido electrónico del sistema, y el límite de los niveles más altos está dado por la destrucción del elemento piezoeléctrico. De esta forma, el rango de respuesta lineal en frecuencia va desde los 5 kHz a los 30 kHz, ningún otro transductor puede igualar esto. Además, el acelerómetro piezoeléctrico es muy estable sobre largos periodos. Se recomienda calibrar los acelerómetros una vez al año, si están en servicio con colectores de datos portátiles. Estos tienden a mantener su calibración si no sufren exposición a un calor excesivo o a una caída en una superficie dura.

La medición con acelerómetros permite identificar:

- Cavitación
- Contactos metal-metal y fricciones abrasivas
- Desalineación
- Detección prematura de fallas en chumaceras, engranajes y rodamientos
- Problemas estructurales
- Problemas de lubricación

Cabe agregar que, la mayoría de los acelerómetros que hoy en día se usan en la industria son del tipo "PCI". Esta sigla hace referencia a un preamplificador interno de circuito integrado. Cuando se conecta un acelerómetro PCI a la fuente de energía, el amplificador necesita unos segundos para estabilizarse, durante este tiempo cualquier dato que la unidad recoja será contaminado por las lentas variaciones del voltaje. Por esta razón, los recopiladores de datos deben de tener un retraso integrado para asegurar que la unidad esté en condición estable.

Por último, hay que señalar que cuando se coloca un acelerómetro es importante que la ruta de vibración desde la fuente hacia el acelerómetro sea la más corta posible, especialmente si se está midiendo la vibración en rodamientos con elementos rodantes.

- Medición de vibraciones y herramientas de análisis:

El montaje de los sensores debe ser lo más cerca posible del rodamiento, con metal sólido entre el rodamiento y el sensor. Se debe evitar colocar el sensor en las gorras de rodamientos, ya que son hechas de metal delgado y conducen muy poco la energía de vibración. Si es posible, seleccionar puntos donde no haya juntas entre metal y metal entre el rodamiento y el sensor.

En general se ha encontrado que, para motores de menos de 50 HP de potencia, un solo punto de prueba es adecuado, pero para motores de más de 50 HP cada rodamiento debería de tener su propio punto de prueba. Además, en las máquinas sensibles a los daños en los rodamientos y en las que los problemas de rodamientos se deberían detectar lo más temprano posible, cada rodamiento debería tener su propio punto de prueba.

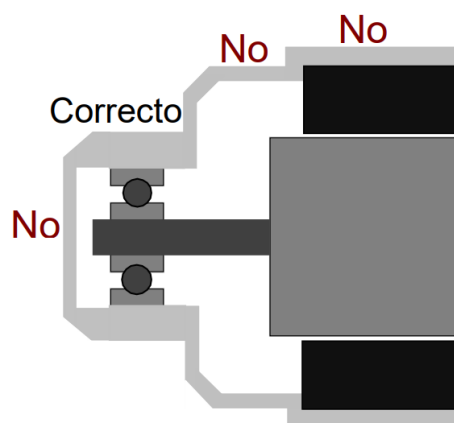


Figura 3.15: Ejemplo de ubicaciones correctas e incorrectas de un acelerómetro. [7]

En la Figura 3.15 se muestra un ejemplo de montajes correctos e incorrectos. La correcta ubicación del sensor es importante para la medición de vibraciones, ya que la calidad de la medición y la repetibilidad de esta dependerá del montaje. Las mediciones deben ser tomadas en el mismo lugar, porque una pequeña variación en el punto de montaje puede cambiar drásticamente la información recolectada. Es por este motivo que se tienden a utilizar captadores magnéticos, debido a mantienen las condiciones de contacto. Por lo tanto, no se recomienda el uso de sensores manuales, ya que los datos más confiables se recopilan cuando el sensor está montado con botón en la superficie de la máquina.

Los acelerómetros triaxiales o acelerómetros de tres ejes permiten medir la vibración en tres direcciones ortogonales. Si el sensor está montado encima de un cárter de rodamiento de una flecha horizontal, este tipo de sensor permite medir en la dirección radial, axial y tangencial.

La firma de vibración de una máquina depende en gran parte de sus parámetros de operación y de su estado físico. La máquina debe estar operando en condiciones normales (carga, velocidad de operación, entre otros.) cuando se recopilan los datos de vibración. Si este no fuera el caso, la firma de vibración no sería igual a las firmas de vibración recopiladas anteriormente, y ya no sería posible establecer una tendencia en el tiempo. En el caso de haber máquinas cercanas emitiendo niveles de vibración, estas se agregan como fuentes de vibración externa, y también se deberán mantener estos niveles al momento de la recopilación de datos.

En muchas aplicaciones se utiliza el espectro de velocidad para diagnosticar debido a que este permite apreciar claramente todas las componentes vibratorias. Sin embargo, en el caso de rodamientos, el espectro de aceleración permite identificar los daños con mayor anticipación y también permite identificar los problemas lubricación. Los problemas por lubricación en rodamientos no son menores, ya que aproximadamente un 36% de las fallas se originan debido a esto. Adicionalmente, alrededor de un 30% de las fallas en rodamientos son generadas por un mal montaje del rodamiento (desalineación)

Al momento de recopilar los datos, las RPM de la prueba deben ser cercanas a las RPM que se usaron en pruebas anteriores para no generar variaciones en las condiciones de operación. La temperatura de la máquina también es un factor importante, ya que la expansión termal puede afectar la alineación y los juegos de operación. Por tanto, la medición de vibración se debe hacer con la máquina a su temperatura de operación y no en frío.

Cuando se estudia el espectro de vibraciones de una máquina, es deseable mostrar el parámetro que mantenga un nivel más uniforme en todo el rango de frecuencias. Eso aumentará al máximo el rango dinámico de la señal medida. En el caso de máquinas rotativas de tamaño medio, la velocidad de vibración que

produce el espectro es la más uniforme, y por esa razón, es la que se escoge como parámetro por defecto del monitoreo de la máquina.

Cabe señalar que en el análisis de vibraciones el nivel absoluto de los componentes de nivel no es una indicación de problemas en la máquina tan válida, como lo es la proporción de incremento de los componentes. Por ejemplo: una máquina puede tener un tono de rodamiento en un espectro de vibraciones a un nivel 94 VdB (velocidad en decibel) y la máquina podría funcionar por años con este tono al mismo nivel. La presencia del tono es una indicación de que hay una anomalía en el rodamiento, pero puede ser que la carga sobre este no sea lo suficientemente fuerte para causar una degradación rápida. Por otra parte, otra máquina puede tener un tono de rodamiento a 70 VdB, alcanzando los 76 VdB al mes siguiente y hasta los 82 VdB en dos meses. Esto si es una causa de preocupación, ya que un incremento de 6 dB equivale a una duplicación del nivel de vibración. Esta proporción de incremento indica un nivel de vibración que crece de manera exponencial y quiere decir que la proporción de daño al rodamiento se incrementa debido a la misma presencia de la falla. Notar que en el segundo caso el nivel absoluto es más bajo que el primer caso, y que es el incremento en el segundo caso es el que determina la magnitud de la falla.

Para que el programa de monitoreo tenga éxito, las mediciones tienen que realizarse periódicamente, ya sea mensual, cada tres meses e incluso semanal en el caso de máquinas críticas. La periodicidad dependerá del estado de la máquina.

Un método ampliamente utilizado es la creación de tendencias, que consiste en almacenar las firmas de vibración grabadas a tiempos específicos y de apuntar los cambios en los niveles de vibración a las frecuencias forzadas vs tiempo. La manera más sencilla para utilizar el método es establecer un espectro de vibración representativo de una máquina operando normalmente como punto de referencia, y de comparar esta referencia con espectros que se grabaron más tarde en la misma máquina. Es extremadamente importante que el espectro de referencia realmente sea representativo de la máquina. Para conocer más sobre el procedimiento manual, visitar White [7].

El valor del análisis de las vibraciones de maquinaria está basado en el hecho que elementos específicos en las partes rotativas de cualquier máquina producirán fuerzas en la máquina que causarán vibraciones a frecuencias específicas. Una de las frecuencias forzadas más importantes son las RPM de la flecha, debido a que cualquier rotor siempre presenta una cierta cantidad de desbalanceo residual. Esto imparte una fuerza centrífuga radial en los rodamientos y causa la vibración de la estructura a la frecuencia fundamental o 1x (velocidad de giro de la flecha).

○ Análisis de vibraciones en rodamientos:

La ubicación de algunos rodamientos en las máquinas, como las de un stand de laminación, hace que sus modos de falla puedan tener graves consecuencias para el proceso productivo. Un rodamiento puede presentar una falla sintomática por varias razones, como: cargas elevadas, contaminación del lubricante, fatiga de las superficies deslizantes, lubricación deficiente, montaje inadecuado, obsolescencia o defectos de fabricación, entre otros.

Un rodamiento defectuoso producirá componentes de vibración que son múltiplos exactos de 1x, en otras palabras, son componentes no síncronos. La existencia de estos componentes no síncronos en el espectro de vibraciones puede indicar problemas en el rodamiento.

Los rodamientos producen fuerzas de excitación de vibración en frecuencias específicas, que dependen de cada geometría del rodamiento y de la velocidad de rotación. Estas frecuencias de vibración son llamadas tonos de rodamientos. Cada rodamiento produce un cierto nivel de tonos de rodamiento independiente de su condición, lo importante es analizar el incremento de estos niveles a medida que el rodamiento se va deteriorando.

Existen 4 tonos de rodamientos a partir de la geometría del rodamiento con elementos rodantes:

- BPFI: Frecuencia de paso de bolas anillo interior. Frecuencia con que un defecto en el anillo interior encuentra una bola.
- BPFO: Frecuencia de paso de bolas anillo exterior. Frecuencia con que la bola pasa arriba de un defecto en el exterior del rodamiento. Generalmente es superior a la BPFI debido a que la fuente de la vibración está más cerca del transductor.
- BSF: Frecuencia de rotación de la bola. Frecuencia de rotación de los elementos rodantes (bolas, rodillos).
- FTF: Frecuencia fundamental de tren. Frecuencia de rotación de la jaula del rodamiento (la que retiene los elementos rodantes).

Estos tonos dependen principalmente de la geometría del rodamiento (diámetro y cantidad del elemento rodante, ángulo de contacto y módulo del rodamiento) y de la velocidad de giro de operación. También se ven afectados por la carga axial y los efectos de deslizamiento pero estos son impredecibles.

Las ecuaciones para el cálculo de estas frecuencias en RPM se muestran en: (1), (2), (3) y (7):

$$BPFI = \frac{n}{2} \cdot \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos \theta \right) \cdot RPM \quad (1)$$

$$BPFO = \frac{n}{2} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_D} \cdot \cos \beta\right) \cdot RPM \quad (2)$$

$$BSF = \frac{P_D}{2B_D} \cdot \left[1 - \left(\frac{B_d}{P_D}\right)^2 \cdot (\cos \beta)^2\right] \cdot RPM \quad (3)$$

$$FTF = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{B_D}{P_D} \cdot \cos \beta\right) \cdot RPM \quad (4)$$

Donde, B_D es el diámetro del elemento rodante, n es el número de elementos rodantes, P_D es el módulo de rodamiento y β es el ángulo de contacto. En la Figura 3.16 se muestra la geometría del rodamiento para facilitar el entendimiento del cálculo de las frecuencias características:

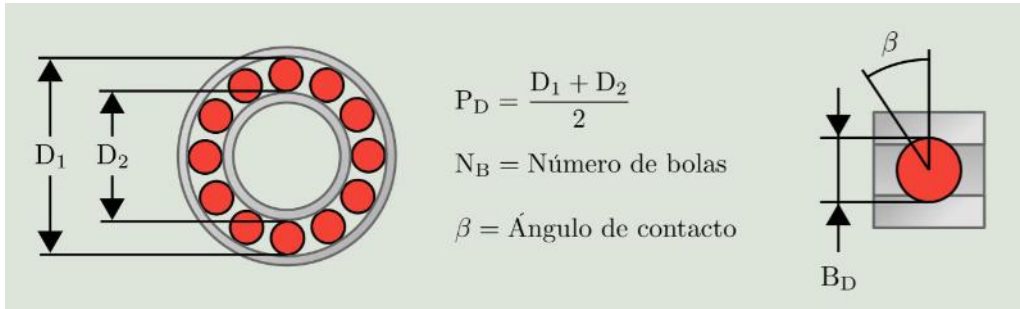


Figura 3.16: Geometría de un rodamiento para las frecuencias características.

Las ecuaciones (1), (2) y (7) se pueden simplificar utilizando aproximaciones en función del número de elementos rodantes y las RPM. Esto se muestra en (5), (6) y (7) en RPM:

$$BPFI = 0,6 \cdot n \cdot RPM \quad (5)$$

$$BPFO = 0,4 \cdot n \cdot RPM \quad (6)$$

$$FTF = 0,4 \cdot RPM \quad (7)$$

Cada frecuencia forzada va a crear un pico en el espectro de vibración. La amplitud del pico depende de la gravedad de la condición que lo causa. De esa manera, la frecuencia indica el tipo de problema, y la amplitud indica su gravedad.

En rodamientos, la modulación de tonos de rodamientos ocurre de maneras diferentes. Si el anillo interno del rodamiento tiene un pequeño defecto como una cuarteadura, este defecto se moverá dentro y fuera del área de carga al ritmo de las RPM de la flecha. Este supone que el anillo interno está girando y que se trata de una máquina horizontal, donde la gravedad ejerce una fuerza radial en lugar de axial en el rodamiento. Las bandas laterales a una distancia de $1x$ de tonos de rodamiento son una indicación segura de desgaste en el rodamiento.

Un ejemplo de bandas laterales se da cuando un rodamiento está astillado o cuarteado en varios pedazos, este generará mucho ruido cuando esté en el área de carga del rodamiento, pero será silencioso cuando esté fuera de esta área. La frecuencia de entrada y salida del área de carga será FTF, ya que migra alrededor del rodamiento con la jaula. Esto provocará modulación de amplitud de los tonos de rodamiento al ritmo FFT (Figura 3.17) y el resultado son las bandas laterales alrededor de los tonos de rodamiento a la distancia FFT.

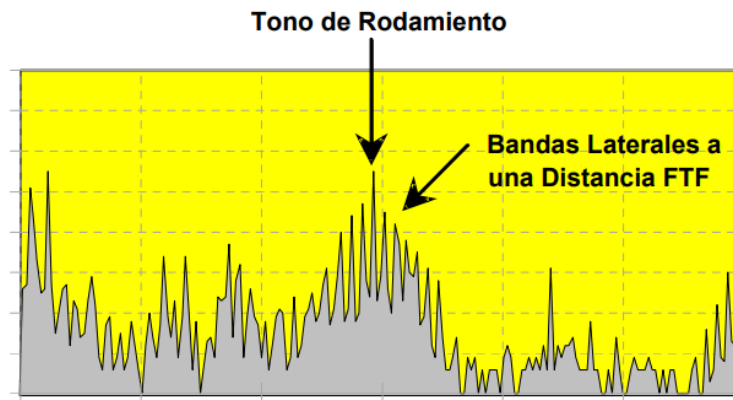


Figura 3.17: Modulación de amplitud al ritmo FTF. [7]

El tono de rodamiento será más fuerte cuando el defecto esté en el área de carga, y más débil cuando el defecto esté fuera del área de carga. Esto quiere decir que la frecuencia de paso de bola en el anillo interno será modulada por amplitud y su espectro tendrá bandas laterales, a distancias iguales de las RPM del anillo.

Si un elemento rodante presenta un defecto, este también entrará y saldrá del área de carga, pero lo hará a la frecuencia fundamental de tren (FTF) en lugar de a las RPM. Esto se debe a que los rodillos migran en el rodamiento a las RPM de la jaula. Por tanto, se producirá modulación de amplitud de la frecuencia de rotación de la bola y las bandas laterales espectrales estarán a una distancia igual que la FTF.

Una demodulación de amplitud como la mostrada en la Figura 3.11 es de mucha utilidad porque quita todo el ruido de baja frecuencia, y los componentes espectrales que tiendan a esconder los tonos de rodamientos generados por pequeños defectos. El espectro demodulado no contiene ningún ruido

contaminante, por lo que hay un gran mejoramiento de la proporción señal ruido. Esta es la ventaja más importante de la demodulación de amplitud, como herramienta de diagnóstico de máquina.

Actualmente existen tablas de diagnóstico que permiten evaluar con mayor facilidad cuál es la fuente de vibración, la frecuencia de excitación (tono) y cómo se aprecia la falla en el espectro de vibraciones. Para más información visitar White [7].

Respecto de algunas normas que contribuyen al estudio de los rodamientos se encuentra la ISO 281 [11], la cual evalúa la vida de un rodamiento en función de su carga al calcular el factor L_{10} . Este factor representa la vida nominal del rodamiento en revoluciones, que se espera que el 90% de los ellos alcance antes que se manifiesten signos de fatiga. Adicional a esto, cada fabricante de rodamientos entrega los parámetros del rodamiento como su vida útil, su frecuencia de falla, entre otros.

Por otro lado, la norma ISO/TS 16281 permite calcular una vida ampliada L_{nm} que considera L_{10} , el material del rodamiento, las condiciones de lubricación y de contaminación sólida en este [12].

Para un stand de laminación no existen tablas con rangos de valores de vibración. Sin embargo, se puede aplicar la norma ISO 20816-3:2022 (Reemplaza a ISO 10816-3:2009/Amd 1:2017) [13] para tener como referencia las zonas de operación y utilizar las recomendaciones de la norma en la fijación de alarmas.

Por lo tanto, como ya se mencionó en la sección 3.2, el análisis de vibraciones es la técnica del mantenimiento predictivo que proporciona la información más importante acerca del funcionamiento interno del equipo. Incluso una máquina o equipo en perfecto estado produce una vibración periódica, ruido o pulsos repetitivos. Sin embargo, esta vibración puede aumentar a niveles críticos debido a daños, defectos o fallas en los componentes del equipo. Estas altas vibraciones en el tiempo generan desgaste prematuro, fisuras, fatiga, fractura de rodamientos, de sellos y de componentes, por lo que es importante realizar un seguimiento en el tiempo y fijar rangos de valores para el estado de operación del equipo.

3.3.3. Termografía infrarroja

La termografía infrarroja es una técnica de mantenimiento predictivo con un campo de aplicación muy amplio y cada vez más utilizada en la industria. Esta técnica permite conocer sin contacto la temperatura superficial de un cuerpo al medir el nivel de radiación en la región infrarroja del espectro electromagnético. La región infrarroja no es visible al ojo humano, pero sí se percibe en forma de calor. Cualquier objeto cuya temperatura esté por encima del cero absoluto (0 K), emite calor.

Para la termografía se utiliza un termograma para detectar las fallas sintomáticas (puntos fríos o calientes) por lo general irreversibles, a través del espectro de temperaturas de los componentes. Además, no se requiere una detención de la máquina para utilizar esta técnica.

Al estudiar la evolución térmica de un componente es posible detectar cuando se generan los excesos de temperatura, que se encuentran fuera del rango de operación normal (falla sintomática) y anticiparse a una avería catastrófica para cambiar o reparar el componente.

Utilizar la termografía infrarroja también reduce los costos directos de mantenimiento debido a que se cuenta con mayor holgura de tiempo para programar las intervenciones de reparación y/o cambio en la máquina, y se reducen las intervenciones por mantenimiento correctivo no planificado al igual que el consumo de repuestos de emergencia.

- Espectro electromagnético y radiación

El conjunto de todas las radiaciones electromagnéticas se denomina espectro electromagnético. Las ondas electromagnéticas que transportan la energía viajan a la velocidad de la luz ($3 \cdot 10^8$ [m/s] en el vacío). Esta velocidad depende del medio de propagación, al igual que su longitud de onda (λ). Sin embargo, la frecuencia de la radiación electromagnética se mantiene constante.

Cabe agregar que, los equipos actuales utilizados en la termografía infrarroja son capaces de corregir automáticamente la diferencia entre la longitud de onda en el vacío y en el aire, dependiente del índice de refracción del aire.

En el espectro electromagnético existen regiones individuales que se diferencian por el rango de longitudes de onda (λ). Ejemplos de estas regiones son: rayos gamma, rayos x, ultravioleta, espectro visible, infrarrojo, microondas, ondas de radio, entre otras.

La región de interés para la termografía infrarroja es el espectro infrarrojo (RI), donde la longitud de onda se encuentra entre los 0,76 $[\mu m]$ y los 10 $[\mu m]$.

Debido a que las longitudes de onda representan longitudes extremadamente pequeñas, se emplea el micrómetro (μm), donde:

$$1 [\mu m] = 10^{-6} [m]$$

El espectro infrarrojo a su vez se divide en 3 tipos de onda, las cuales se muestran en la Tabla 3.1:

Tabla 3.1: División del espectro infrarrojo.

Tipo de infrarrojo	Longitud de onda (λ) $[\mu m]$
Onda corta (RI-C)	0,76 – 2
Onda media (RI-M)	2 – 4
Onda larga (RI-L)	4 - 10

Los cuerpos emiten y reciben simultáneamente energía térmica. Cuando la energía térmica que emite el cuerpo (radiación térmica) es mayor a la que recibe, se habla de un cuerpo caliente.

A baja temperatura (menor a 600 °C) la radiación térmica emitida está exclusivamente en la región infrarroja, es decir, entre longitudes de onda de 0,76 $[\mu m]$ a 10 $[\mu m]$. Por otro lado, a medida que el cuerpo aumenta su temperatura este emite radiaciones más intensas, pero de menor longitud de onda que pertenecen a la extremidad roja del espectro. De esta manera, la temperatura superficial del cuerpo determinará el tipo de luz que emite, cuanto más frío esté el cuerpo, mayor será la longitud de onda en la que brilla y se “esconde en el infrarrojo”.

Cabe agregar que ciertos objetos emiten más radiación térmica que otros, aunque se encuentren a la misma temperatura. Esto se debe al tipo de material, la forma y la terminación superficial del objeto.

○ Cámaras para termografía:

Las cámaras de termografía o termocámaras analizan un área completa (imagen) permitiendo observar la heterogeneidad térmica. La cantidad de radiación puede medirse empleando dispositivos termoeléctricos sensibles.

Estas cámaras no miden directamente la temperatura, si no que miden la radiación emitida por el objeto focalizado en el rango de longitudes de onda

del espectro infrarrojo, luego el procesador electrónico construye la imagen térmica del objeto. Este procesador electrónico posee un lente transparente a la radiación infrarroja, que focaliza el objeto y proyecta la radiación recibida sobre una matriz o arreglo de sensores llamados píxeles. Cada píxel mide la radiación y envía una señal eléctrica al circuito procesador que codifica la información para construir y mostrar una imagen en escala de grises o colores. Esta tecnología se denomina FPA (Focal Plane Array).

Las termocámaras actuales son fáciles de transportar y sencillas de operar, es un dispositivo integrado, posee una buena sensibilidad térmica, su precisión es de ± 2 °C aproximadamente y poseen alarmas audibles para alertar cuando se alcanzan los límites superior e inferior de temperatura fijados.

Se requieren de ciertos parámetros antes de cada inspección tales como: distancia al objeto, emisividad de la superficie, temperatura y humedad relativa del ambiente. Estos parámetros deben ser ajustados si varía el objeto o su contexto operacional.

Cabe agregar que, las cámaras de termografía no proporcionan medidas absolutas de temperatura debido a que hay condiciones del ambiente que son difíciles de ajustar por calibración. Sin embargo, basta con las mediciones relativas ya que se puede comparar la medición realizada en el sistema con el valor nominal de operación que se haya definido previamente.

Las cámaras modernas pueden realizar mediciones digitales infrarrojas y procesar imágenes en tiempo real, con capacidad para medir temperaturas en los -30 °C y más de 1.300 °C.

Las ventajas de esta técnica son:

- Se puede realizar mientras la máquina está en proceso. Además, el análisis se realiza a distancia por lo que se reducen los riesgos a la seguridad de las personas.
- Los sensores tienen una respuesta muy rápida (microsegundos) a la radiación térmica, permitiendo la medición online.
- Ideal para situaciones de temperatura extrema y objetos alejados en movimiento.
- Permite identificar la presencia de varios elementos defectuosos a la vez.

Las desventajas de esta técnica son:

- Las mediciones no son de gran exactitud, y solo se miden temperaturas superficiales.
- Si la falla interna del elemento no se manifiesta externamente como un aumento de temperatura, será imposible detectarlo.
- Los reflejos de los rayos solares se pueden confundir con defectos.

○ Aplicaciones y diagnóstico:

La termografía tiene varias aplicaciones industriales tales como:

- Sistemas eléctricos, electrónicos, electromecánicos y mecánicos.
- Materiales refractarios, de proceso o aislantes.
- Procesos industriales, sistemas de transporte y sistemas de vapor.
- Infraestructuras y construcciones.

Dentro de los sistemas mecánicos, las termografías resultan de utilidad para reductores, sistemas de transmisión, rodamientos, poleas, engranajes, motores eléctricos, turbomáquinas, entre otras. El calor excesivo en estos elementos puede originarse por atascamiento, deterioro en los sistemas de refrigeración, desalineación, fricción, lubricación deficiente o pérdidas de material. Sin embargo, como se comentó en las desventajas, solo se puede prevenir la falla si estos se manifiestan como un cambio en la temperatura superficial del elemento.

Si un rodamiento alcanza un gran deterioro, provoca un sobrecalentamiento en la zona circundante, como se observa en la Figura 3.18. Se suelen utilizar colores claros para las temperaturas altas y colores más oscuros para las temperaturas bajas.

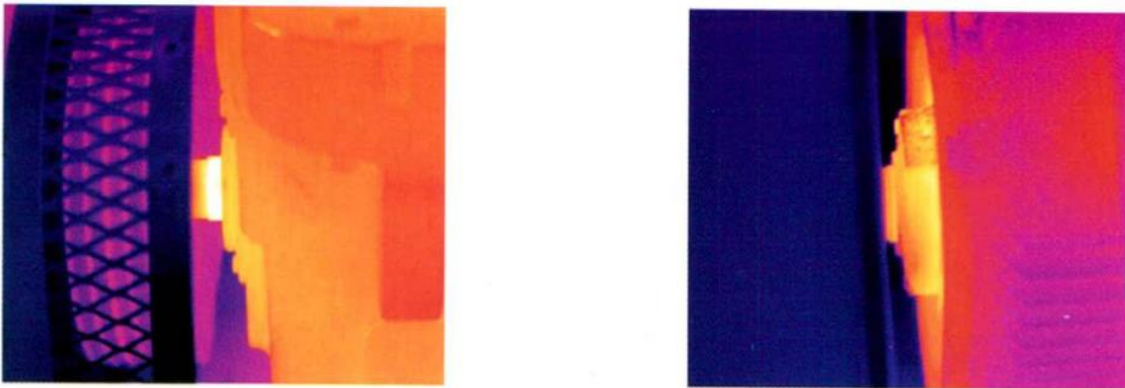


Figura 3.18: Excesivo calentamiento por falla sintomática en rodamientos. [6]

4. Análisis de fallas

En este análisis de fallas asociadas a los stands de laminación, se busca determinar el impacto de las interrupciones asociadas a los rodamientos de los stands junto con su justificación de porqué será el foco del análisis. Al conocer la duración y la cantidad será posible determinar el stand más crítico para el proceso, el cual será recomendado para ejecutar un plan piloto en el laminador colina.

Para un mejor entendimiento del análisis de fallas primero se describirá lo que es un stand (o caja) de laminación, así como su funcionamiento y sus componentes más importantes en base a una separación de grupos.

4.1. Stand de laminación tren medio

Un stand de laminación de la zona de tren medio marca SIMAC® del grupo SMS®, del tipo HL 355 consta de un funcionamiento en dúo (2 cilindros). Las medidas ancho, largo y alto son $1,2 \times 1,6 \times 1,7$ [m]. El diámetro nominal de los cilindros es de 355 [mm] (pero puede variar a 270 [mm]), con una distancia mínima y máxima entre ejes de cilindros de 270 [mm] y 355 [mm], respectivamente. Además, el stand cuenta con una regulación radial de 100 [mm] y una regulación transversal de 3 [mm].

Las cajas del tipo HL 355 están instaladas desde la caja M7H hasta la M14V. El conjunto de la caja sin los cilindros instalados consiste básicamente en los grupos de calzos (ampuesas; cajas de rodamientos): dos calzos para cada uno de los cilindros superior e inferior, conectados y controlados por cuatro pernos de sujeción. La distancia central de los dos cilindros en cuanto al eje de la línea de pasada del laminador sigue siendo la misma, ya que los grupos de calzos se ajustan simétricamente mediante los pernos de sujeción que están conectados a un sistema de ajuste de engranajes por encima de los grupos de calzos.

Respecto de su funcionamiento, los cilindros superior e inferior de la caja giran en sentido contrario debido al accionamiento conectado de los ejes de salida dobles con caja reductora de tipo piñón. La palanquilla es arrastrada por la contra rotación de los cilindros, y el espacio entre estos controla el grado de la reducción de la sección y el cambio de la forma en el material laminado entre las cajas subsiguientes. La reducción de la sección, la resistencia del material y la temperatura de trabajo en conjunto dictan el torque necesario de la unidad de accionamiento. El torque, junto con la velocidad de procesamiento de la barra, dictan la potencia de laminación requerida por la unidad de accionamiento.

Los cilindros de trabajo descansan en rodamientos del tipo “multiroll” que soportan cualquier fuerza axial y radial generada por el proceso de laminación.

El stand cuenta con un dispositivo de ajuste axial en el lado opuesto motor del conjunto de calzos superior para alinear, si es necesario, los perfiles de pasada que se cortan en los respectivos cilindros de trabajo superior e inferior.

La caja de laminación HL 355 está compuesta de:

- 5.1.1 Grupo de calzos con pernos de sujeción y soporte central
- 5.1.2 Dispositivo del ajuste de separación entre cilindros
- 5.1.3 Dispositivo de ajuste axial en el cilindro superior
- 5.1.4 Contenedor con pernos de fijación para sujetar los conjuntos de calzos
- 5.1.5 Barras de soporte instaladas en contenedor
- 5.1.6 Sistema de lubricación de calzos con dispositivo de medición y distribución
- 5.1.7 Cabezales de pulverización de agua de enfriamiento y sistema de distribución
- 5.1.8 Sistema hidráulico a bordo del dispositivo
- 5.1.9 Cilindros de trabajo

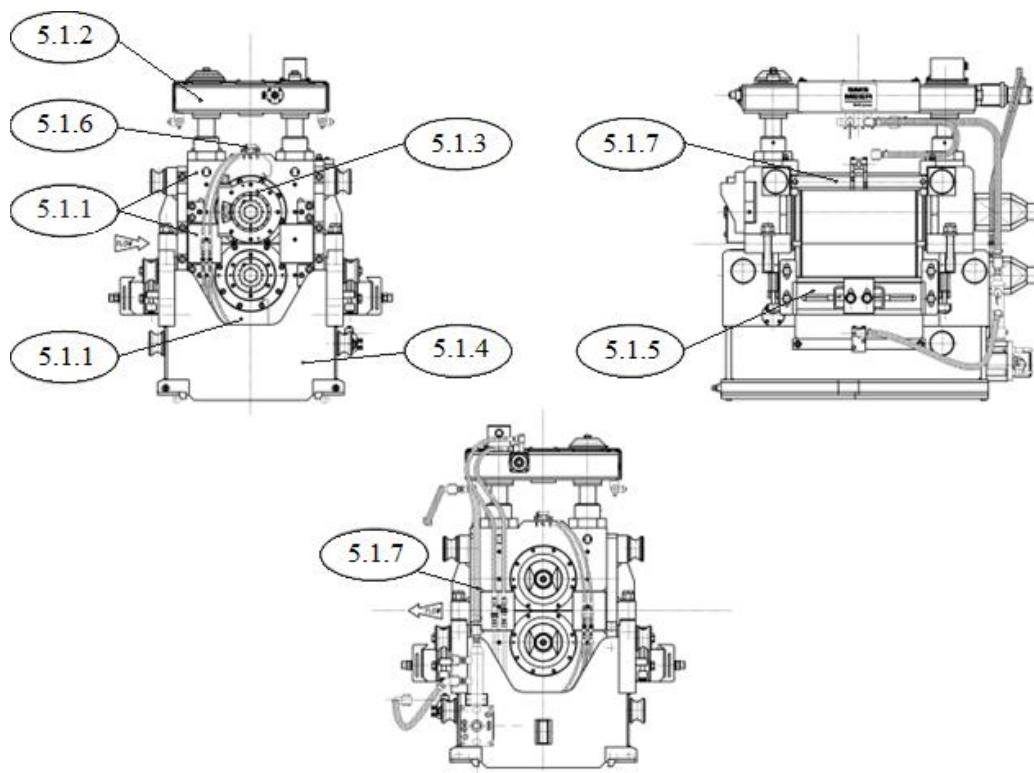


Figura 4.1: Disposición orientativa de los grupos y sistemas principales de la caja de laminación.

La Figura 4.1 ilustra los grupos y sistemas principales de la caja de laminación en base a la numeración señalada en la lista de arriba. Cabe señalar que no se muestra el sistema hidráulico (5.1.8), ya que este va por dentro de la caja, ni tampoco se muestran los cilindros de trabajo (5.1.9) para no saturar la imagen.

Durante el proceso de laminación, la barra es forzada a entrar y salir de la pasada de cilindro por las guías del laminador instaladas a cada lado de la caja (guías de entrada y de salida). En la configuración estándar, las guías se montan en las barras de soporte y se unen a la base de la caja. Cabe agregar que, cuando el stand está en el tren de laminación, es sujetado por 4 mordazas en la base este con el fin de evitar el movimiento durante el giro de los cilindros y durante el paso de la barra.

Cada uno de los cuellos de los cilindros de laminación o muñones está apoyado por rodamientos con múltiples hileras de rodillos. Estos rodamientos, detallados en el capítulo **Caja M11H y propuestas de medición y monitoreo de vibraciones**, van instalados en el diámetro interior de cada calzo. En la caja por el lado motor, los cuellos de los cilindros se extienden para conectarse con el acoplamiento por medio de la torre que transmite el movimiento de los cardanes que salen del reductor. Cualquier carga axial aplicada a los cilindros de trabajo mediante el proceso de laminación, se controla mediante rodamientos axiales incorporados en los calzos del lado opuesto motor.

Para un mejor entendimiento del sistema motriz de las cajas, se adjunta el plano en Anexo A. En la parte superior de este plano se muestran 2 cajas horizontales, con la transmisión de movimiento como: A-B-C-D-E. Donde, “A” corresponde al motor de corriente continua, “B” es el reductor, “C” corresponde a los 2 cardanes con sus crucetas que salen del reductor, “D” es la torre que recibe el movimiento de los dos cardanes para traspasarle el movimiento de giro a los cilindros y “E” corresponde al stand de laminación con los cilindros. Adicionalmente, en la Figura 4.2 se pueden apreciar los equipos del sistema de transmisión con la misma denominación de letras.

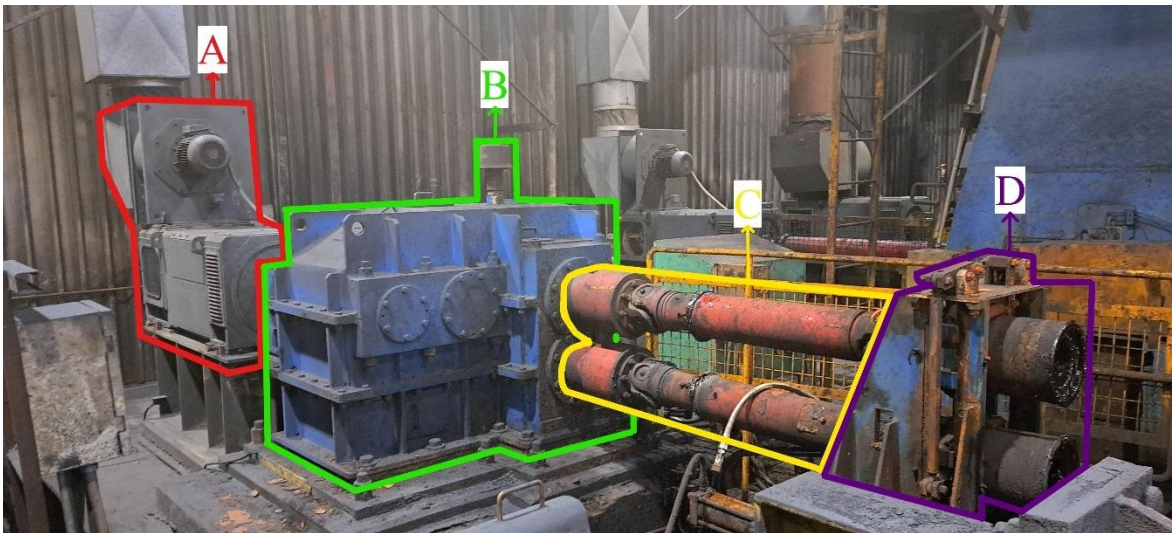


Figura 4.2: Sistema motriz de un stand de laminación horizontal.

En la parte inferior del Anexo A se observa la transmisión de movimiento de una caja vertical. Esta difiere de la configuración horizontal en que se incluye un par-cónico “G” para cambiar la dirección de transmisión en 90°, y luego viene el reductor “H” en altura. El resto de la configuración es la misma.

4.2. Análisis de fallas

Utilizando la plataforma AZA - Nivel 2, es posible realizar un análisis del tiempo de las interrupciones/fallas desde enero del 2019 hasta agosto del 2022 por zonas dentro la planta. Dentro del Laminador Colina existen 9 zonas del proceso: Horno Bendotti, Desbaste, Tren medio, Parrilla, Formación de mantos y corte en frío, Evacuación de barras, Monoblock, Línea de alambrón y Zona de rollos. Adicionalmente se suman a las zonas las externalidades y las generalidades, sumando un total de 11 zonas. AZA - Nivel 2 entrega un diagrama de Pareto, mostrado en la Figura 4.3, del periodo seleccionado.

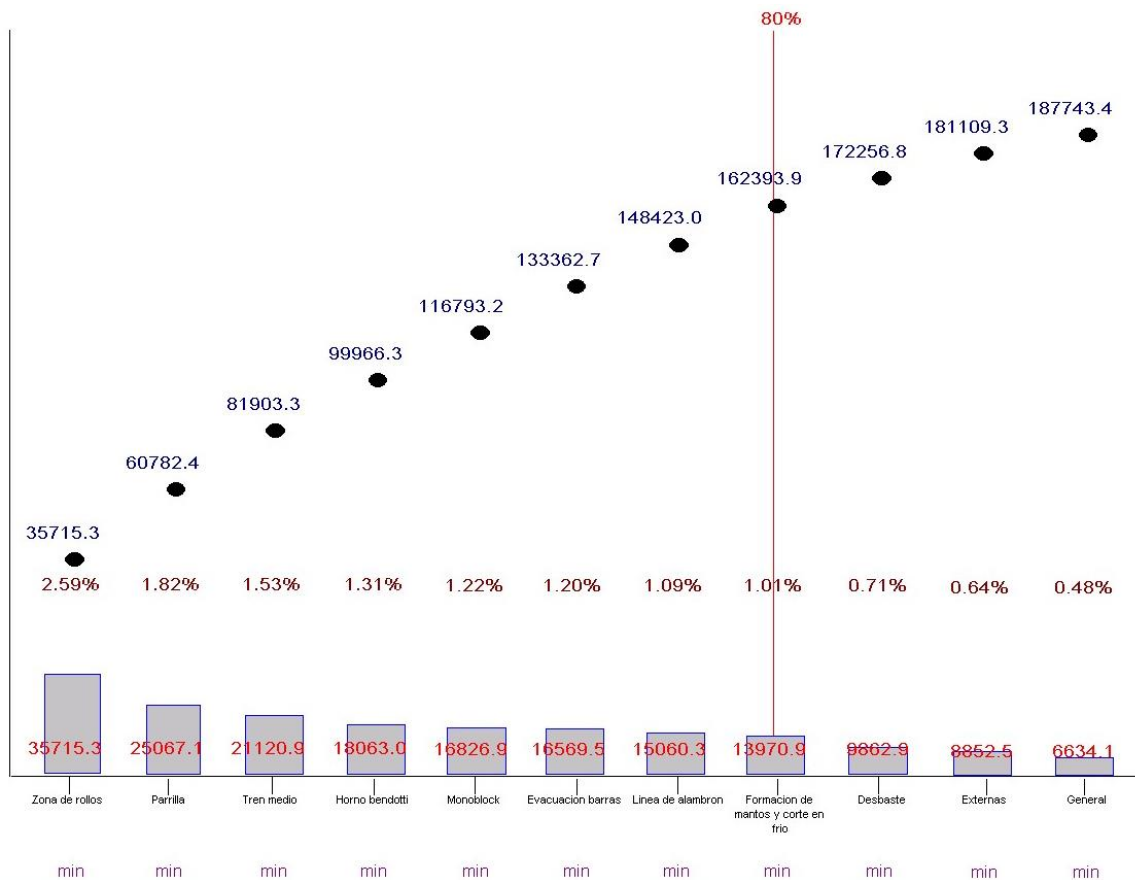


Figura 4.3: Diagrama de Pareto de las interrupciones en el Laminador Colina, periodo 2019 - 2022.

A partir de la Figura 4.3 se puede apreciar que las 3 zonas más críticas del Laminador son Zona de rollos, Parrilla y Tren Medio, ya que estas 3 acumulan casi 57 días cronológicos en el periodo enero 2019 - agosto 2022. Sin embargo, solo Tren medio opera continuamente en el proceso, debido a que Zona de rollos y Parrilla se encuentran en stand-by dependiendo de si el producto es rollo/alambrón o barra, respectivamente. Adicionalmente, en las zonas de Tren Medio y Desbaste es donde se realiza el proceso de laminación que le da forma al producto. Por lo tanto, es una zona crítica y se requiere realizar un análisis más detallado para ver qué equipos son los que más están fallando.

Desde AZA - Nivel 2 se pueden extraer los llamados informes Hecho-Causa-Acción. Estos informes permiten conocer todas las interrupciones ocurridas durante el periodo seleccionado, indicando los parámetros: duración, campaña de producto que se estaba fabricando, disciplina, zona, equipo, sub-equipo, ocurrencia, encargado, responsable, hecho, causa, acción, cobble/sacrificio. Cabe agregar que, las fallas presentadas en estos son informes son las que ocurren durante la producción de acero laminado, cualquier otra falla que se haya detectado al cambiar el stand no se encuentra registrada ni tampoco se realizan seguimientos por stand.

Utilizando las tablas dinámicas de Excel y la matriz con todas las interrupciones obtenidas, se puede aplicar un primer filtro por “Zona”. Las únicas 2 zonas que poseen stands de laminación son Desbaste y Tren medio, donde Desbaste es la predecesora de Tren medio. A partir de este momento, se entenderá “caja” de laminación como “stand”, que es el término utilizado en AZA – Nivel 2.

Se aplica un segundo filtro por la categoría “Equipo”. Desbaste cuenta 6 cajas y tren medio cuenta con 8 cajas. En AZA – Nivel 2 los stands aparecen con la nomenclatura “Caja D/M (Desbaste / Tren medio) + Número de caja (1 – 14) + H/V (Disposición de los cilindros: horizontal o vertical)”, ejemplo: Caja M8V. Al aplicar este filtro es posible confeccionar el gráfico mostrado en la Figura 4.4:

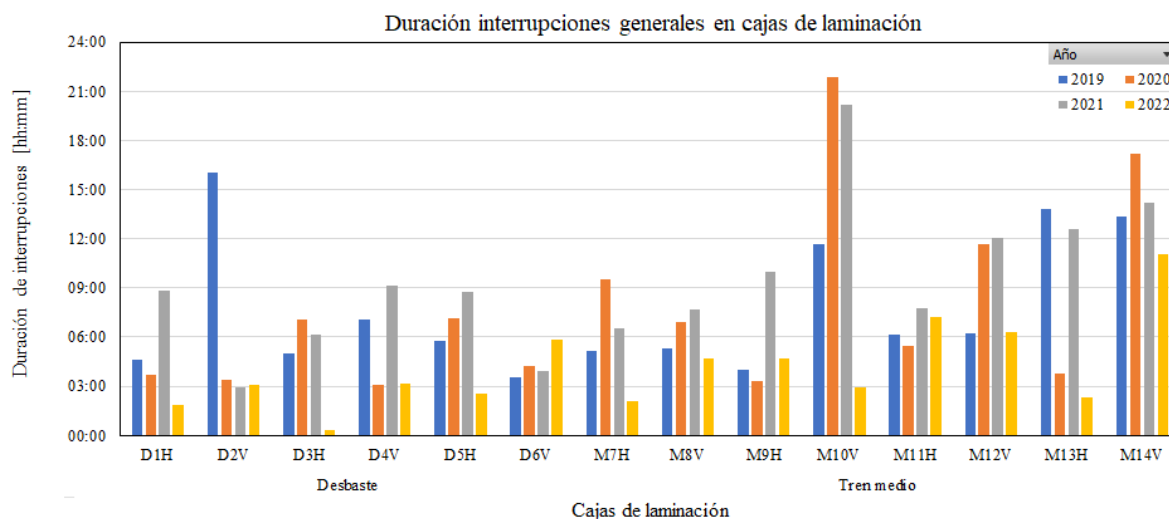


Figura 4.4: Gráfico duración interrupciones cajas de laminación desde el año 2019 hasta agosto 2022.

A partir de la Figura 4.4 se puede observar que las mayores interrupciones ocurren en la Caja M10V, alcanzando una duración peak de casi 22 horas en el año 2020 y de 20 horas el año 2021. La M14V es la segunda caja con las interrupciones más altas, alcanzando una duración peak de 17 horas en el año 2020 y de 14 horas el año 2021. Otra duración preocupante es la de la Caja D2V en el año 2019, que alcanza las 16 horas de interrupciones. Cabe agregar que, estos valores representan todas las interrupciones asociadas a estos equipos incluyendo los componentes y equipos auxiliares. La duración total del periodo es de 16 días con 21 horas.

El tercer filtro se realiza por “Disciplina”. Aquí se encuentra: Acería, Eléctrica-Electrónica, Equipo de cambio, Mecánica, Operación. Las interrupciones de Acería se pueden descartar del análisis de fallas debido a que estas se deben principalmente a la calidad de la palanquilla de acero y a la acumulación de material en las guías de entrada y salida de las cajas. También se puede descartar la disciplina Eléctrica-Electrónica debido a que estas interrupciones se asocian a los problemas en los motores (cables, encoders, sobrecarga, temperatura), en la instrumentación (presostatos, sensores) y en el Drive (red, señales, tarjetas de control).

Con el fin de focalizar aún más el análisis de fallas, se debe aplicar un cuarto filtro, el cual combinado con la lectura de las categorías “Hecho” y “Causa” entregará un resultado más focalizado; “Sub-equipo”. Con esto es posible eliminar por completo la disciplina de operación ya que los sub-equipos son canal y calibración (ajuste de medida, estado canal, corriente), fotoceldas, guías de entrada y de salida, refrigeración. Al seguir analizando las interrupciones por sub-equipos se pueden descartar del análisis los cardanes y crucetas, par-cónico, reductor, las fijaciones de las cajas, refrigeración y sistema hidráulico. Estos sub-equipos se eliminan debido a que son auxiliares a las cajas de laminación. De esta manera, se construye el gráfico mostrado en la Figura 4.5 con las interrupciones de las disciplinas mecánicas y de equipo de cambio que están asociadas directamente a los componentes de las cajas de laminación más las torres:

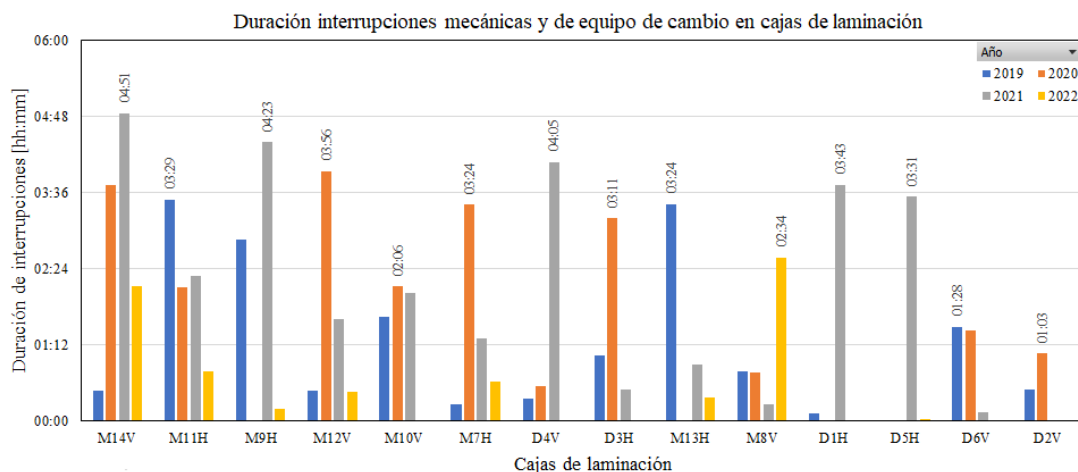


Figura 4.5: Gráfico duración interrupciones mecánicas y de equipo de cambio en cajas de laminación.

Estas interrupciones suman un total de 3 días con 3 horas y 47 minutos, y se ordenan desde la caja que presenta la suma mayor de duración de las interrupciones hasta la de menor suma. Es así como la Caja M14V acumula un total de 11 horas con 10 minutos con un peak de 4 horas con 51 minutos en el año 2021, seguida por la Caja M11H con un total de 8 horas con 40 minutos siendo el peak en el año 2019 con 3 horas y 29 minutos, ambas cajas del Tren Medio. Por otro lado, las cajas D6V y la D2V del Desbaste acumulan las menores duraciones de interrupciones.

Al realizar la lectura de la categoría “Ocurrencia” junto con las de “Hecho”, “Causa” y “Acción” permiten determinar que un 54% de las interrupciones mostradas en Figura 4.5 se deben a problemas varios, como calibración y ajustes deficientes, problemas en las coplas de las torres, fallas en el sistema de lubricación de varios componentes, quiebre de cilindros, vibración en las torres, entre otras. Sin embargo, un 46% de las interrupciones mostradas se deben a fallas en los rodamientos de las cajas de laminación, los cuales son considerados repuestos críticos debido a la importancia en el proceso (permite el giro de los cilindros), sus precios elevados y el largo tiempo de espera para traer rodamientos nuevos desde el extranjero. Por lo tanto, **el foco del análisis de vibraciones para predecir y prevenir las fallas en los stands será en los rodamientos de los cilindros.**

Con lo ya señalado, se confecciona un gráfico al aplicar un quinto filtro con la categoría de “Ocurrencia” y un sexto filtro con la categoría de “Hecho” con foco en las fallas de los rodamientos de las cajas. Este gráfico se muestra en la Figura 4.6:

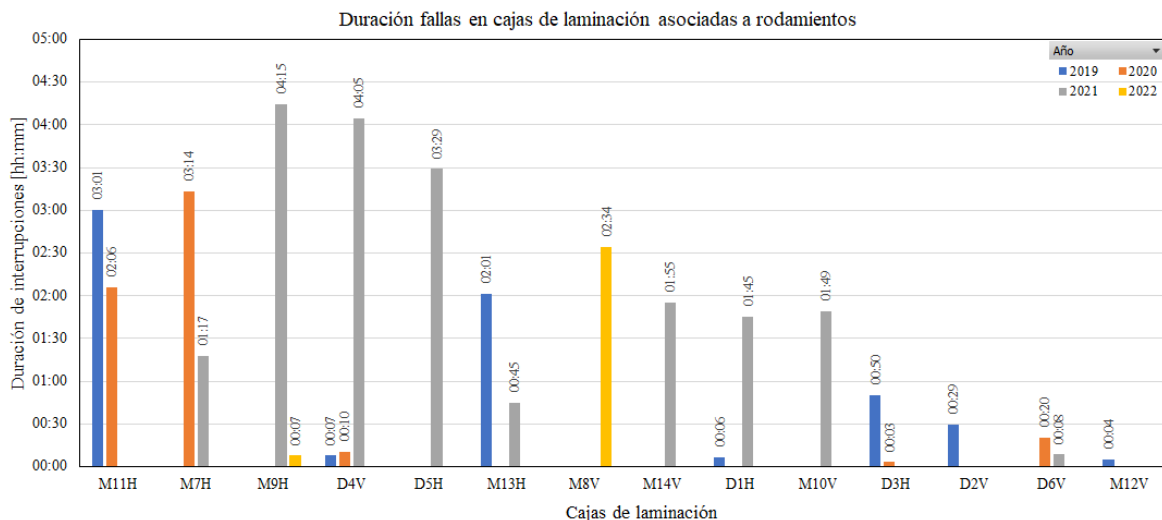


Figura 4.6: Gráfico duración fallas en cajas de laminación asociadas a rodamientos.

En el gráfico de la Figura 4.6 se muestra el desglose por año de cada caja del tren laminador en base a la duración de las fallas asociadas a sus rodamientos. El orden escogido para mostrarlas se basa en la duración total de las fallas asociadas a los rodamientos en todo el periodo de análisis.

Notar que, algunos componentes del stand aparecen referenciados con otros nombres. Esto se debe a una diferencia entre el Manual de Manutención SIMAC y AZA - Nivel 2. Por ejemplo, cuando se habla del “calzo” hace referencia al “bastidor”, y cuando se habla de “contenedor” del stand se refiere a la “base” de este.

A modo de complementar el análisis, se confecciona el diagrama de Pareto que se muestra en la Figura 4.7 con la duración total por cada caja del tren laminador:

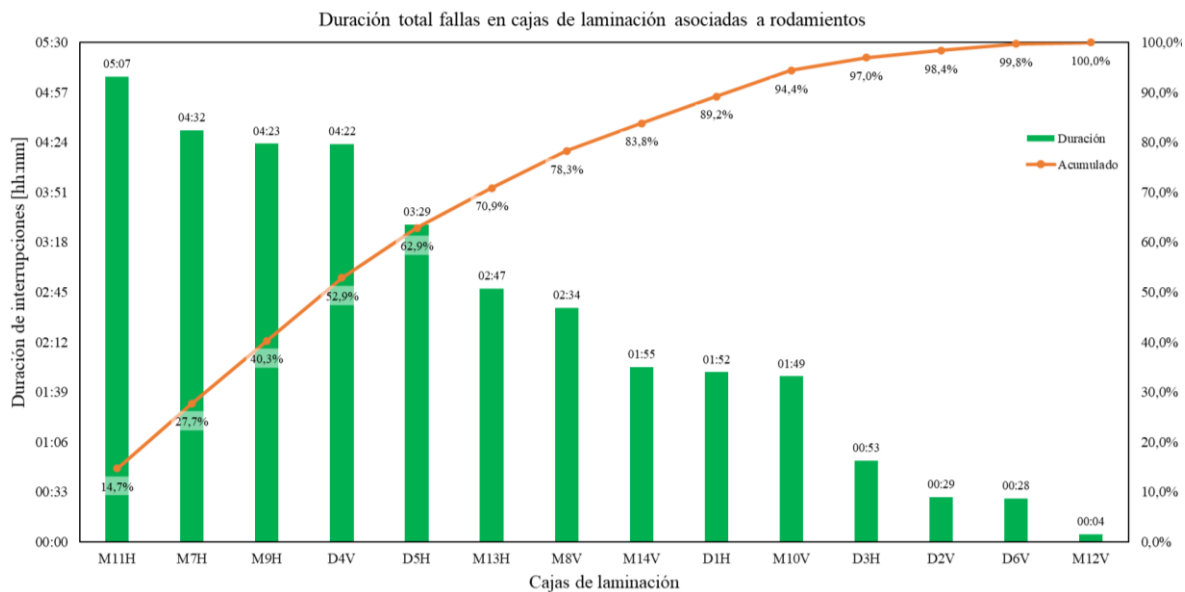


Figura 4.7: Diagrama de Pareto duración total en cajas de laminación asociadas a rodamientos.

La suma de la duración de estas fallas en el periodo de análisis es de 1 día con 10 horas y 51 minutos, siendo la Caja M11H la más crítica con un total de 5 horas con 7 minutos, seguida por la Caja M7H y la Caja M9H que acumulan 4 horas con 32 minutos y 4 horas con 23 minutos, respectivamente. Cabe agregar que, las 3 primeras cajas mostradas en la Figura 4.7 son de la zona de Tren Medio y de disposición horizontal.

La cantidad total de fallas por rodamientos durante el periodo de análisis es de 57, de las cuales 9 generaron un cobble en el tren laminador. De esos 9 cobbles, 2 ocurrieron en la caja M11H.

En el diagrama de Pareto de la Figura 4.7 se puede apreciar que el 80% de las fallas en rodamientos se encuentran en 8 de las 14 cajas; M11H, M7H, M9H, D4V, D5H, M13H, M8V y M14V. Donde 6 de estas cajas corresponde a la zona de Tren Medio.

Es posible que los rodamientos de las cajas horizontales fallen más debido al desgaste radial generado por el peso de los cilindros. No obstante, parte de las fallas contabilizadas, tanto de cajas horizontales como verticales, tuvieron origen en:

- Lubricación deficiente: fugas de grasa en flexibles de la línea de grasa, válvulas dañadas con fugas, fugas de grasas en los distribuidores de los stands.
- Trabamiento del rodamiento: problemas de desalineamiento del rodamiento y deficiencias en el montaje de los rodamientos, alineación deficiente entre la torre y el stand generando cargas adicionales, alojamientos agripados y rayados.
- Desgaste desigual del rodamiento: ausencia de registro de control de giro de los rodamientos, bastidores con mucho juego provocando cargas adicionales en el rodamiento con el paso de la barra, desgaste medido por unidad de tiempo y no por unidad de tonelaje.

- Sellado del stand deficiente: emulsión de la grasa dentro del rodamiento debido al sellado deficiente.

Gran parte de los problemas mencionados son identificables con un análisis de vibraciones en detalle que analice los valores de las vibraciones (velocidad y aceleración) sumado a la forma del espectro. Otras fallas comunes en los stands de laminación, los cuales son posibles corregir con anticipación antes de una falla catastrófica o de un desgaste significativo con un sistema de medición y de análisis de vibraciones son: desalineación de los cilindros, sujeción deficiente del stand (mordazas) y reajuste de las torres en caso de transmitir una vibración excesiva.

4.3. Impacto económico de las fallas

Al ingresar a la red de AZA, se puede conocer la productividad de cada año en [ton/hr] y el costo de la empresa por detención de la producción en [USD/ton]. De esta manera es posible calcular el costo total en [USD/año] producto de las fallas de los rodamientos en las cajas de laminación. Este costo se muestra en la Tabla 4.1, donde se puede apreciar que el año 2021 tiene el costo total anual por fallas más alto tanto por las detenciones como por los cobbles, seguido por el año 2019. Cabe agregar que el año 2022 representa el menor costo anual por fallas, lo cual se debe en parte a que el periodo de análisis llega hasta el mes de agosto. Finalmente, el **costo total del periodo** analizado debido a las fallas en los stands de laminación alcanza los **286.476 USD**.

Tabla 4.1: Costo total anual por fallas en cajas de laminación asociadas a rodamientos.

Parámetros	Año 2019	Año 2020	Año 2021	Año 2022
Productividad [ton/h]	53,0	52,5	53,7	53,8
Tiempo perdido [h]	6,7	5,9	19,5	2,7
Pérdidas [ton]	355,5	309,8	1.049,0	145,6
Costo empresa [USD/ton]	150	150	150	150
Costo detenciones [USD/año]	53.329	46.477	157.354	21.845
Costo por BP [USD/año]	1.660	1.660	4.150	0
Costo total [USD/año]	54.989	48.137	161.504	21.845

Adicional a estos costos por fallas, también se deben considerar los costos de mantenimiento asociados a la preparación de los stands y a los rodamientos que estos ocupan. Estos costos se extraen desde SAP PM del periodo 2020 - 2022 (el año 2019 no

se encontraba), permitiendo la construcción de la Tabla 4.2 en la cual se aprecian los costos por totales por zona (Desbaste y Tren medio) y el total anual al sumar estos dos costos por cada año, mostrando que estos van en aumento los últimos 3 años.

Tabla 4.2: Costos de mantenimiento asociados a la reparación de stands y rodamientos.

Costo mtto.	Año 2020	Año 2021	Año 2022
Desbaste [USD/año]	133.060	182.039	315.099
Tren Medio [USD/año]	49.759	55.514	105.272
Total anual [USD/año]	63.006	70.642	133.648

Tal y como se menciona en la Justificación, se estima un ahorro de un 50% en repuestos al implementar el sistema en una caja de laminación. Por ejemplo, si se toma el costo del año 2021 en tren medio, en promedio cada caja gasta 6.939 USD, por lo tanto, se estaría ahorrando 3.470 USD en repuestos por stand de laminación. Adicional a esto, hay que considerar el ahorro del 50% asociado a la disminución de las interrupciones causadas por rodamientos, teniendo en consideración que una hora de detención genera un costo cercano a los 8.070 USD.

A partir de este **análisis de fallas**, se procede a cotizar un sistema de medición de vibraciones con la posibilidad de monitorear y analizar los valores entregados con el fin de prevenir y predecir las fallas en los stands con el foco en los rodamientos. A partir del diagrama de Pareto en la Figura 4.7 se toma la decisión de avanzar con un **plan piloto de monitoreo de vibraciones en la caja más crítica; M11H**, con el fin de evaluar su efectividad en el equipo y sus ventajas en la reducción de los costos, para en un futuro evaluar la extensión del sistema a otras cajas.

5. Caja M11H y propuestas de medición y monitoreo de vibraciones

En este capítulo se abordan las propuestas de medición y monitoreo de vibraciones que se recomiendan para ejecutar un plan piloto en la Caja M11H, junto con su selección utilizando una matriz multicriterio. Estas propuestas incluyen el detalle de su alcance, las etapas, la cantidad y el tipo de sensores, la ubicación y montaje de los sensores en el equipo y el valor comercial de la propuesta. Adicional a esto, se describe el rodamiento crítico utilizado en los stands, los sensores y la ubicación de estos en cada una de las propuestas.

En el capítulo Análisis de fallas se determinó que el foco del análisis de vibraciones se centraría en los rodamientos de las cajas de laminación, y hace referencia a los rodamientos que soportan los cilindros de trabajo. El código de este rodamiento es RBC4-0103 F (o R 315189), el cual cuenta con una alta capacidad de carga. Los rodillos son dirigidos por los labios en los bordes exteriores de la pista y por el cuerpo de la jaula. La pista interna del rodamiento es del tipo sin bordes y se instala por ajuste con apriete (retracción) al cuello del cilindro. La pista interior normalmente permanece adherida durante la vida útil del cilindro de trabajo. Para garantizar la intercambiabilidad y un juego radial residual aceptable en el conjunto de rodamientos, las pistas internas deben ser compatibles con el conjunto de rodamientos externos seleccionado. La parte exterior del conjunto de rodamientos permanece con el calzo durante las operaciones de cambio de cilindro.

La cantidad de hileras de elementos rodantes en los rodamientos para los calzos de la caja HL es de cuatro. Dependiendo del fabricante del rodamiento, las unidades pueden suministrarse en dos partes idénticas o como una sola pieza que tenga el mismo ancho. Los fabricantes con los que trabaja Aceros AZA son FAG, LIBBE, SKF y TIMKEN entregan este rodamiento en dos partes idénticas, de dos hileras de rodillos cada una. Por lo tanto, por cada caja de laminación hay 8 rodamientos de dos hileras de rodillos que soportan los dos cilindros de trabajo. En la Figura 5.1 se muestra el rodamiento RBC4-0103 F como una pieza y las dimensiones extraídas de la ficha técnica de SKF [14]. Agregar que, el sufijo F significa que la jaula del rodamiento es de acero y no de latón, y que el diámetro interno del rodamiento con el anillo interior es de 160 mm. Para más detalle, consultar ficha técnica.



Dimensiones

Ancho	168 mm
Diámetro exterior	230 mm
Diámetro interno	179 mm

Figura 5.1: Dimensiones del rodamiento RBC4-0103 F. [14]

Con la finalidad de escoger el tipo de sensor que mejor se adecúe al monitoreo de vibraciones, es necesario conocer las velocidades de giro de los cilindros de trabajo (y de los rodamientos) de la Caja M11H. A través de la Receta HMI del Laminador Colina es posible extraer la velocidad de giro del motor en RPM de dicha caja. Sin embargo, dependiendo del producto que se esté fabricando, esta velocidad varía y, por tanto, también lo hace la velocidad de giro de los cilindros. Con la relación de reducción de la caja reductora, es posible calcular la velocidad de giro de cada cardán (los dos cardanes giran a la misma velocidad) de la caja. De esta manera se construye la tabla mostrada en el Anexo D con la velocidad de cada cardán de la caja M11H en función del producto que se está laminando (denominación en base al diámetro final del producto). Como la transmisión de movimiento entre los cardanes y los cilindros es 1:1 por medio de la torre, las velocidades de giro mostradas en la última columna de la tabla también corresponden a las velocidades de giro de cada cilindro y de cada rodamiento que lo soporta. De esta manera, el rango de operación de la velocidad de giro de los cilindros es de los 165,2 RPM hasta los 366,7 RPM.

Respecto de los tonos (frecuencias) del rodamiento RBC4-0103 F, estos se pueden encontrar en la página web SKF Select Bearing [15], ingresando las medidas del rodamiento y su tipo, tal y como se muestra en la Figura 5.2:

Filters

Dimensional constraints

Enter exact dimensions or ranges in mm to filter (e.g. 23-27, -40)

Bearing types

Cylindrical roller bearing

SKF Explorer bearings

Filter on SKF Explorer items only

Capping

Filter on open/capped bearings

Principal dimensions			Basic load ratings		Designation
d (mm)	D (mm)	B (mm)	C (kN)	C ₀ (kN)	
160	230	168	1290	2200	■ BC4-0103

Figura 5.2: Búsqueda y selección del rodamiento en SKF Bearing Select. [15]

Al seleccionar el rodamiento BC4-0103 (genérico), en la siguiente pestaña se elige la opción de frecuencias del rodamiento (bearing frequencies) y se requiere de entrada la velocidad de giro en RPM.

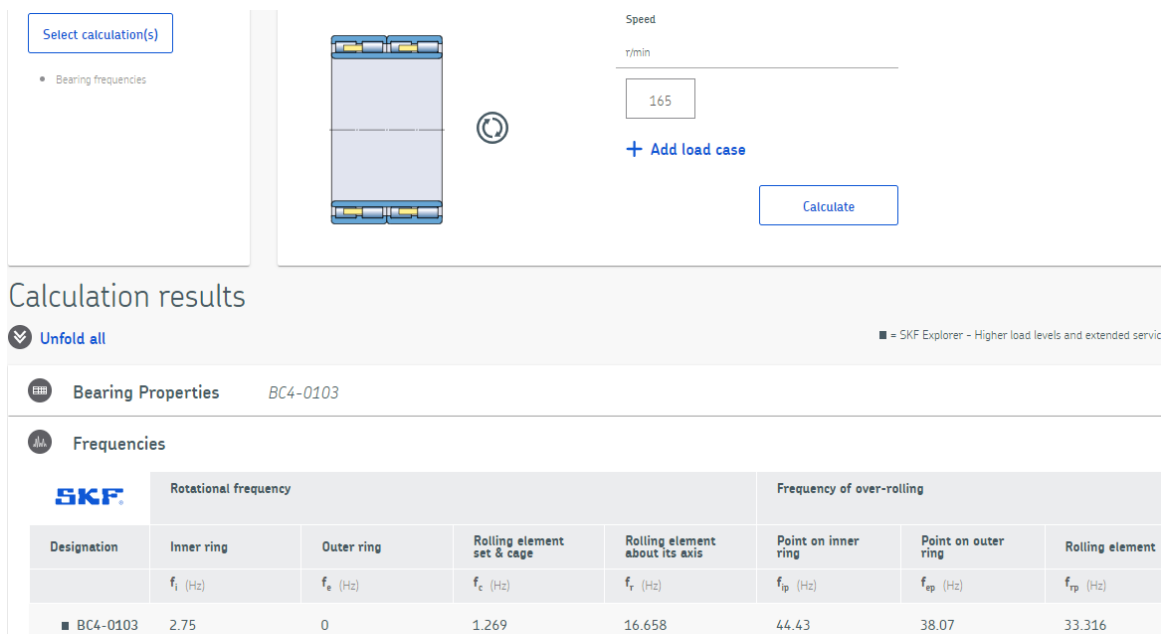


Figura 5.3: Frecuencias del rodamiento para la velocidad mínima de giro en la caja M11H. [15]

Debido a que para cada producto laminado los cilindros giran a diferentes velocidades (Anexo D), en este primer paso se ha decidido elegir las velocidades de giro mínima y máxima. En la Figura 5.3 se muestran las frecuencias obtenidas para la velocidad mínima de giro, de las cuales son de utilidad la de la jaula (f_c) y las 3 últimas de la tabla (f_{ip} , f_{op} , f_{rp}). La Tabla 5.1 muestra el resumen de las frecuencias del rodamiento obtenidas para las dos velocidades de giro de interés con la nomenclatura utilizada en Análisis de vibraciones:

Tabla 5.1: Frecuencias del rodamiento BC4-0103 (genérico) en función de las velocidades de giro. [15]

Velocidad de giro cilindros	BPMI [Hz]	BPFO [Hz]	FTF [Hz]	BSF [Hz]
165 RPM	44,4	38,1	1,3	33,3
367 RPM	98,8	84,7	2,8	74,1

Es posible apreciar de la Tabla 5.1, que las frecuencias características del rodamiento varían considerablemente con la velocidad de giro, más aún cuando la velocidad máxima de giro es cercana al doble de la velocidad mínima.

Por otro lado, se pueden estimar fácilmente 3 de las 4 frecuencias del rodamiento utilizando las ecuaciones (5), (6) y (7). Este cálculo se muestra en la Tabla 5.2:

Tabla 5.2: Estimaciones de las frecuencias del rodamiento BC4-0103 en función de las velocidades de giro.

Velocidad de giro cilindros	BPFI [Hz]	BPFO [Hz]	FTF [Hz]
165 RPM	49,5	33,0	1,1
367 RPM	110,1	73,4	2,4

Estas variaciones entre los valores de las 2 tablas mostradas se deben principalmente a que las fórmulas utilizadas son aproximaciones de las generales. Sin embargo, se mantienen cercanos entre ellos, lo que permite utilizar estas fórmulas como un cálculo rápido de las frecuencias.

En el plano Anexo B se muestra con mayor detalle el bastidor con los rodamientos y cilindros montados. Para facilitar el entendimiento del plano, se ha encerrado en un rectángulo los rodamientos RBC4-0103 F, con el número 15a. Recordar que por cada rectángulo hay dos rodamientos que constituyen las cuatro hileras de rodillos cilíndricos. Según este plano, la numeración para los cilindros de trabajo corresponde al número 101. También se muestran los rodamientos de bola para la regulación axial de los cilindros de trabajo, con el número 15b.

En el plano Anexo C se observa con mayor detalle el montaje entre la base y el bastidor mostrado en el Anexo B. También es posible observar los dispositivos de ajustes mostrados en la Figura 4.1 y los cabezales de pulverización de agua de enfriamiento para enfriar los cilindros de trabajo.

Respecto de las condiciones de operación del stand M11H, la palanquilla de acero pasa a unos 1000 °C aproximadamente con una mínima de 850 °C, donde la temperatura ambiente alrededor de la Caja M11H ronda en los 50 °C, por lo que es factible instalar un sensor en la zona. Sin embargo, el agua de refrigeración utilizada es agua dura, por lo que el sensor debe ser capaz de resistir un ambiente corrosivo además de la temperatura.

Los rodamientos RBC4-0103 F son lubricados con Mobilgrease HTS 100712 a través de una única central de grasa en el nivel 0. Esta grasa se recomienda principalmente para la lubricación de cojinetes, engranajes y levas donde los requisitos de lubricación elastohidrodinámica (EHL) dictan una significativa contribución viscosimétrica. Las grasas expulsan las aguas de acería, continúan lubricando y ayudan a formar un sello fuerte para resistir la intrusión de agua. Sus propiedades de presión extrema y la alta viscosidad del aceite ayudan a reducir el desgaste, lo que las hace especialmente aplicables para cargas de impacto pesadas. Con menos desgaste, los costos de mantenimiento para reemplazar rodamientos defectuosos serán menores. Además, se pueden utilizar en sistemas centralizados de distribución de grasa. Para más información consultar ficha técnica [16].

Un acercamiento al sistema de lubricación de bastidores en un stand de tren medio se muestra en la Figura 5.4, donde el distribuidor está encerrado en un rectángulo azul, las

mangueras que reciben la grasa desde la central se indican con “A”, la manguera “B” es para lubricación manual y es auxiliar (en caso de que la central falle) y “C” indica las tuberías que lubrican los dos rodamientos del calzo. El distribuidor tiene una capacidad de enviar a cada tubería “C” 2,5 [cc]. El ciclo de distribución de grasa consta de 120 [s] de inyección de grasa cada 23 minutos.

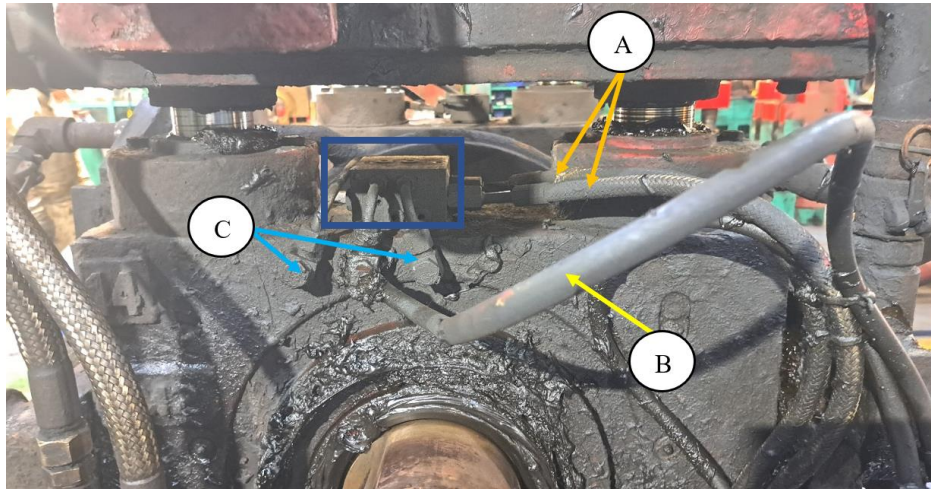


Figura 5.4: Sistema de lubricación de bastidores (con distribuidor) en stand de laminación.

5.1. Propuestas de sistemas de monitoreo

Para llevar a cabo el sistema de medición de vibraciones, se cotizaron dos propuestas de monitoreo de vibraciones con las empresas RODACENTER® y SODICOR®. Estas propuestas fueron elaboradas en conjunto con estas empresas al entregarles los datos sobre las condiciones de operación del stand (temperatura, refrigeración, velocidades de giro, tipo de grasa), el componente y las métricas de interés a monitorear (vibraciones en rodamientos 315189), los planos del equipo con el fin de identificar los mejores puntos de ubicación y montaje de los sensores, visitas a terreno y reuniones para definir el alcance de la propuesta, realizar consultas sobre el sistema de medición y monitoreo que cada uno ofrece, y finalmente, pedir la cotización de la propuesta con el valor económico de esta.

Dentro de los requerimientos para el sistema de monitoreo de vibraciones se encuentra lo siguiente:

- Al menos 4 acelerómetros para medir la vibración en velocidad y en aceleración (uno por cada calzo/bastidor del stand), idealmente triaxiales. Con al menos 2 años de duración.
- Fácil acceso al programa/software de monitoreo, que sea amigable para realizar el seguimiento de las mediciones, con gráficas claras y entendibles.
- Entrega de datos en tiempo real por parte de los sensores y visualización de gráficas en tiempo real.
- Facilidad de montaje de los sensores y resistentes a la temperatura y al agua.
- Opción para configurar alarmas preventivas y de alerta crítica para la prevención de fallas.
- Posibilidad de hacer análisis de espectro.

También se requiere asistencia por parte de la empresa proveedora para la puesta en marcha del sistema, la creación de la cuentas para el programa/software y la utilización del programa/software.

5.1.1. Propuesta de sistema de monitoreo online para stands de laminación, empresa RODACENTER de SKF

La propuesta de RODACENTER contempla el suministro de tecnología de un sistema de monitoreo de condiciones online que sirva para realizar mediciones y analizar la condición del equipo.

Las señales provenientes de los sensores son enviadas a través de cableado a la unidad de monitoreo de adquisición de datos. Esta unidad realiza el trabajo de recolección de medición, procesamiento de señales y análisis de alarmas. Posteriormente la unidad de monitoreo envía periódicamente todas las mediciones (globales y vibraciones complejas) al servidor del software dedicado de la plataforma @ptitude a través de un enlace 3G, subiendo la información a una nube, de acuerdo con la configuración previamente realizada en el software. Apoyados en esta información, los analistas podrán interpretar y detectar adecuadamente fallas, mediante la utilización de herramientas de análisis y la configuración de alarmas del software dedicado de la plataforma @ptitude.

La propuesta de RODACENTER tiene un costo de 21.292 USD (más IVA). Este costo contempla un ítem de tecnología requerida y otro ítem de servicios de ingeniería y configuración. En la Figura 5.5 se muestra el detalle de la valorización realizada por RODACENTER para el sistema de monitoreo online de la Caja M11H.

Valorización de Tecnología						
La tecnología requerida para la implementación del Sistema de monitoreo Online se presenta a continuación:						
Ítem	Designación	Equipo / Instrumento	Und	Cant	Valor Unitario USD	Valor Total USD
1	CMSS 2200	Sensor Vib. 100mV/g	C/U	4	563	2.252
2	CMON 4116	Unidad de Monitoreo IMX-16 (Incluye gabinete en chapa de acero, fuente de poder y router 3G de comunicación*)	C/U	1	9.488	9.488
3	MFS 211 / EVM 012	Tacómetro + Cable de 25 M (IFM)	C/U	1	538	538
4	CMCP 250	Kit de Montaje de Sensores para 25 sensores	C/U	1	1.368	1.368
5	CMSS 942-LCI-SY-20M	Cable para sensor de vibración de 20 metros	C/U	4	424	1.696
					Total USD	15.342

Servicios					
A continuación, se valorizan los servicios considerados para el Sistema de monitoreo Online en la presente oferta:					
Ítem	Descripción	Und.	Cant.	Valor Unitario USD	Valor Total USD
1	Servicio de Ingeniería de detalles y configuración	GL	1	5.950	5.950
				Total USD	5.950

Los valores indicados en la tabla anterior no incluyen el Impuesto de Valor Agregado – IVA.

Figura 5.5: Valorización propuesta de sistema de monitoreo online RODACENTER.

El acelerómetro propuesto por RODACENTER mide en un solo eje, cumple con los estrictos requisitos de CE y EMC. Además, es resistente a la corrosión y herméticamente sellado para instalación en áreas de alta humedad. Posee un rango de frecuencias de 1,0 - 5.000 [Hz] $\pm$ 10%. La ventaja de este acelerómetro piezoeléctrico es que mide continuamente y no por intervalos debido a que es cableado.

54

La unidad de monitoreo escogida para esta propuesta es la IMX-16 de designación CMON 4116. Con hasta 16 canales analógicos y 4 digitales, la IMX-16 recopila los datos esenciales que indican exactamente el rendimiento de los equipos. Permite medir y almacenar los datos de la máquina para su posterior análisis, con indicación de alarma en tiempo real. Cuenta con 4 GB de memoria interna para almacenar el equivalente a un año de datos y eventos de la máquina. En la Figura 5.7 se observan la unidad de monitoreo de SKF IMX-16 junto con el gabinete.



Figura 5.7: Unidad de monitoreo IMX-16 SKF, propuesta RODACENTER.

El tacómetro incluido en la propuesta cuenta con un detector metálico con célula GMR, su cuerpo es completamente metálico (inoxidable 316L), tiene un alcance de 60 mm con imán M 4.0 y una sensibilidad de reacción de 1,3 mT. Este tacómetro resiste hasta 100 [bar] de presión, con un rango de temperaturas de operación entre los -25 °C y los 75 °C, y un grado de resistencia IP 65/ IP 67. En la Figura 5.8 se observa la forma y medidas del tacómetro MFS211.

MFS211

MFK3060-BPKG/AM/G/US

Detectores magnéticos, Detectores para cilindros

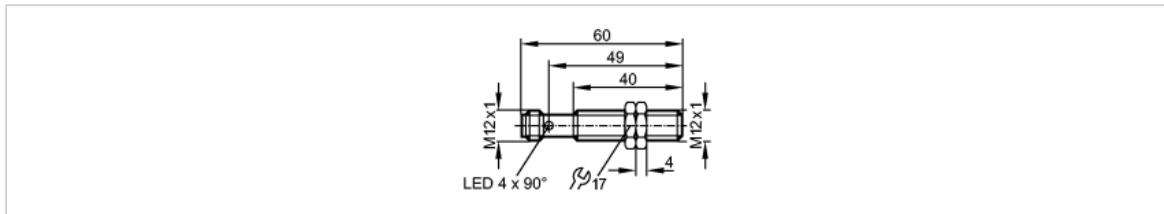


Figura 5.8: Tacómetro MFS211, propuesta RODACENTER.

Respecto del kit de montaje pensado para 25 sensores, viene designado como CMCP 250. EL kit incluye: almohadillas de montaje (25), adhesivo activador y fijador de roscas, sellador de silicona, mango de grifo, llave Allen, taladro de 1/4", herramienta de roscado de 1/4" x 28 UNF (3).

Para el servicio de ingeniería de detalles se deben entregar los planos del conexionado eléctrico, planos mecánicos de gabinete, procedimientos de montaje, ficha técnica de suministros, certificado de pruebas, especificación técnica para cada equipo y la arquitectura de red.

Cabe agregar que, en esta propuesta no está contemplada la licencia ni el software de SKF en la propuesta, debido a que RODACENTER ya cuenta con un sistema de monitoreo de vibraciones en planta con otro equipo del laminador.

SKF entregará informes mensuales reportando las condiciones del equipo que se monitoreo y ofreciendo soluciones para corregir cualquier condición anormal.

Respecto de la garantía, esta solo es válida para los equipos y accesorios que presenten defectos de fabricación por los periodos que a continuación se detallan: Cables de sensores poseen garantía de seis meses. Unidades de monitoreo y sensores poseen garantía de doce meses.

Se excluyen de esta propuesta:

- Servicio de montaje y asistencia para montaje
- Servicios en terreno
- Trabajos no relacionados con tecnología SKF
- Obras civiles, fundaciones y pernos de anclaje
- Sensorizado de equipos que no hayan sido incluidos en el alcance de la presente propuesta
- Reposición de sensores, canalizaciones o cableados extraídos o desmontados por mantenimientos del área y de los equipos
- Reposición o chequeo de unidades de adquisición de datos, cables, conectores o accesorios
- Suministro, tendido y fusiones de Fibra óptica.

5.1.2. Propuesta para monitoreo remoto continuo con sensores WIFI para stand de laminación, empresa SODYCOR de RYASA MX

La finalidad de la propuesta es el monitoreo remoto continuo del stand de laminación M11H, mediante el cual se puede visualizar en tiempo real las métricas como: vibraciones, aceleración, temperatura de operación, hora de operación, frecuencia de línea (HP). Donde cada métrica es medida según la escala permitida bajo la norma ISO 20816-3:2022 (reemplaza a ISO 10816-3). [13]

La señal que genere el sensor contendrá la información de los elementos que monitoreará dentro del stand (en este caso los rodamientos).

La propuesta de SODYCOR tiene un costo de 8.250 USD (más IVA) y contempla 5 etapas para llevar a cabo su implementación, donde las primeras 4 etapas se realizan en conjunto con personal de AZA.

Etapas 1:

- Recopilación de información histórica con el fin de garantizar la salud y buen estado del equipo.
- Creación de parámetros y consenso de equipos críticos. Se crean las alarmas en el software para los equipos.
- Evaluación de criterios de alarma y sus protocolos de respuestas.

Etapas 2:

- Designación de sensores y conexiones.

Tabla 5.3: Designación de elementos de medición y recopilación de datos.

Descripción	N° parte	Cantidad
Smart Sensor Bearing Mt	750000	8
Gateway 10.SIA Router	ABB0188551	1
POE Injector	ABB00190326	1

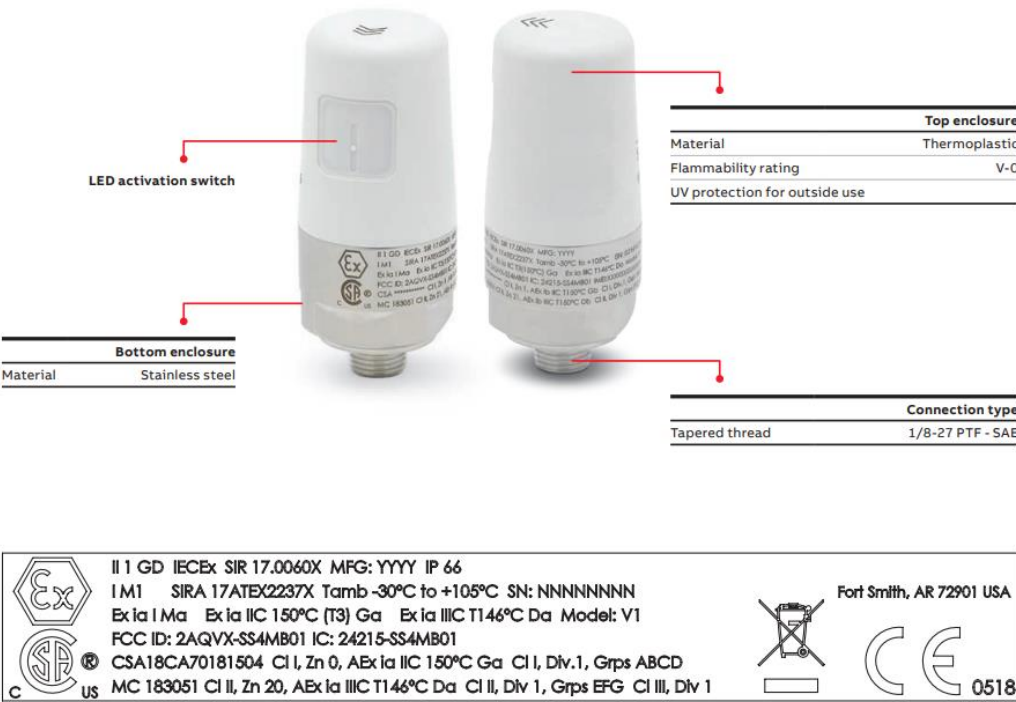
Se llegó a consenso con SODYCOR que los sensores a utilizar son acelerómetros del tipo piezoeléctrico. El número de parte y la cantidad de sensores necesaria para la Caja M11H se muestran en la Tabla 5.3. Se definió esta cantidad debido a que idealmente cada rodamiento debe tener

asociado un sensor, tal y como se señala en la sección Análisis de vibraciones.

Los otros 2 elementos mostrados en la Tabla 5.3 son complementarios al sistema, y se utilizan para captar los datos que recopila el sensor y enviarlos a la nube.

La información de este sensor inteligente marca Dodge para rodamientos montados se detalla en la Figura 5.9, en Anexo F y en Anexo G.

Safe to use
Certificates



En la Figura 5.9 se muestra el certificado del acelerómetro piezoeléctrico inalámbrico triaxial, el cual está hecho de acero inoxidable (base), termoplástico y silicona. Además, la base del sensor viene con una rosca, lo cual facilita la instalación del sensor en los equipos. Es de fácil activación pulsando el interruptor de activación LED.

Los datos recopilados por el sensor inteligente para rodamientos montados envían los datos a la nube de Dodge y son visualizados por el usuario en el sitio web Dodge Optify [17]. Este portal permite monitorear las vibraciones de los equipos en velocidad, aceleración y la temperatura. También es posible analizar las tendencias de los datos, ajustar el ciclo entre las mediciones, generar alertas preventivas y alertas críticas para los equipos.

Respecto de las dimensiones e instalación del sensor, estas se muestran en Anexo F, donde las medidas generales son: 60,5 x 26,4 x 24,61 mm (alto x largo x ancho). También se encuentran las medidas de la rosca y la información de instalación como el torque.

Los datos técnicos del sensor se muestran en Anexo G, donde aparece el detalle de los certificados, el grado de protección de entrada que es IP 66 (equipo hermético al polvo y protegido contra chorros de agua potentes), el rango de temperatura que mide el sensor, junto con su resolución y precisión. El sensor utiliza Bluetooth Low Energy para comunicar de forma inalámbrica información sobre el estado operativo de los rodamientos a través de un Gateway y este envía los datos a los servidores de Dodge. Los datos del sensor se pueden mostrar gráficamente en un smartphone, tablet o en el portal web Dodge Optify.

El rango de amplitud de la vibración es $\pm 2g$, con un rango de frecuencia entre 1 Hz a 1,6 kHz (rango bastante acotado), el tipo de detección principal es RMS, pero también permite detectar problemas midiendo datos en aceleración, estos datos ayudan a prevenir las fallas en rodamientos con mayor anticipación.

En Anexo G también se entrega el rango de temperatura ambiente en la que opera el sensor, el cual está entre los -30 a 85 °C. Por lo tanto, es factible instalar el sensor puesto que la temperatura de operación es de 50 °C aproximadamente. La batería de celda es de 3,6 V hecha de cloruro de tionilo de litio (LiSOCl₂), la cual no es reemplazable, y la duración de esta varía entre dos años a tres años dependiendo de la cantidad de mediciones realizadas por hora. Respecto de la medición, el sensor mide varias veces en un periodo de tiempo y genera un promedio, por ejemplo, a ciertas RPM mide 4 veces por 10 segundos y crea un valor.

Para conocer más detalles del sensor y la marca, visitar la página Dodge Industrial. [18]

- Programación del software. Programación e instalación de cada sensor en su ubicación asignada.
La ubicación de los sensores debe ser lo más cercano a cada rodamiento, por lo que SODYCOR propuso 8 sensores considerando que cada rodamiento es bipartido.
- Creación de variables a monitorear basados en la Norma ISO 19816-3 Equipo dinámico crítico. En este caso serán los niveles de vibración y la temperatura.

Etapas 3:

- Generación de la comunicación Activo – Sensor – Gateway – Software. En la Figura 5.10 se aprecia un esquema del modelo de la etapa 3 de la propuesta de SODYCOR. Los sensores toman los datos del equipo, luego el Gateway se encarga de enviar estos datos a la nueva para su posterior análisis en el software. El WIFI es proporcionado por AZA.

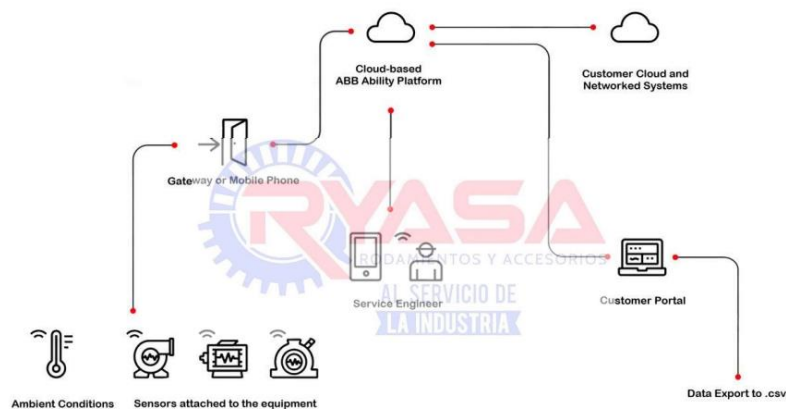


Figura 5.10: Modelo de etapa 3, propuesta SODYCOR de RYASA MX.

Etapas 4:

- Creación del “Dashboard” de visualización con todas las métricas obtenidas mediante los sensores y procesada por la electrónica de diagnóstico (Power BI).
En la Figura 5.11 se muestra un ejemplo de un equipo monitoreado, donde las variables de interés son las mismas que las de esta propuesta.



Figura 5.11: Ejemplo de visualización en Power BI de un monitoreo de vibraciones realizado por RYASA MX.

- Los centros de diagnóstico serán 2: Local AZA Chile y SODYCOR RYASA México (solo visualización).
- Generación de Reporte Electrónico semanal sin costo para AZA.

Etapas 5:

- Servicios Post Venta. Programación de 3 visitas para revisión y ajuste de todo el sistema instalado.
- Servicio en Sitio
- Garantías. 1 año después de recibido, aceptado y firmado el reporte de instalación total. Fallas por fabricación, no se extiende a equipos con golpes o dañados por la operación.

El servicio se realiza de acuerdo con las normas de seguridad establecidas y se llevará a cabo en las instalaciones de AZA Colina. RYASA pondrá Personal entrenado y certificado para realizar el servicio con asistencia mecánica por parte de AZA. Además, RYASA realizará las labores de colocación - programación y puesta en marcha del sistema.

5.2. Selección del sistema de medición de vibraciones

Una vez detalladas las 2 propuestas para el sistema medición de vibraciones se procede a seleccionar el más indicado para la condición operacional del stand M11H utilizando una matriz multicriterial (MMC) para equipos al analizar lo ofrecido en cada propuesta. Esta matriz entregada por el área de Ingeniería de AZA se utiliza en la selección de oferentes para proyectos ingenieriles, por lo que tiene un formato establecido. El primer campo es una evaluación multicriterio y consiste en evaluar 4 aspectos. Cada aspecto se evalúa con una nota de 1 a 5 y luego se calcula la nota de cada oferente como el promedio ponderado de cada ítem y se le asigna un porcentaje relativo de cumplimiento a cada uno. El desarrollo del primer campo se muestra en la Tabla 5.4:

Tabla 5.4: Evaluación multicriterial para la selección del sistema de medición de vibraciones, MMC.

EVALUACIÓN MULTICRITERIAL					
			OFERENTE	SODYCOR	RODACENTER
FACTORES	ITEMS DE EVALUACIÓN		PESO	EVALUACIÓN (1-5)	
Proyecto, Fabricación y Montaje	1.1	Calidad de la Documentación	3	5	5
	1.2	Fabricación, Pre-montaje/ Montaje	3	5	3
	1.3	Solución Tecnológica	3	4	3
Operación y Mantenimiento	2.1	Automatización	3	4	5
	2.2	Facilidad de Mantenimiento	3	5	3
	2.3	Robustez y Confiabilidad Operacional	5	4	3
	2.4	Tecnología Comprobada (Referencias)	5	5	5
	2.5	Disponibilidad para visitas de referencia	1	5	5
Puesta en marcha y Post-Ventas	3.1	Soporte Técnico	3	5	4
	3.2	Calidad de Entrenamiento	5	5	4
	3.3	Experiencia Campo	3	5	4
Calidad Comercial	4.1	Solidez de la Empresa	3	5	5
	4.2	Estructura Comercial/ Gestión	3	5	5
	4.3	Garantías de Performance PAC/FAC	0		
	4.4	Garantías Extendidas	3	5	5
	4.5	Cumplimiento de los Plazos (Histórico)	3	3	3
RESUMEN DE LA EVALUACIÓN MULTICRITERIAL					
CRITERIOS PARA EVALUACIÓN (PUNTOS)		EVALUACIÓN DE LOS PROVEEDORES		SODYCOR	RODACENTER
5	EXCELENTE			4,7	4,1
4	BUENO, PERMITE DESEMPEÑO SUPERIOR				
3	REGULAR, ATIENDE EL MÍNIMO NECESARIO				
2	DEFICIENTE			100%	88%
1	NO ALCANZA ESTÁNDARES MÍNIMOS. SIN INFORMACIÓN				

Como es posible observar en la Tabla 5.4, en este primer campo **SODYCOR** es el **mejor oferente** obteniendo una nota de 4,7 versus RODACENTER que obtiene un 3,9. Esta calificación se justifica principalmente en que los sensores de SKF al ser cableados, pierden robustez ya que presentan más puntos de fallas en la línea de montaje, dificultando el mantenimiento del stand cuando se retira de la línea, y del sensor en sí

cuando se encuentre sucio y requiera una limpieza. También la implementación de un sensor cableado implica crear las canalizaciones necesarias en el tren de laminación exclusivamente para estos sensores puesto que las otras canalizaciones existentes presentan mucho ruido de cables debido a la alta presencia de componentes de instrumentación en la línea. Esto también genera un problema, debido a que si el cable no se protege bien, puede dañarse rápidamente producto del agua de refrigeración y del óxido que caen de la operación del stand, sumado a la temperatura provocada por el paso de la barra. Sin embargo, es importante destacar que al ser cableado permite la medición continua de las vibraciones del stand, lo que permite evaluar en cada instante el valor de la vibración y la creación instantánea del espectro de vibración. Por otro lado, el sensor de Dodge es más robusto en las condiciones de operación del stand (resistencia, accesibilidad, montaje y mantenimiento), pero mide por intervalos de tiempo, lo cual implica que no es posible obtener el valor de la medición ni el espectro en cada instante.

En los últimos dos aspectos de la evaluación multicriterio también predomina SODYCOR, ya que ofrecen un servicio más completo de puesta en marcha y de postventa, lo que incluye la asistencia de un especialista extranjero en vibraciones durante el montaje y configuración durante la puesta en marcha del sistema, y la entrega de informes del estado del equipo (en base a la medición de los sensores) sin costo durante la vida útil del sensor.

El segundo campo de la MMC es la evaluación del impacto en el CAPEX producto de inversiones de instalación adicionales que son necesarias para la implementación del sistema de medición de vibraciones. Esto se muestra en la Tabla 5.5, donde se cuantifican 246 USD adicionales para SODYCOR y 370 USD para la implementación de la propuesta de RODACENTER. Esta diferencia entre los 2 oferentes se debe a que para el montaje de los sensores inalámbricos (SODYCPR) solo se requieren las bases roscadas (Anexo H) y el pegamento/soldadura para adherirlas al stand. Por otro lado, los sensores cableados de SKF requieren una inversión en la compra e instalación de canalizaciones para proteger el cable y un análisis de la mejor ubicación para que estas no entorpezcan con el cableado de la instrumentación ya existente en terreno, al incluir un kit de montaje, no se requiere pegamento ni bases adicionales.

Tabla 5.5: Evaluación del impacto en el CAPEX producto de adicionales asociados a la ejecución del proyecto, MMC.

IMPACTOS EN CAPEX - INCLUIR COSTOS ADICIONALES QUE IMPACTEN EN PRESUPUESTO					
			OFERENTE	SODYCOR	RODACENTER
INVERSIÓN ADICIONAL	5	SUBTOTAL INVERSIÓN		247	309
Cuantificar inversiones de instalación complementarias necesarias a la implantación de la tecnología/ solución propuesta y adicionar los mismos en el valor de la propuesta del proveedor. Informar la diferencia en relación al menor valor (referencial).	5.1	Inversión en obras para el montaje y visualización del sist.	USD\$	247	309
	5.2				
	5.3				
	5.4				
	5.5				

Adicionalmente, en ambas propuestas se debe invertir en una CPU y pantalla para la visualización de los gráficos desde el púlpito de control principal, los cuales están incluidos en la cuantificación de la Tabla 5.5.

El tercer campo de la MMC es el análisis comercial de ambos oferentes, siendo prácticamente un resumen de lo realizado, donde el Subtotal Corregido es la suma del Precio Total Ofertado sumado con el Impacto en el CAPEX. El Precio Total Ajustado se obtiene al dividir el Subtotal Corregido por el Resultado de la evaluación relativa (Tabla 5.4).

Tabla 5.6: Análisis comercial del proyecto, para la selección del mejor oferente, MMC.

ANÁLISIS COMERCIAL					
			OFERENTE	SODYCOR	RODACENTER
Calcular el Precio Total Ajustado, considerando los impactos adicionales al negocio (Capex, Opex y diferencial de calidad de la MMC)	7	Precio Total Ofertado - Propuesta Comercial	USD\$	8.250	21.295
	7.1	Capex Adicional	USD\$	247	309
	7.2	Opex Adicional (VPN 10 años)	USD\$	0	0
	7.3	Subtotal Corregido	USD\$	8.497	21.604
	7.4	Resultado de la Evaluación Relativa de la MMC	%	100%	88%
	8	Precio Total Ajustado	USD\$	8.497	24.628

Finalmente, con la MMC se determina que el mejor oferente para la implementación del sistema de medición de vibraciones es SODYCOR, ya que tiene un Precio Total Ajustado menor, lo cual se justifica en los otros campos de la matriz Por lo tanto, se decide avanzar con la propuesta de SODYCOR y sus sensores inalámbricos para la implementación del plan piloto en el stand M11H.

6. Puesta en marcha del sistema, selección de métricas y análisis de valores obtenidos

Con la elección de la propuesta de SODYCOR en el capítulo 5, se realiza la orden de compra para proceder con la implementación del sistema de medición de vibraciones en la Caja M11H. Paralelo a eso, se solicita el apoyo de los mecánicos encargados del mantenimiento de los stands y a personal de SODYCOR para definir con ambas partes las ubicaciones óptimas para el montaje de los sensores. Estas ubicaciones se muestran en la Figura 6.1 como circunferencias blancas para los que quedarán atornillados en la dirección transversal a la pantalla y como rectángulos a los que quedarán paralelos al plano de la pantalla.



Figura 6.1: Definición de posiciones de los sensores en stand M11H.

El día del montaje de los sensores, los mantenedores realizan una limpieza de las superficies del stand en los lugares mostrados en la Figura 6.1 (previamente coordinado), con el equipo en el taller de mantenimiento. Para ello se utiliza un desengrasante ultra concentrado y se pulen las superficies en cada zona de interés con el fin de remover cualquier óxido presente y restos de pintura. Se adjunta imagen del trabajo de limpieza en la Figura 6.2:



Figura 6.2: Limpieza de las zonas de interés en stand M11H.

Para que el montaje de los acelerómetros no fuera tan invasivo, es decir, sin tener que perforar los calzos, en las reuniones de pre-trabajo se decide utilizar una base circular con rosca hembra que fuera pegada al stand y así el sensor solo se desmonta "destornillándolo" de la base. Esta base se manda a fabrica por AZA, y el resultado se muestra en la Figura 6.3, adicionalmente se adjunta el plano en Anexo H donde se pueden apreciar sus dimensiones. La adhesión de las bases a la superficie del stand se consigue utilizando un pegamento Loctite AA 330 y un activador Loctite SF 7387, para más información revisar la página de FERAM. [19]

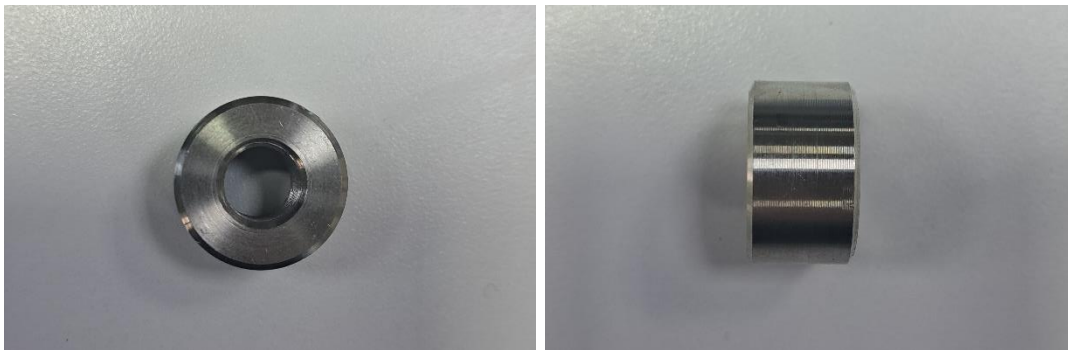


Figura 6.3: Bases roscadas para el montaje de los acelerómetros.

Una vez preparadas las zonas de interés en el stand M11H, se procede a pegar las bases y se espera que se sequen antes de atornillar los sensores. Cabe agregar que, solo se debe dar un pequeño apriete al sensor una vez que la rosca de este llega al final de la base, con tal de prevenir que esta se suelte por exceso de torque. En la Figura 6.4 se muestra la instalación de las bases por una de las caras del stand M11H, donde se puede apreciar que el calzo inferior ya tiene la base y el sensor montados.



Figura 6.4: Instalación de bases para sensores al stand M11H.

Con todas las bases pegadas, se procede a montar los acelerómetros en el taller para apreciar la instalación completa. Esto se muestra en la Figura 6.5:



Figura 6.5: Montaje de prueba de acelerómetros en taller de mantenimiento.

A modo de facilitar el montaje y desmontaje además del seguimiento de cada acelerómetro, se crea un padrón asociándole a cada cara del stand nombres comunes utilizados en el laminador, como lo son Lado Opuesto Motor (LOM) y Lado Motor (LM), donde la cara LM es la que se ven los muñones de los cilindros que van conectados a las torres. De esta manera, se numeran los acelerómetros partiendo desde los bastidores superiores en cada cara. Este padrón se muestra en la Figura 6.6, donde se escoge un formato: "cara-número" para denominar cada sensor:



Figura 6.6: Padrón de montaje de sensores acelerómetros en stand M11H.

Con toda la instalación realizada, se procede a subir el stand a la línea de laminación para realizar pruebas de giro en vacío (sin paso de la barra) con el fin de ajustar la toma de datos y obtener las primeras mediciones de vibraciones del stand.

Durante la semana se había realizado la gestión con el departamento de TI de AZA para autorizar una dirección IP para el Gateway (puerta de acceso) con la finalidad de que este pudiera enviar los datos recolectados a los servidores de SODYCOR - RYASA y de esta manera se puedan observar en la página web en tiempo real.

Respecto de las pruebas en el stand M11H de giro en vacío, estas se realizan por cerca de una hora y es posible corroborar que los sensores están en línea y envían la información a los servidores.

La página web para monitorear los valores de vibraciones es Dodge Optify [17], y se cuenta con dos usuarios para ingresar, ambos creados por Ryasa. Uno de estos usuarios es de administrador (soporte.acerosazacl@soporteryasa.com.mx), el cual puede editar los ciclos de medición, las alarmas del sistema e invitar a otros usuarios a visualizar, y el otro usuario es de visor (soporte.acerosazacl1@soporteryasa.com.mx), el cual solo puede observar los valores y los gráficos creados por la página, sin la posibilidad de editar parámetros. En la Figura 6.7 se observa el panel de la plataforma, a la cual se ha ingresado con el usuario administrador. En la ventana izquierda se observan 4 categorías: “Dashboard”, “Assets”, “Plant” y “Gateways”. En la primera se puede observar el nombre y foto del equipo que se está monitoreando, junto con el nombre y estado de las conexiones de los sensores que se han instalado. Además, se aprecia un círculo de color verde, el cual indica que el equipo está dentro de los parámetros normales de funcionamiento.

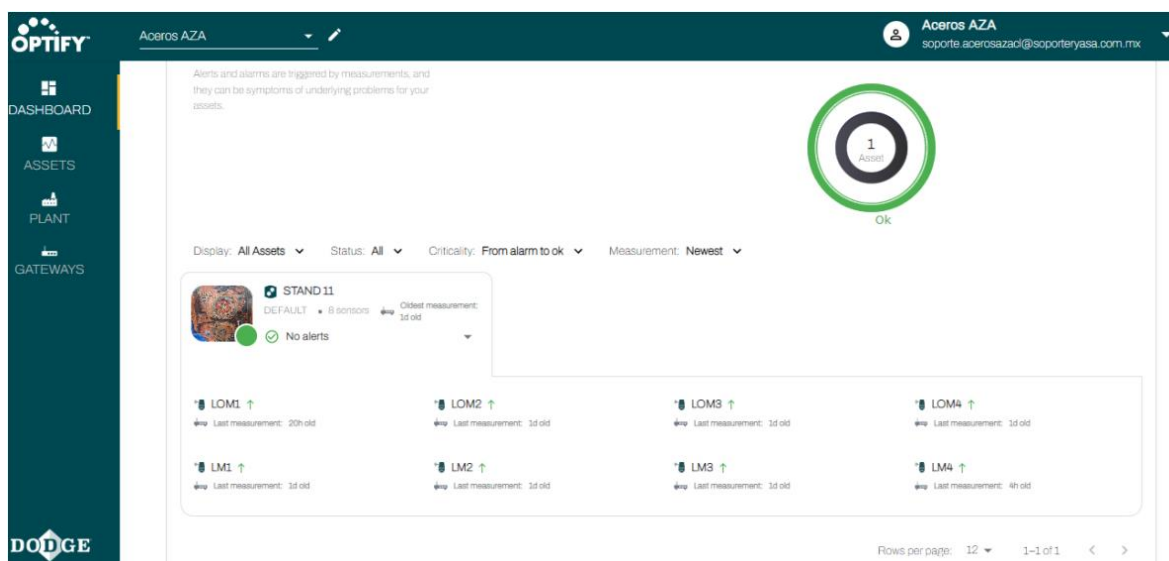


Figura 6.7: Dashboard en Dodge Optify con el usuario administrador. [17]

La ventana de “Assets” permite observar los datos recopilados en 3 gráficos; Temperatura, Aceleración RMS y Velocidad RMS como valores globales. En la Figura 6.8 se puede apreciar el gráfico de temperatura para el sensor LOM1 junto con sus límites de alerta temprana (línea naranja) y de alerta crítica (línea roja). Los valores de estas alertas aún no están parametrizados debido a que el tiempo de medición ha sido muy corto para definir alertas confiables. Si se desea observar más de un sensor a la vez, se debe apretar el nombre del sensor en el panel izquierdo y esperar que la gráfica cargue nuevamente, también es posible cambiar el día inicial y final de los gráficos con el calendario que se ve en la parte superior izquierda.



Figura 6.8: Gráfico de temperatura para el sensor LOM1 en el día 13/01/2023. [17]

Los gráficos de aceleración y velocidad para el día 13/01/2023 para 4 de los 7 sensores se muestran en la Figura 6.9. Se ha decidido mostrar 4 sensores en esta imagen para mostrar la vista y la separación por colores que designa la plataforma por cada sensor.



Figura 6.9: Gráficos de aceleración y velocidad para 4 sensores.

Desde la pestaña “Plant”, se pueden observar todos los equipos que se monitorean, junto con la información y configuración de cada sensor instalado en ese equipo. En la ventana desplegable mostrada en la Figura 6.10, por cada sensor se puede cambiar el intervalo de medición, siendo el mínimo de 15 minutos y el máximo de 12 horas, el rango

del acelerómetro (2g a 16g), y la habilitación de la recopilación de datos de los tres ejes (acelerómetro triaxial).

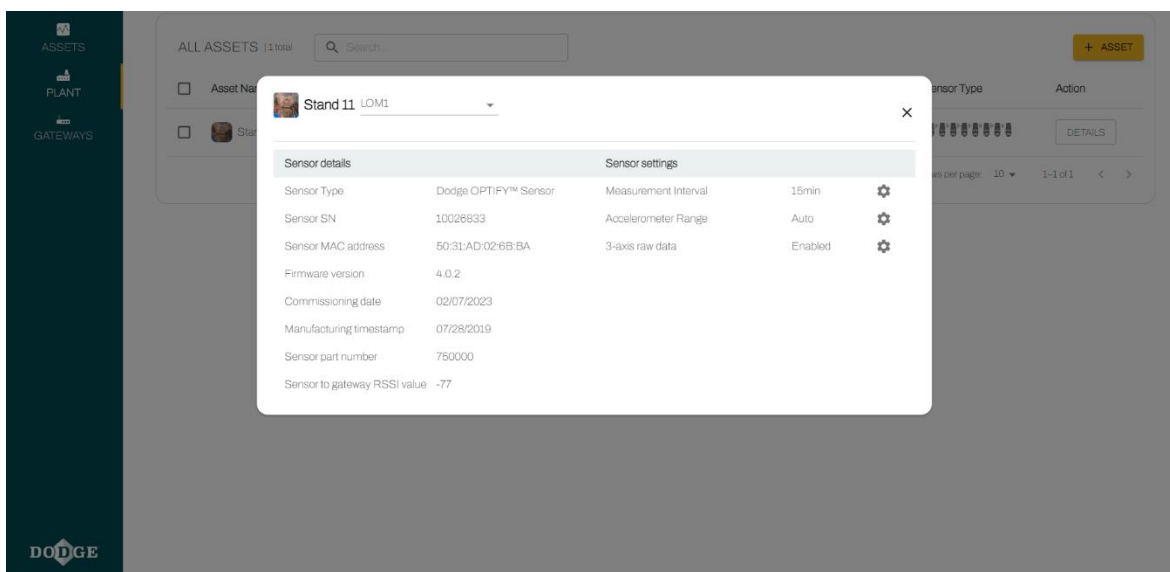


Figura 6.10: Plant, equipos monitoreados más información y configuración de los sensores. [17]

La ventana de “Gateways” de la plataforma muestra las puertas de acceso que se han configurado para recopilar los datos, en este caso es solo uno el que se requiere.

Para el cuidado de los sensores se recomienda el desmontaje de estos antes de montar o desmontar el stand de la línea de laminación, con el fin de evitar golpes en estos. También se recomienda limpiarlos (luego de su desmontaje) con WD-40 para eliminar los restos de grasa y partículas metálicas que hayan quedado en su superficie y en su rosca.

El primer periodo de monitoreo de vibraciones en el stand M11H en producción se lleva a cabo entre los días 13/02/20223 al 21/02/2023. En este periodo se elabora barra y alambra de diferentes diámetros los cuales se muestran en el Anexo I, donde se puede apreciar que en 8 días se laminan hasta 14 productos distintos y con distintas velocidades de giro (Anexo D). Cabe destacar que, la planificación de la producción varía todos los meses, y por tanto, las horas de producción de cada producto también. El intervalo de medición escogido es de 15 minutos.

Las métricas seleccionadas para el monitoreo del stand son: temperatura, vibración RMS en velocidad y en aceleración. Los gráficos de estas 3 métricas en el primer periodo de monitoreo se muestran en el Anexo J. Para una mejor visualización, se elige mostrar 2 sensores por cada lado; LM1, LM3, LOM1 y LOM4 (nomenclatura según Figura 6.6).

A continuación, se muestra en la Figura 6.11 el stand M11H en proceso durante el primer periodo. La cara visible del stand es lado opuesto motor (LOM), donde los motores de corriente continua junto con su sistema de ventilación se pueden apreciar atrás de un color gris.

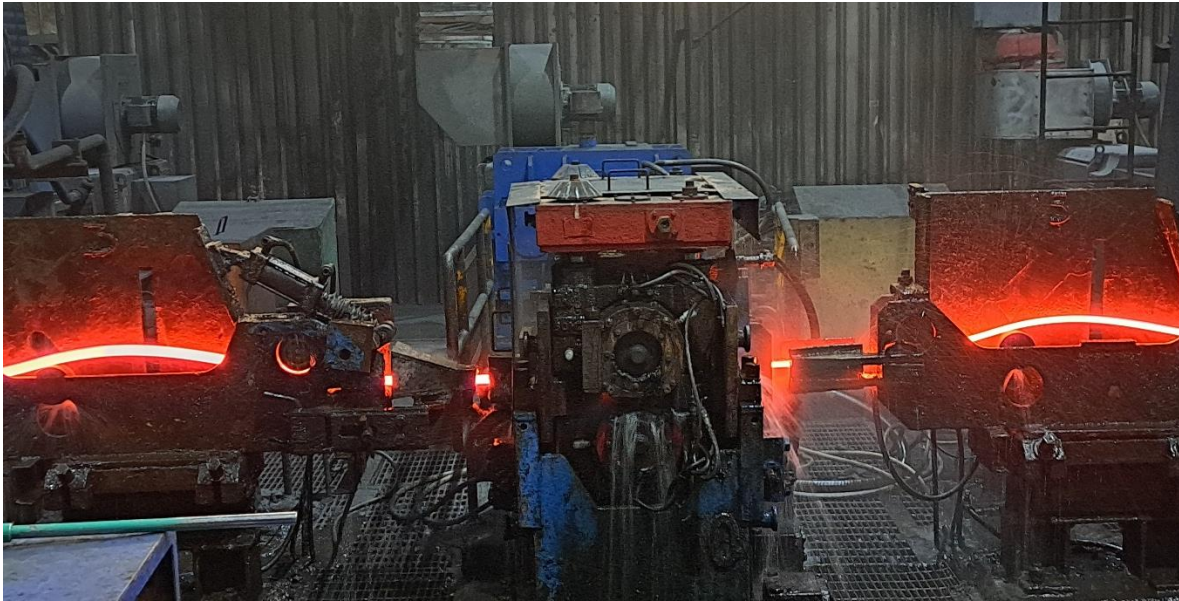


Figura 6.11: Stand M11H en proceso con sensores montados, Laminación Colina.

Respecto del primer gráfico del Anexo J, el cual muestra la vibración en aceleración en unidad de [g RMS]. Durante el primer periodo, ningún sensor supera los 0,25 [g RMS], pero sí se detecta un aumento en el valor de la medición durante los días 14 y 15 de febrero. El 15 de febrero hay una parada de mantenimiento, en la cual se lubrican manualmente los stands y se ajusta la separación de los cilindros para laminar un producto distinto en la partida. Luego de esa parada de mantenimiento, los valores disminuyen manteniéndose bajo los 0,15 [g RMS] salvo en algunas mediciones puntuales del sensor LOM4.

En el gráfico de velocidad mostrado en el Anexo J, se puede apreciar que durante los días 14 y 15 de febrero también hay un aumento en los valores de la velocidad, donde el sensor LM1 alcanza los 12 [mm/s] y el LOM1 los 10 [mm/s]. Tal y como ocurre con la aceleración, los valores de la vibración en velocidad también disminuyen luego de la parada de mantenimiento, mostrando valores por debajo de los 4 mm/s el resto de la semana.

Los valores de temperatura durante el primer periodo no superan los 45 °C, este valor representa la temperatura del ambiente en la que se encuentra el sensor. Adicionalmente se puede observar en el primer gráfico del Anexo J que los sensores LOM (líneas roja y anaranjada) alcanzan valores más bajos de temperatura ambiente. Esto se debe a que por el LOM escurre más agua desde las guías de refrigeración, enfriando la superficie en la que se encuentra el sensor. En cambio por el LM se encuentra la torre acoplada al stand, por lo que el espacio es menor y no escurre tanta agua.

Considerando un delta de 10 °C al interior de cada bastidor debido al giro de los rodamientos, se debe tener especial cuidado si la temperatura interior alcanza los 60 °C (50 °C lectura del sensor). Este valor de temperatura puede ser considerado un valor de alerta crítico, debido a que la grasa puede comenzar a perder sus propiedades, lo que hará que el

rodamiento no opere óptimamente. Sin embargo, no se alcanza esta temperatura en las lecturas, por lo que el funcionamiento por temperatura se puede considerar óptimo.

Sin embargo, cuando el stand se baja al taller para hacerle mantenimiento, en el rodamiento del bastidor superior por lado motor (LM), se encuentra la grasa emulsionada y con material particulado proveniente de la jaula del rodamiento (mantiene los rodillos del rodamiento en su lugar).



Figura 6.12: Estado rodamiento bastidor superior LM, stand M11H.

La Figura 6.12 muestra el estado del rodamiento durante la inspección en taller, donde se puede apreciar que en la sección donde se encuentra la grasa acumulada, esta se ve brillante y de color grisáceo. El brillo de la grasa se debe al material particulado de la jaula, y el color se debe a la emulsión de la grasa debido al agua de refrigeración que se filtra al rodamiento. Esto se puede relacionar con los valores registrados durante los días 14 y 15 de febrero, los cuales son diferentes al del resto del periodo, alcanzando en velocidad los 12 [mm/s] y sobrepasando los 0,2 [g RMS] en aceleración durante esos dos días.

Debido a que las grasas son más viscosas que la mayoría de los aceites lubricantes, estas también pueden ocultar o amortiguar ciertos efectos en algún componente que tenga algún desperfecto, esto explicaría el porqué de la baja en los valores de las vibraciones después de la parada de mantenimiento del 15 de febrero, ya que la instrucción es lubricar

manualmente el stand hasta comenzar a remover la grasa "vieja", quedando una gran cantidad de grasa dentro del rodamiento para el reinicio de la producción.

Cabe agregar que, se realiza el cambio del rodamiento en mal estado, se lavan los otros rodamientos, se hace una recuperación estructural de dos bastidores y se cambian parte de la pernería durante el mantenimiento del equipo antes de volver nuevamente a producción.

El segundo periodo de monitoreo de vibraciones se realiza a partir del 21/03/2023 hasta el 12/04/2023. En este periodo solo se instalan 4 acelerómetros en el stand debido a que los otros 3 presentan problemas con sus baterías y sincronización al Gateway, por lo que se solicita la garantía por defecto de fábrica a SODYCOR. En buen estado se encuentran: LOM1, LOM4, LM1 y LM3. Adicionalmente, se refuerzan las bases adheridas al stand con soldadura, como medida de prevención en caso de algún deterioro del pegamento. Se lamina alambrón, barra y rollo, donde la cronología de los productos laminados se muestra en la tabla del Anexo K, allí se puede apreciar que algunos productos se repiten durante el periodo como la barra hormigón 8 mm, para la cual se tiene la menor velocidad de giro en los cilindros de trabajo (según Anexo D). El intervalo de medición escogido es de 15 minutos.

Es necesario señalar que desde el 1 de abril al 30 de septiembre AZA tiene restricción energética, por lo que está obligado a detener el proceso productivo de lunes a viernes entre las 18:00 y las 22:00. Estas 4 horas se utilizan para realizarle mantenimiento a los equipos.

Los gráficos obtenidos para el segundo periodo se muestran en Anexo L y Anexo M para mostrar en mayor detalle todos los días en que se realiza el monitoreo. La temperatura registrada durante el periodo se mantiene entre los 40 y los 18 °C, con un promedio de 33 °C en lado motor (LM) y de 29 °C en lado opuesto motor (LOM). Esto es congruente con lo señalado durante el primer periodo de monitoreo, donde el lado motor registra temperaturas más altas debido a la configuración del stand. Cabe agregar que, las temperaturas más bajas registradas ocurren en días de parada de mantenimiento (en marzo es una vez a la semana) y en las detenciones programadas por restricción energética (en abril).

En los gráficos de vibración en velocidad (Anexo L y Anexo M) se muestran por separado los sensores LM y LOM. Los valores se mantienen por debajo de los 7 [mm/s], salvo 4 mediciones puntuales debido a cobbles en la línea de laminación o por retiro de los sensores para limpieza durante las detenciones del equipo. Estos valores son notorios en las gráficas debido a que difieren del comportamiento normal registrado en las mediciones contiguas. De estos gráficos también es posible apreciar claramente las detenciones del proceso puesto que se ve como una llanura en 0 [mm/s] por varias mediciones consecutivas, como lo es el caso del día 7 de abril y las tardes de los días de semana de abril.

Respecto de los gráficos de vibración en aceleración (Anexo L y Anexo M) también se muestran por separado LM y LOM. Los valores RMS registrados se mantienen por debajo de los 0,4 [g RMS]. LOM4 y LM1 registran valores más altos que los otros 2 sensores. En particular, los valores de LOM4 duplican a los de LOM1.

Los incrementos en valores de velocidad entre los días 30 y 31 de marzo (laminando barra h. 10 mm) se deben a que la separación entre los cilindros de trabajo del stand se encuentra muy ajustada, es decir, se está reduciendo demasiado la sección transversal de la barra en este stand en vez de hacerlo más gradual entre los stands contiguos, esto provoca que aumente el torque (alarma en pantalla HMI Laminación Colina) por realizar un mayor esfuerzo, y por tanto, un incremento en los valores de vibración. Se informa esto a operador encargado de regulación y se compromete a regular M10V, M11H y M12V, con la finalidad de reducir el esfuerzo en M11H. Luego de esto, los valores de la vibración comienzan a decaer, lo cual es apreciable entre la tarde del día 31 de marzo y la tarde del 1 de abril.

El 4 de abril en la mañana se notifica al jefe de soporte operacional y a los mantenedores encargados del equipo que los valores van aumento en aceleración y en velocidad. Este aumento se ha registrado desde el 1 de abril en la noche hasta la mañana del 4 de abril aun cuando la producción sigue en Rollo h. 16 mm. Debido a esto, se da la orden de inspeccionar con mayor detalle durante la parada programada del mismo día, donde se revisa el stand encontrando los resortes de la regulación radial por lado motor superior y por lado opuesto motor inferior con un desgaste notorio. Sin embargo, solo se pueden cambiar en el taller de mantenimiento cuando el stand termine su ciclo de producción. Adicionalmente se encuentra que los pernos de amarre del stand no están bien apretados, por lo que se realiza un reapriete de estos, y que la torre (equipo antes del stand) se encuentra levemente suelta, por lo que se vuelve a tensar. Los ajustes realizados durante la parada programada del 4 de abril ayudan a que disminuyan los valores de vibración en aceleración y velocidad. Esto se puede apreciar en las gráficas del Anexo M.

Durante este periodo también se extrae el espectro de vibraciones para cada sensor de algunos días. Sin embargo, la plataforma tiene dos grandes limitantes. La primera es que este espectro no se crea solo, sino que debe ser creado manualmente. Y la segunda es que solo se crea un espectro del momento, lo que dificulta el análisis de las frecuencias cuando se laminan productos distintos en un solo día ya que se tienen frecuencias características distintas.

Por último, hay que señalar que debido al desgaste de los resortes ya mencionados, los valores tomados por LM1 y LOM4 se mantienen levemente más altos que los otros dos sensores para los días posteriores a los ajustes en el stand hasta el día de cierre de este análisis (12 de abril).

7. Estimación de valores críticos y formulación de avisos preventivos

En base a los gráficas y valores obtenidos por los 4 acelerómetros (LOM1, LMO4, LM1, LM3) sumado al análisis realizado en el Capítulo 6 de este trabajo, se realiza la estimación de los valores críticos y la formulación de los avisos preventivos. Este capítulo se divide en 3 partes, una para cada métrica.

Dodge Optify [17] permite extraer los valores de las 3 métricas de interés para el periodo señalado en un libro de Excel (.xlsx), donde cada pestaña del libro representa un sensor con sus datos.

7.1. Velocidad

Para la estimación de los valores (RMS) críticos y de avisos preventivos en velocidad, se toma como referencia la norma ISO 20816-3:2022 [13], la cual entrega una tabla con 4 zonas para el equipo:

- Zona A: La vibración de las máquinas recién puestas en servicio normalmente caería dentro de esta zona.
- Zona B: Las máquinas con vibración dentro de esta zona normalmente se consideran aceptables para una operación a largo plazo sin restricciones.
- Zona C: Las máquinas con vibración dentro de esta zona normalmente se consideran insatisfactorias para una operación continua a largo plazo. La máquina puede operar por un período limitado en esta condición hasta que surja una oportunidad adecuada para la acción correctiva.
- Zona D: Los valores de vibración dentro de esta zona se consideran lo suficientemente graves como para causar daños a la máquina.

Primero se procede a calcular el promedio de las mediciones de la velocidad por cada sensor para determinar el límite superior de la Zona A, ya que se debe considerar que el stand no es nuevo pero sí viene con una recuperación estructural en sus alojamientos y con montaje de rodamientos nuevos. A partir del análisis de los valores del Excel y de las gráficas de velocidad (Anexo J, Anexo L y Anexo M), es posible observar que en las paradas de mantenimiento y en las partidas en vacío los sensores generan mediciones de hasta 0,55 [mm/s], así como también valores extremos generados al tomar los sensores para limpiarlos. Sin embargo, estos valores no son de utilidad para calcular el funcionamiento normal del equipo. Por lo tanto, para el cálculo de la velocidad efectiva se realiza un filtro en el promedio considerando solo los valores mayores o iguales a 0,55 [mm/s] y eliminando los valores extremos ya mencionados.

En segundo lugar, se realizan pruebas de giro en vacío de las cajas M10V y M12V (cajas contiguas) para ver la influencia en los valores de vibración detectados por los acelerómetros cuando el stand M11H está detenido. Esto se realiza con la finalidad de agregar una tolerancia mayor en el cálculo del funcionamiento normal del stand debido a que los sensores perciben un grado de vibración que no es propio del equipo. Al realizar las pruebas se registraron valores de hasta 6 [mm/s] en velocidad y de hasta 0,02 [g RMS] en aceleración.

En tercer lugar, a la velocidad efectiva calculada para cada acelerómetro se le suma la tolerancia de 0,6 [mm/s]. Del resultado de esta operación se obtiene el límite superior de la Zona A (y límite inferior de Zona B) para cada sensor.

Luego de analizar la tabla de severidad de la norma ISO 20816-3:2022 [13], se observa que el incremento promedio para llegar al límite superior de la Zona B (y límite inferior de la Zona C) es en promedio de un 55%. Adicionalmente, el incremento para llegar al límite superior de la Zona C (y límite inferior de la Zona D) con respecto al límite inferior de la Zona C es de un 50%. Por lo tanto, se utilizan estos porcentajes de incremento para establecer las zonas B, C y D.

Tabla 7.1: Tabla de severidad de vibración para velocidad en [mm/s], valores RMS.

Tabla de severidad de vibración (Velocidad, mm/s RMS)								
Sensor	Zona A		Zona B		Zona C		Zona D	
LOM1	0	2,50	2,50	3,88	3,88	5,82	5,82	11
LOM4	0	2,18	2,18	3,38	3,38	5,07	5,07	11
LM1	0	3,15	3,15	4,89	4,89	7,33	7,33	11
LM3	0	2,49	2,49	3,86	3,86	5,79	5,79	11

La Tabla 7.1 muestra la tabla de severidad de vibración para velocidad obtenida a partir de los pasos previamente descritos. En esta se aprecian los rangos de valores estimados para cada acelerómetro en función de los datos obtenidos en los dos periodos de monitoreo. Adicionalmente se han incluido colores para facilitar la visualización y criticidad de cada zona.

De la Tabla 7.1 se puede observar que los sensores que permiten una mayor vibración son LOM1 y LM1, esto tiene congruencia debido a que ambos bastidores están enlazados bajo el mismo cilindro de trabajo, por lo que cualquier alteración proveniente de la torre o del calzo como tal, repercute en su par. Debido a que estos equipos no son nuevos, se espera que operen mayormente en la Zona B, donde los valores de los acelerómetros están entre los 2,18 [mm/s] y los 4,89 [mm/s].

Adicionalmente la norma ISO 20816-3:2022 [13] recomienda definir el valor de alerta temprana preventiva a 1,25 veces el límite superior de la Zona B.

7.2. Aceleración

En la estimación de los valores (RMS) críticos y de avisos preventivos para la aceleración se utiliza un formato similar al de la Tabla 7.1. Sin embargo, la norma ISO 20816-3:2022 no realiza recomendaciones en el campo de la aceleración [13]. Por tanto, se realiza un símil a la estimación de la velocidad.

En primer lugar se calcula el promedio de los datos de aceleración para cada acelerómetro. Al igual que para la aceleración, también se realiza un filtro de los valores más bajos de aceleración pero tomando como base el filtro de la velocidad. De esta manera se tiene la misma cantidad de datos para cada sensor en velocidad y en aceleración.

En segundo lugar, se debe considerar la tolerancia de las pruebas en vacío de las cajas M10V y M12V previamente mencionadas, las cuales generan valores de hasta 0,02 [g RMS] en los acelerómetros. Esta tolerancia se agrega a la aceleración efectiva, dando como resultado el límite superior de la Zona A (y límite inferior de Zona B) para cada sensor.

En tercer lugar se deben estimar los otros límites de las zonas. Para el cálculo de los límites inferiores de la Zona C y D, al límite inferior de cada sensor se le agrega el equivalente al promedio de dicho sensor.

Tabla 7.2: Tabla de severidad de vibración para aceleración en [g RMS], valores RMS.

Tabla de severidad de vibración (Aceleración, g RMS)								
Sensor	Zona A		Zona B		Zona C		Zona D	
LOM1	0	0,12	0,12	0,24	0,24	0,36	0,36	1
LOM4	0	0,25	0,25	0,50	0,50	0,75	0,75	1
LM1	0	0,18	0,18	0,36	0,36	0,54	0,54	1
LM3	0	0,13	0,13	0,26	0,26	0,39	0,39	1

La Tabla 7.2 muestra la tabla de severidad para aceleración en función de la aceleración de gravedad ($g = 9,81 [mm/s^2]$), en la cual se puede apreciar una mayor dispersión en el rango de valores para cada zona. La Zona B es la zona de funcionamiento normal del equipo, considerando que este no es nuevo, y en la cual el sensor LOM4 presenta el rango más elevado de valores, partiendo en los 0,25 [g RMS] y llegando a los 0,5 [g RMS]. Esto es consecuente con las alteraciones encontradas en los resortes del sistema de regulación radial del stand, provocando que el promedio de los datos se elevara más respecto a los otros sensores.

7.3. Temperatura

En la estimación de los valores críticos y de avisos preventivos para la temperatura, se decide utilizar solo 3 zonas de la norma ISO 20816-3:2022 [13]; Zona B, C y D.

Primero se calcula el promedio de los datos de temperatura para cada acelerómetro cuando el stand se encuentra en funcionamiento. Para ello es necesario aplicar el filtro por velocidad (solo valores sobre 0,55 [mm/s]) y tomar los valores de temperatura que cumplan con el criterio. De esta manera se calcula una temperatura efectiva, generando el límite inferior de la Zona B para cada sensor.

A continuación se fija el límite inferior de la Zona D en 50 [°C] en base al criterio explicado en el capítulo anterior en el análisis del primer periodo de monitoreo, es decir, un delta de 10 [°C] al interior de cada bastidor.

Tercero, se calcula el límite inferior de la Zona C para cada sensor como el promedio de los límites inferiores de la Zona B y D. Con todos estos cálculos se procede a elaborar la tabla de severidad de temperatura mostrada en la Tabla 7.3:

Tabla 7.3: Tabla de severidad de temperatura, [°C].

Tabla de severidad (Temperatura, °C)						
Sensor	Zona B		Zona C		Zona D	
LOM1	31	41	41	50	50	60
LOM4	29	40	40	50	50	60
LM1	30	40	40	50	50	60
LM3	33	42	42	50	50	60

Tal y como se puede observar en la Tabla 7.3, los rangos de temperatura entre los 4 sensores son similares, donde el lado motor tiene valores levemente más altos, lo cual es una situación normal que se explica en el capítulo anterior.

Hay que señalar que primero se estiman los valores de la Zona D debido a que se conoce la temperatura a la cual no debe llegar el rodamiento con la grasa (60 [°C]) para que esta no comience a degradarse. Sin embargo, este valor puede existir una diferencia mayor a 10 [°C] al interior del calzo dependiendo de la inercia de giro a los posibles problemas de desalineación o desgaste de rodillos al interior del rodamiento.

Luego de calcular los límites de cada zona. Se procede a definir los valores de alarma preventiva y críticos para cada sensor en cada métrica. Cabe agregar que, para el valor de alerta temprana preventiva se toma en consideración la recomendación de la norma ISO 20816-3:2022 [13]. Finalmente, se presentan los valores de interés para las 3 métricas (vibración en velocidad, en aceleración y temperatura) en la Tabla 7.4, donde se puede apreciar que los límites en velocidad son similares, a excepción del sensor LM1 que presenta la mayor holgura. Los límites en aceleración tienen una mayor dispersión, siendo el sensor LOM4 el que presenta los valores más permisivos.

Tabla 7.4: Resumen valores de alerta temprana preventiva y críticos para cada métrica del stand M11H.

Acelerómetro	Valor alerta temprana [mm/s]	Valor alerta crítica [mm/s]	Valor alerta temprana [g]	Valor alerta crítica [g]	Valor alerta temprana [°C]	Valor alerta crítica [°C]
LOM1	4,85	5,72	0,24	0,36	41	50
LOM4	4,23	5,07	0,5	0,75	40	50
LM1	6,11	7,33	0,36	0,54	40	50
LM3	4,83	5,75	0,26	0,39	42	50

Con los valores de interés definidos en cada métrica, se procede a formular los avisos de alerta temprana preventiva y de alerta crítica en la plataforma Dodge Optify [17]. Esto se realiza desde la ventana “Assets” mostrada en la Figura 6.8, en la sección "Last Measurement". Esto se aprecia en la Figura 7.1:

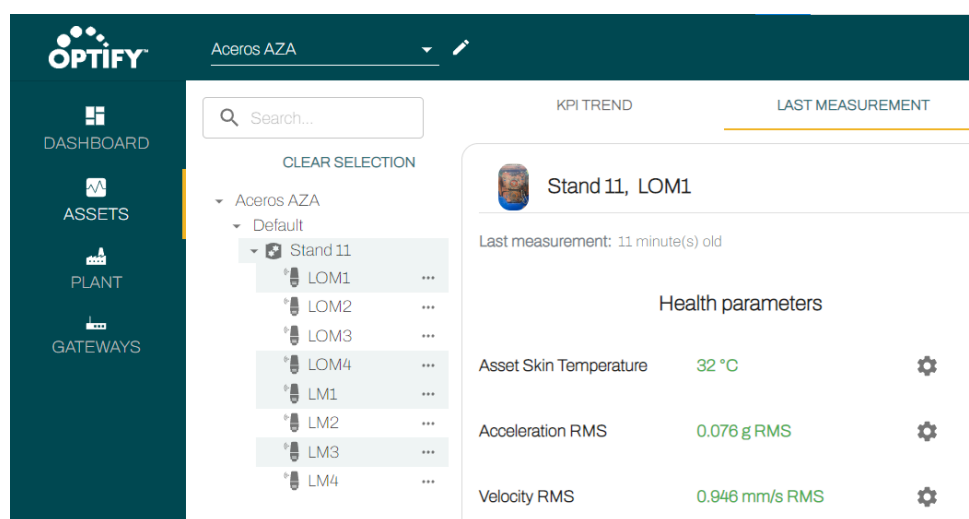


Figura 7.1: Ventana Assets, sección Last Measurement. [17]

Luego de seleccionar los 4 sensores utilizados, se pueden cambiar los valores de alerta al seccionar la rueda dentada de cada métrica. La Figura 7.2 muestra cómo se fijan los valores

de las alarmas para LOM1. Este mismo procedimiento se realiza para los otros 3 acelerómetros (LOM4, LM1 y LM3).

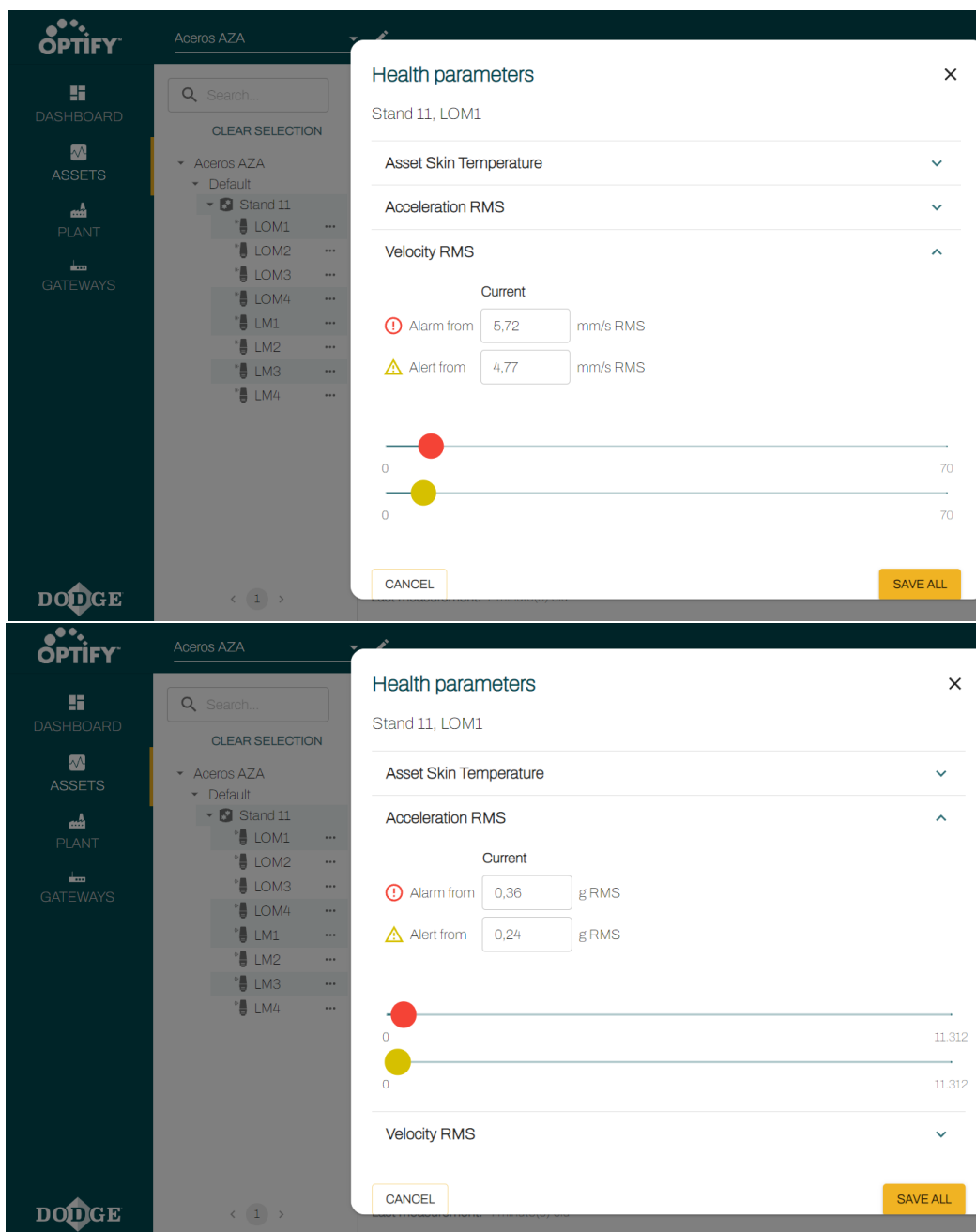


Figura 7.2: Ventana Assets, fijación de alertas para el sensor LOM1. [17]

Adicionalmente, la plataforma permite configurar una notificación por correo para las personas de interés que realicen el seguimiento del sistema y el mantenimiento de los equipos, tales como el jefe de mantenimiento, el jefe de soporte operacional, el mecánico de turno y los mantenedores de los stands. Se realiza una prueba con el sensor LOM4 bajando el valor de alarma para forzar una notificación, obteniendo el mensaje del correo que se muestra en la Figura 7.3. En este mensaje se puede apreciar el nombre del sensor qué levantó la alarma, el valor de medición y las 2 alarmas fijadas.

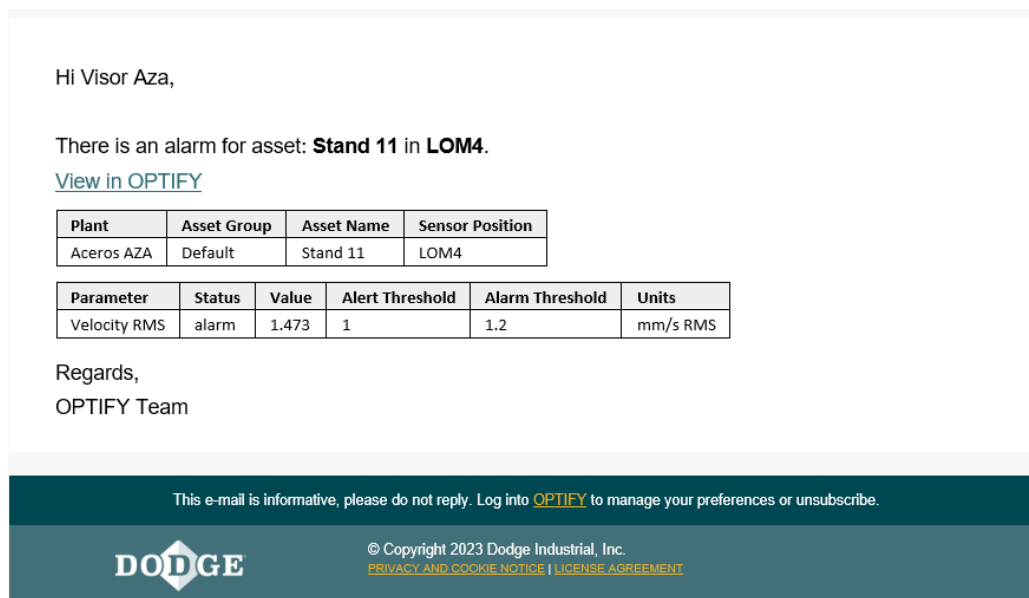


Figura 7.3: Prueba de notificación de alarmas por correo electrónico.

Como parte de la formulación de los avisos, también se realizan capacitaciones a operadores y mantenedores sobre las razones de la implementación del sistema de monitoreo en el stand M11H y sobre la visualización de los datos en la plataforma. Esto con la finalidad de informar sobre los futuros avisos que se generen y los planes de acción para solucionar la condición que está produciendo la alerta.

Es importante señalar que, estos valores RMS de las vibraciones entregan la primera línea de anticipación a las fallas del stand, por lo que deben monitorearse continuamente y analizar los incrementos graduales que se den en un mismo producto laminado (mismas rpm). Sin embargo, para encontrar con mayor detalle las causas de fallas o de alteraciones en los rodamientos (desalineación, problemas de lubricación, cargas elevadas, entre otras) se debe realizar un análisis de espectro. Para esto, se requiere obtener las frecuencias (tonos) características del rodamiento para cada producto que se lamina en el stand en base a las RPM de giro (Anexo D) y luego crear las tendencias (espectro de referencia). Este último es la base comparativa para los escenarios futuros, donde el incremento o disminución de los valores de vibraciones en las frecuencias características del rodamiento se utilizan para evaluar posibles problemas en base a las tablas de espectros que entrega la literatura.

Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones del trabajo realizado, el cual consiste en la determinación de un sistema de medición de vibraciones capaz de predecir fallas en un stand de laminación en caliente. Se muestran los resultados del cumplimiento de los 5 objetivos específicos planteados en este trabajo.

De acuerdo con el primer objetivo específico, en el capítulo **Marco teórico** se identificaron diferentes herramientas para la detección de fallas en la industria de laminación, determinando que la que proporciona la información más importante acerca del funcionamiento interno de la máquina o equipo es el análisis periódico de vibraciones, permitiendo detectar una gran cantidad de problemas en los equipos, como estructurales, la prevención de fallas en rodamientos por desalineación, lubricación deficiente, entre otros. Si bien la termografía infrarroja sirve para detectar problemas en rodamientos (cuando estos identifican un aumento de temperatura), la mayor aplicación es en sistemas eléctricos, electrónicos y electromecánicos, alejándose del foco de análisis del equipo, el cual es principalmente mecánico. Por último, el equipo (stand de laminación) no dispone de sistemas con aceite en su operación, por lo que se descarta como herramienta de detección.

En base al segundo objetivo específico, se realizó un levantamiento de las fallas ocurridas en el Laminador Colina entre los años 2019 y 2022 a través de AZA - Nivel 2. En base al análisis mostrado en la sección de **Análisis de fallas**, se determinó que un 54% de las interrupciones de los stands (mostradas en la Figura 4.5) se debían a problemas varios, como calibración y ajustes deficientes, fallas en el sistema de lubricación de varios componentes y quiebres de cilindros. Sin embargo, también se determinó que el 46% restante se debía a fallas en los rodamientos de estos stands, los cuales son considerados repuestos críticos debido a la importancia en el proceso. Además, mediante un diagrama de Pareto, se determinó que el stand M11H era el que presentaba la mayor duración de interrupciones por fallas en los rodamientos. Por lo tanto, el sistema de medición de vibraciones se focalizó en prevenir las fallas en estos rodamientos. Por otra parte, en la sección **Impacto económico de las fallas**, se estimó que el costo total por no producción y cobbles era cercana a los 287.000 USD en el periodo 2019-2022. Por lo tanto, se tomó la decisión de implementar un plan piloto de medición de vibraciones en el stand M11H con la finalidad de reducir el costo asociado a las interrupciones y disminuir los costos de mantenimiento de este equipo.

Según el análisis de las condición operacional del stand M11H sumado a las propuestas vistas en el capítulo **Caja M11H y propuestas de medición y monitoreo de vibraciones** mediante una matriz multicriterio se determinó que el plan piloto debía realizarse con la propuesta de SODYCOR, cuyo Precio Total Ajustado era de 8.497 USD. Este plan consistía en la medición de vibraciones en RMS mediante acelerómetros triaxiales inalámbricos WIFI. Por otra parte, en el capítulo **Puesta en marcha del sistema, selección de métricas y análisis de valores obtenidos** se mostró el padrón creado con la ubicación de los sensores en el montaje del stand.

Una vez instalados los acelerómetros en el stand M11H se procedió a realizar dos periodos de monitoreo con la finalidad de recolectar datos de temperatura y vibración RMS en velocidad y aceleración durante la producción de barra, rollo y alambrón de diferentes diámetros, y así poder estimar los valores de avisos preventivos y críticos por cada sensor. El capítulo **Estimación de valores críticos y formulación de avisos preventivos**, mostró el cálculo para determinar las diferentes zonas del equipo en cada una de las métricas de interés, donde fue posible identificar diferencias entre los valores de cada sensor. Estas diferencias se deben a la variación de la condición de operación de cada bastidor del stand. Sin embargo, se observó que el porcentaje de variación entre las alarmas de los sensores no superaba el 26% (LM1 con LMO1 o LM3 con LOM4), lo que indica que un valor de alarma es cercano al valor de alarma del rodamiento par.

Adicionalmente, se concluye que los valores de alarmas (RMS) obtenidos son la primera línea para la anticipación de las fallas en los stands, por lo cual deben ser monitoreados continuamente en busca de patrones e incrementos graduales cuando se está laminando en las mismas rpm. Una segunda línea de anticipación para encontrar las causas de las fallas debe realizarse con un análisis de espectro calculando las 4 frecuencias características del rodamiento RBC4-0103 F para cada velocidad de giro de la operación. De esta manera es posible crear espectros de referencia y así poder analizar las variaciones en la amplitud de estas 4 frecuencias sin depender de los gráficos de vibraciones en el dominio del tiempo, ya que existen tablas de espectros que indican el problema que se está presentando.

El procedimiento de la formulación de los avisos de alerta temprana preventiva y crítica se detalló en el capítulo **Estimación de valores críticos y formulación de avisos preventivos**. Adicionalmente se realizaron capacitaciones a operadores y mantenedores sobre las razones de la implementación del sistema de monitoreo y sobre el uso de la plataforma para la visualización de los datos. La finalidad de esta formulación y de las capacitaciones es incluir al personal en el proceso de mejora y de reducción de detenciones en el equipo al intervenir los equipos antes de que fallen.

Finalmente, con los resultados obtenidos se proponen algunas recomendaciones para trabajos futuros basados en esta memoria. Primero se recomienda realizar un análisis de espectro para cada producto laminado en la caja M11H y así poder detectar con mayor detalle las causas de las fallas en los rodamientos. Para ello se debe elaborar un espectro de referencia para cada velocidad de giro y calcular las 4 frecuencias características del rodamiento. En base a esta información, es posible determinar las variaciones en las frecuencias características a lo largo del tiempo, permitiendo detectar problemas oportunamente, los cuales pueden ser catalogados mediante la utilización de las tablas de espectro. Por último, se recomienda extender el sistema de monitoreo a las cajas M7H, M9H y D4V debido a que estas acumulan más del 50% de las interrupciones asociadas a fallas en rodamientos. Esta implementación permitirá predecir estas fallas y disminuir sustancialmente los costos por detenciones no planificadas y por mantenimiento.

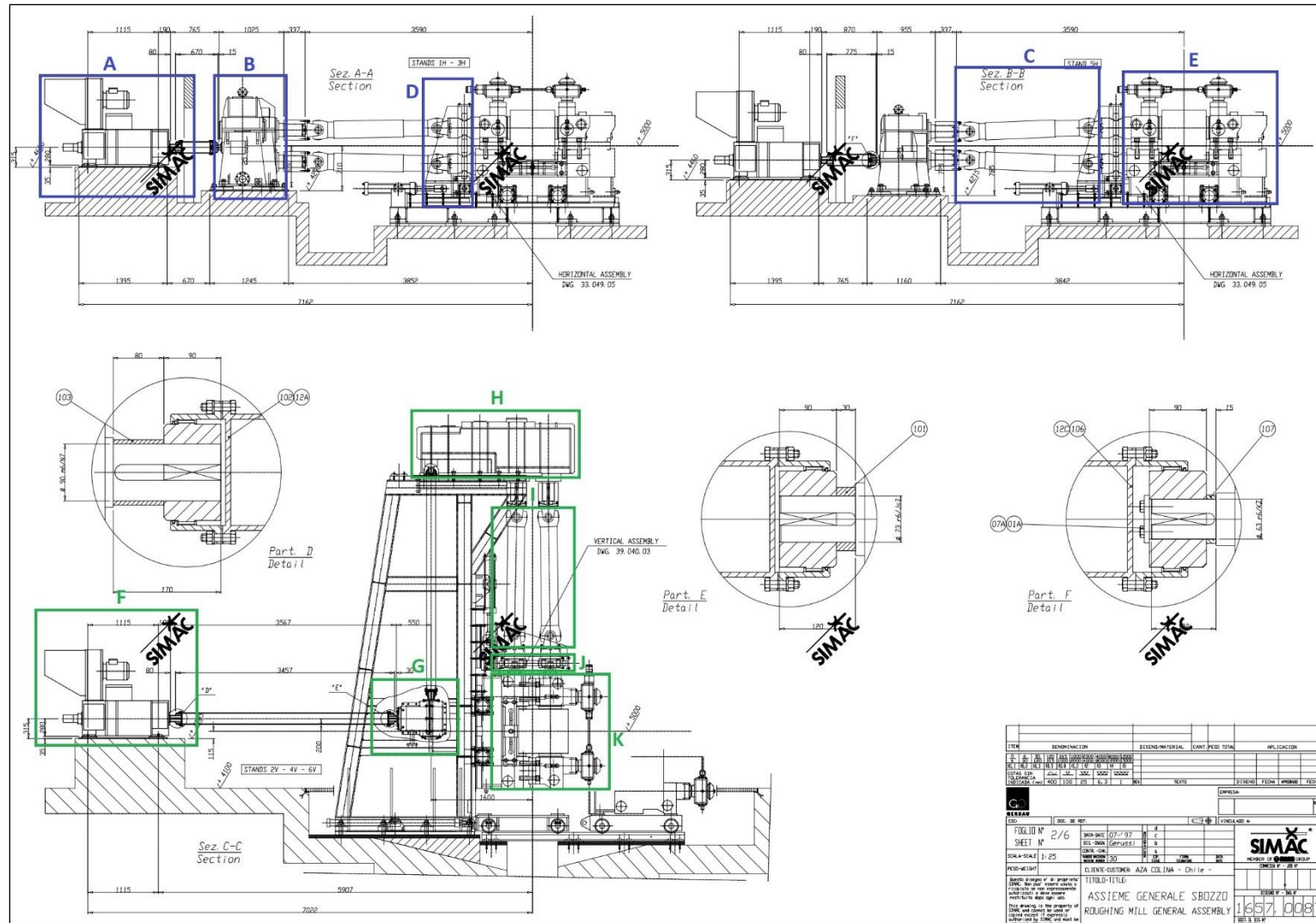
Bibliografía

- [1] AZA, “AZA Acero Sostenible”, 2022. <https://www.aza.cl/> (accedido 5 de septiembre de 2022).
- [2] G. White, “Examen de Prácticas de Mantenimiento”, en *Introducción al Análisis de Vibraciones*, Woburn, MA, 2010, pp. 8–15. Accedido: 12 de septiembre de 2022. [En línea]. Disponible en: www.AzimaDLI.com
- [3] INN, “Instituto Nacional de Normalización. NCh204:2020”, 30 de marzo de 2020. <https://ecommerce.inn.cl/nch204202076537> (accedido 12 de septiembre de 2022).
- [4] INN, “Instituto Nacional de Normalización. NCh3334:2014”, 28 de abril de 2014. <https://ecommerce.inn.cl/nch3334201445949> (accedido 12 de septiembre de 2022).
- [5] A. Pistarelli, “Mantenimiento y Disponibilidad”, en *Manual de mantenimiento: Ingeniería, gestión y organización*, 1ª ed. Buenos Aires: Alejandro Pistarelli, 2010, pp. 13–67.
- [6] A. Pistarelli, *Manual de mantenimiento: Ingeniería, gestión y organización*, 1ª ed. Buenos Aires: Alejandro Pistarelli, 2010.
- [7] G. White, *Introducción al Análisis de Vibraciones*. Woburn, MA, 2010. [En línea]. Disponible en: www.AzimaDLI.com
- [8] N. E. Verdezoto Álvarez, “Propuesta de elaboración de un plan de mantenimiento predictivo, basado en la criticidad de los equipos del proceso de laminación en caliente para la Empresa Andec S.A.”, Tesis, Universidad de Guayaquil, 2015. Accedido: 26 de septiembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/8852>
- [9] W. X. Vásquez Roldan, “Mejora de la productividad mediante la elaboración de un plan de mantenimiento predictivo a una planta de laminación en caliente”, Tesis, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2015. Accedido: 27 de septiembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/30422>
- [10] ISO, “ISO 4406:2021 Hydraulic fluid power — Fluids — Method for coding the level of contamination by solid particles”, enero de 2021. <https://www.iso.org/standard/79716.html>
- [11] ISO, “ISO 281:2007 Rolling bearings — Dynamic load ratings and rating life”, febrero de 2007. <https://www.iso.org/standard/38102.html>

- [12] ISO, “ISO/TS 16281:2008 Rolling bearings — Methods for calculating the modified reference rating life for universally loaded bearings”, junio de 2008. <https://www.iso.org/standard/40621.html>
- [13] ISO, “ISO 20816-3:2022 Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration — Part 3: Industrial machinery with a power rating above 15 kW and operating speeds between 120 r/min and 30 000 r/min”, octubre de 2022. <https://www.iso.org/standard/78311.html>
- [14] AB SKF, “RBC4-0103 F - Rodamientos de rodillos cilíndricos | SKF”. <https://www.skf.com/uy/productinfo/productid-RBC4-0103%20F>
- [15] AB SKF, “SKF Bearing Select”. <https://www.skfbearingsselect.com/>
- [16] Exxon Mobil Corporation, “Mobilgrease HTR, HTM, HTS y HTF”, 2003. <https://www.mobil.com/es-mx/grease/pds/gl-xx-mobilgrease-ht>
- [17] Dodge Industrial, “Dodge Optify”. <https://dodgeoptify.com/>
- [18] Dodge Industrial, “Products - Dodge Industrial”. <https://dodgeindustrial.com/products/>
- [19] Ferretería Amunátegui S.A., “FERAM tu equipo de apoyo”. https://www.feram.cl/productos/adhesivos-y-sellantes/adhesivos-estructural/kit_adhesivo_aa330_250_mlprimer_7387_128gr-695.3350.html

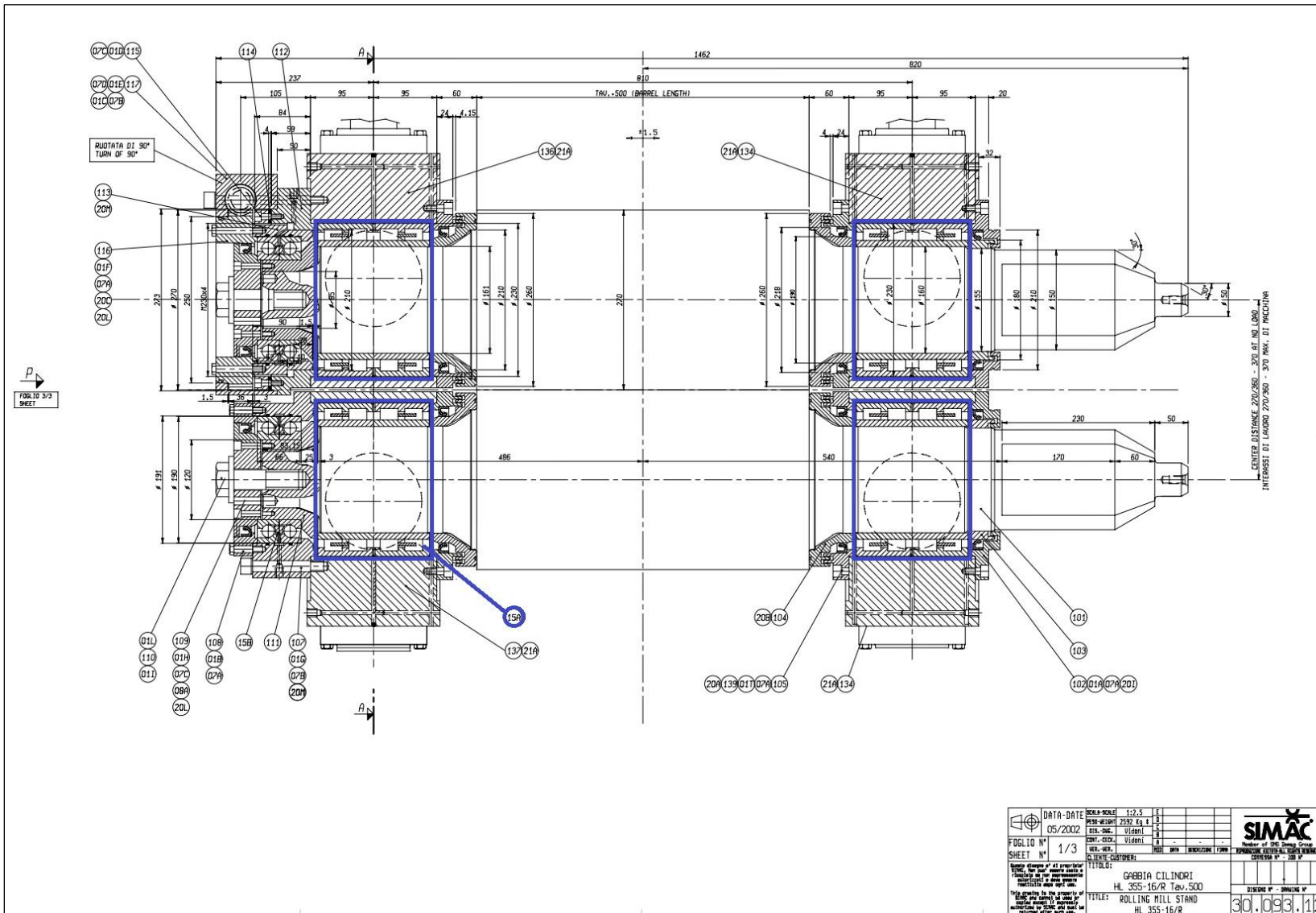
Anexos

Sistema matriz stands de Laminación Colina

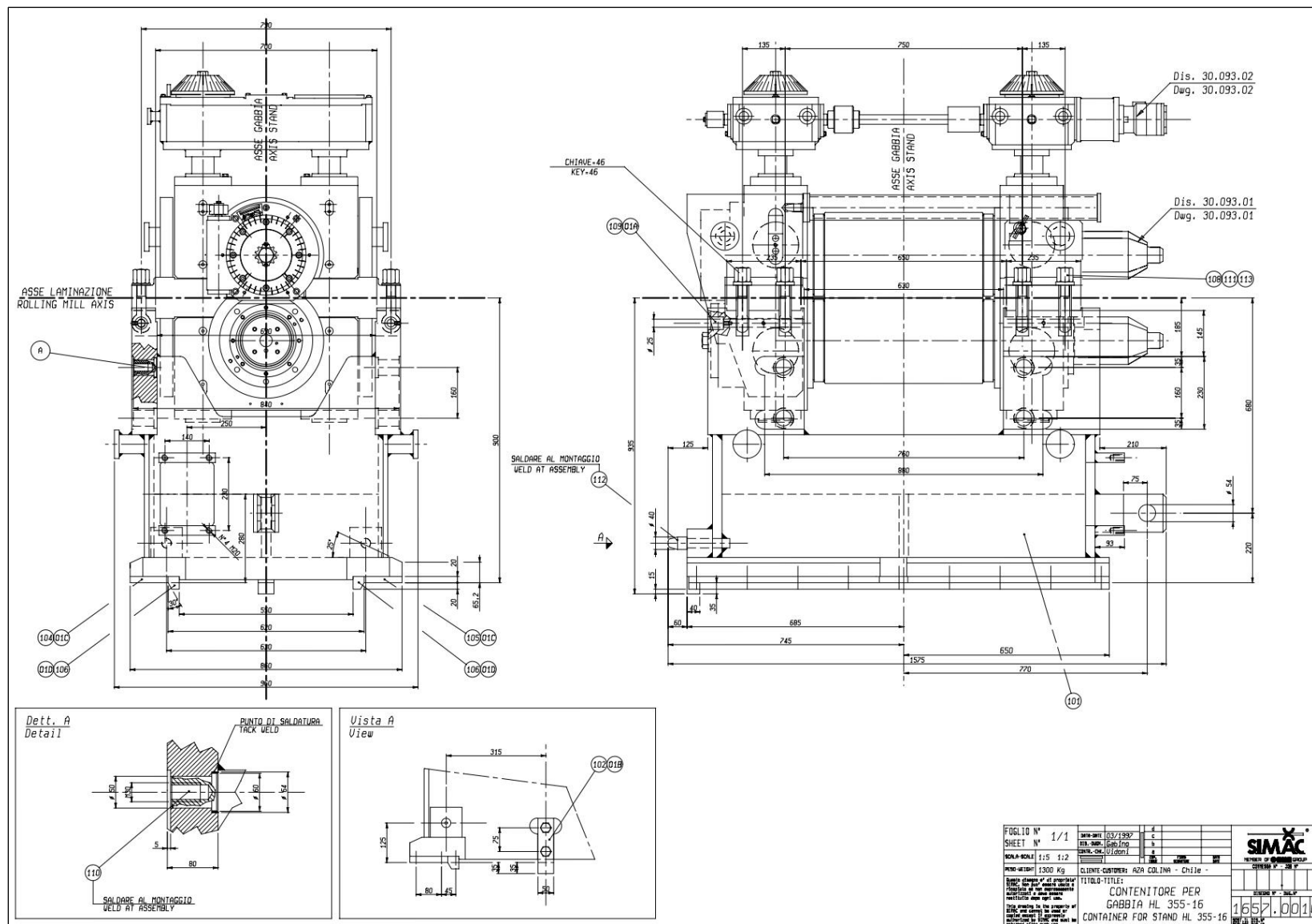


Anexo A: Plano del sistema motriz principal de los stands de laminación horizontales y verticales, AZA Colina.

Componentes stand de laminación de tren medio



Anexo B: Plano del bastidor con cilindros de trabajo del stand HL 355, Laminación Colina.



Anexo C: Plano montaje base con bastidor de stand HL 355, Laminación Colina.

Velocidades de giro de cardanes en base receta HMI

Anexo D: Tabla con velocidades de giro de cardanes M11H en función del producto laminado.

Caja de laminación	Producto laminado	Reducción caja reductora i [-]	Velocidad del motor en RPM	Velocidad del cardán en RPM
Caja M11H	Alambrón liso 5,5 mm	0,267380	1080,4	288,9
	Alambrón liso 6 mm	0,267380	1109,7	296,7
	Alambrón liso 6,5 mm	0,267380	1142,6	305,5
	Alambrón liso 7,5 mm	0,267380	1219,9	326,2
	Alambrón liso 9,5 mm	0,267380	1238,9	331,3
	Alambrón liso 12 mm	0,267380	1291,9	345,4
	Barra hormigón 8 mm	0,267380	617,7	165,2
	Barra hormigón 10 mm	0,267380	941,4	251,7
	Barra hormigón 12 mm	0,267380	1201,1	321,2
	Barra hormigón 16 mm	0,267380	1233,1	329,7
	Barra hormigón 18 mm	0,267380	1294,2	346,0
	Barra hormigón 22 mm	0,267380	1336,9	357,5
	Barra hormigón 25 mm	0,267380	1106,1	295,7
	Rollo hormigón 6 mm	0,267380	1009,8	270,0
	Rollo hormigón 8 mm	0,267380	1013,0	270,9
	Rollo hormigón 10 mm	0,267380	1017,3	272,0
	Rollo hormigón 12 mm	0,267380	1262,5	337,6
	Rollo hormigón 16 mm	0,267380	1164,2	311,3
	Barra hormigón 7/8" (22,2 mm)	0,267380	1371,6	366,7
	Barra hormigón 6/8" (19,1 mm)	0,267380	1245,8	333,1

Sensor de vibraciones acelerómetro SKF

CMSS 2200 / CMSS 2200-M8

Industrial accelerometer, side exit

The CMSS 2200 accelerometer is a good multi-purpose sensor. The sensor is most commonly deployed in the following industries:

- Power Generation (Fossil, Nuclear, Hydro)
- Pulp and Paper
- Mineral Processing
- Food and Beverage

Features

- For use with all SKF on-line systems, protection systems and the portable data collection instruments
- Rugged, economical and all around general purpose sensor
- 100 mV/g sensitivity to optimize use in multiple applications
- Exceptional bias voltage (BV) stability at elevated temperatures
- Designed for exceptional low noise level over a wide temperature range
- Meets stringent CE, EMC requirements
- Captive mounting bolts (1/4-28, M6 x 1,00 or M8 x 1,25) provided
- Corrosion resistant and hermetically sealed for installation in high humidity areas
- Reverse polarity wiring protection

Recommended connector/cable assembly

- CMSS 932 series

Specifications

Specifications conform to ISA-RP-37.2 (1-64) and are typical values referenced at 24 °C (75 °F), 24 V DC supply, 4 mA constant current and 100 Hz.

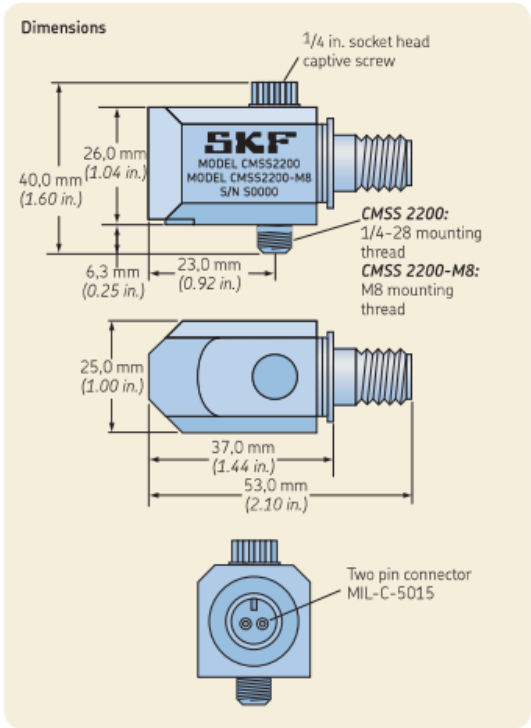
Dynamic

- Sensitivity: 100 mV/g
- Sensitivity precision: ±5% at 24 °C (75 °F)
- Acceleration range: 80 g peak
- Amplitude linearity: 1%
- Frequency range:
 - ±10%: 1,0 to 5 000 Hz
 - ±3 dB: 0,7 to 10 000 Hz
- Resonance frequency, mounted, minimum: 22 kHz
- Transverse sensitivity: ≤ 5% of axial
- Temperature response: See graph

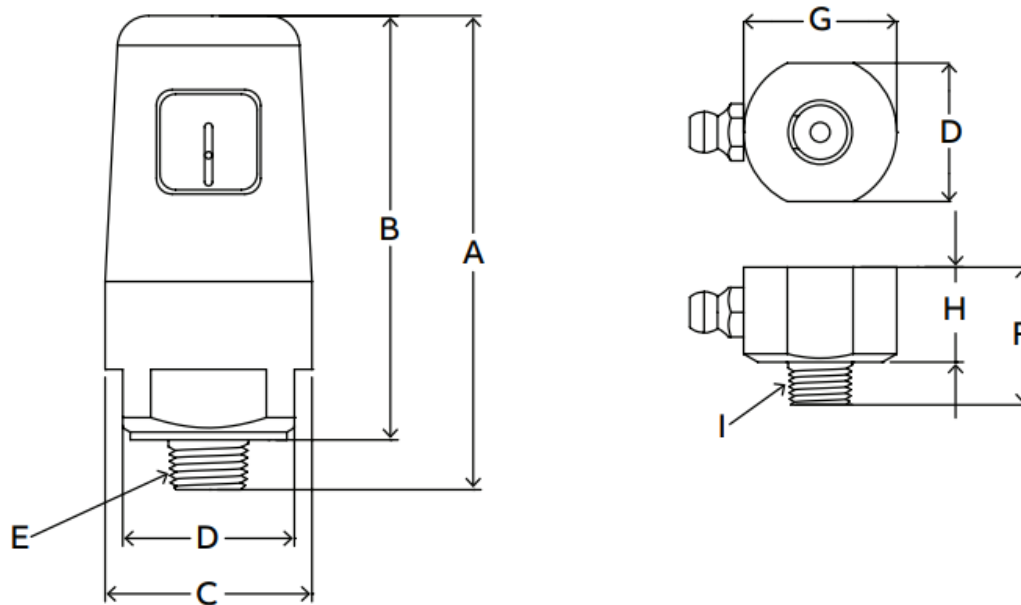


Electrical

- Power requirements:
 - Voltage source: 18 to 30 V DC
 - Constant current diode: 2 to 10 mA, recommended 4 mA
- Electrical noise:
 - 2,0 Hz: 20 µg/√Hz
- Output impedance: < 100 Ω
- Bias output voltage: 12 V DC
- Grounding: Case isolated, internally shielded



Sensor de vibraciones acelerómetro DODGE



Smart Sensor dimensions

Part number	Description	Dimensions				
		A	B	C	D	E
750000	Smart Sensor for mounted bearings	2.38 (60.5)	2.13 (54.14)	1.04 (26.4)	0.88 (22)	1/8"-27 PTF-SAE

Part number	Description	Dimensions			
		F	G	H	I
749904	1/8" - 27 pipe thread adapter	0.88 (22)	0.97 (24.61)	0.61 (15.37)	1/8" - 27 PTF-SAE
749905	1/4" - 28 straight thread adapter				1/4" - 28 UNF-SAE

Installation information*

Description	Torque (lb.-in.)
Smart Sensor/ sensor adapter	7 to 12

*Using torque wrench

NOTE: Installation and maintenance instructions for Dodge products available at www.dodgeindustrial.com

Anexo F: Dimensiones e instalación sensor inteligente DODGE, propuesta SODYCOR.

Certification(s)	
EX (hazardous areas)	II 1 GD
	I M1
	Ex ia I Ma
	Ex ia IIC 150°C (T3) Ga
	Ex ia IIIC T146°C Da
	CI I, Zn 0, AEx ia IIC T150°C Ga
	CI I, Div.1, Grps ABCD
	CI II, Zn 20, AEx ia IIIC T146°C Da
	CI II, Div 1, Grps EFG
IP (Ingress Protection) class	
IP 66	
Temperature	
Measurement range	-22°F... +185°F (-30°C ... +85°C)
Resolution	1°C
Accuracy	±2°C
Vibration	
Amplitude range	+/- 2g
Frequency range	1 Hz ~ 1.6 kHz
Detection type	RMS
Wireless communication	
Network standard	Bluetooth Low Energy
Radio standard	IEEE 802.15.1C
Frequency	2402-2480 MHz
Range (nominal)	>26ft (8m) @ line-of-sight
Environmental	
Storage temperature	+14°F ... +86°F (-10°C ... +30°C)
Operating temperature	-22°F... +185°F (-30°C ... +85°C)
Power	
Battery type	3.6V LiSOCl ₂ cells
Lithium thionyl chloride cell battery is not replaceable	
Estimated battery life*	-22°F...+122°F (-30°C ... +50°C)
	2+ years with measurement taken once per hour and data collected once per day by mobile device.
	+123°F...+185°F (+51°C ... +85°C)
1+ year with measurement taken once per hour and data collected once per day by mobile device.	
Physical	
Weight	60 grams
Case material	Stainless steel/thermoplastic/silicone
Dimension	60.5mm x 26.4mm
Mounting	Male 1/8" - 27 PTF SAE

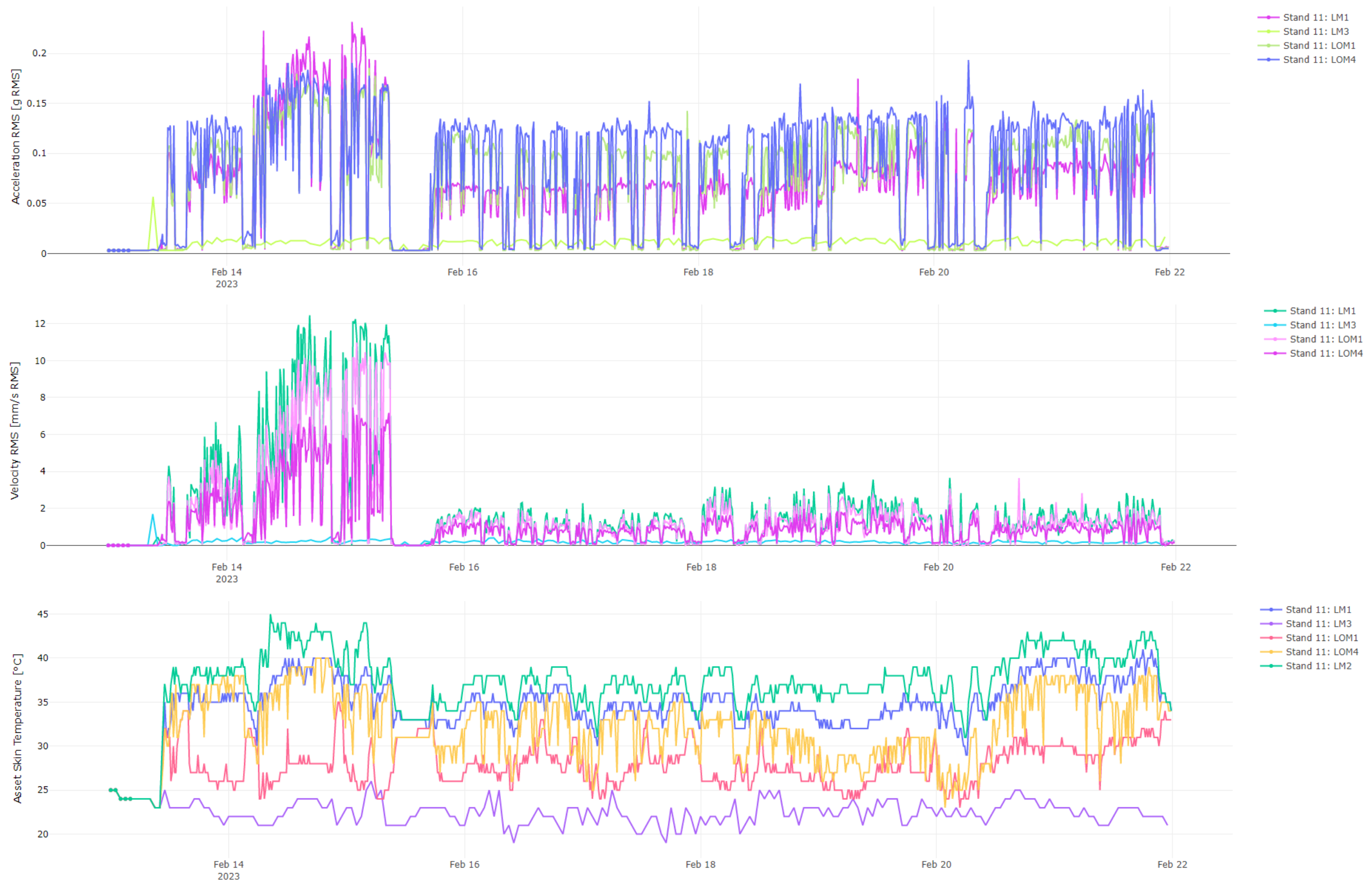
Anexo G: Datos técnicos sensor inteligente DODGE, propuesta SODYCOR.

Monitoreo de vibraciones primer periodo de monitoreo

El primer periodo de monitoreo se lleva a cabo desde el 13/02/2023 al 21/02/2023.

Anexo I: Tabla con los productos laminados en el primer periodo de monitoreo, Laminación Colina.

Producto laminado	Fecha inicio real	Fecha fin real	Tiempo [horas]
Barra h. 1"	13/02/2023 11:09	14/02/2023 03:10	16
Barra h. 7/8"	14/02/2023 05:37	14/02/2023 23:11	17,6
Barra h. 18 mm	14/02/2023 23:11	15/02/2023 04:59	5,8
Barra h. 6/8"	15/02/2023 04:59	15/02/2023 17:33	12,6
Alambrón 5,5 mm	15/02/2023 17:33	17/02/2023 23:38	54,1
Alambrón 6 mm	17/02/2023 23:38	18/02/2023 06:28	6,8
Alambrón 6,5 mm	18/02/2023 08:10	18/02/2023 11:20	3,2
Alambrón 8 mm	18/02/2023 12:19	18/02/2023 23:05	10,8
Alambrón 7,5 mm	18/02/2023 23:52	19/02/2023 02:25	2,6
Alambrón 9,5 mm	19/02/2023 02:53	19/02/2023 16:58	14,1
Alambrón 10 mm	19/02/2023 18:15	19/02/2023 22:37	4,4
Alambrón 11,5 mm	19/02/2023 23:53	20/02/2023 02:57	3,1
Alambrón 12 mm	20/02/2023 03:55	20/02/2023 08:12	4,3
Barra h. 10 mm	20/02/2023 10:53	21/02/2023 22:20	38,3



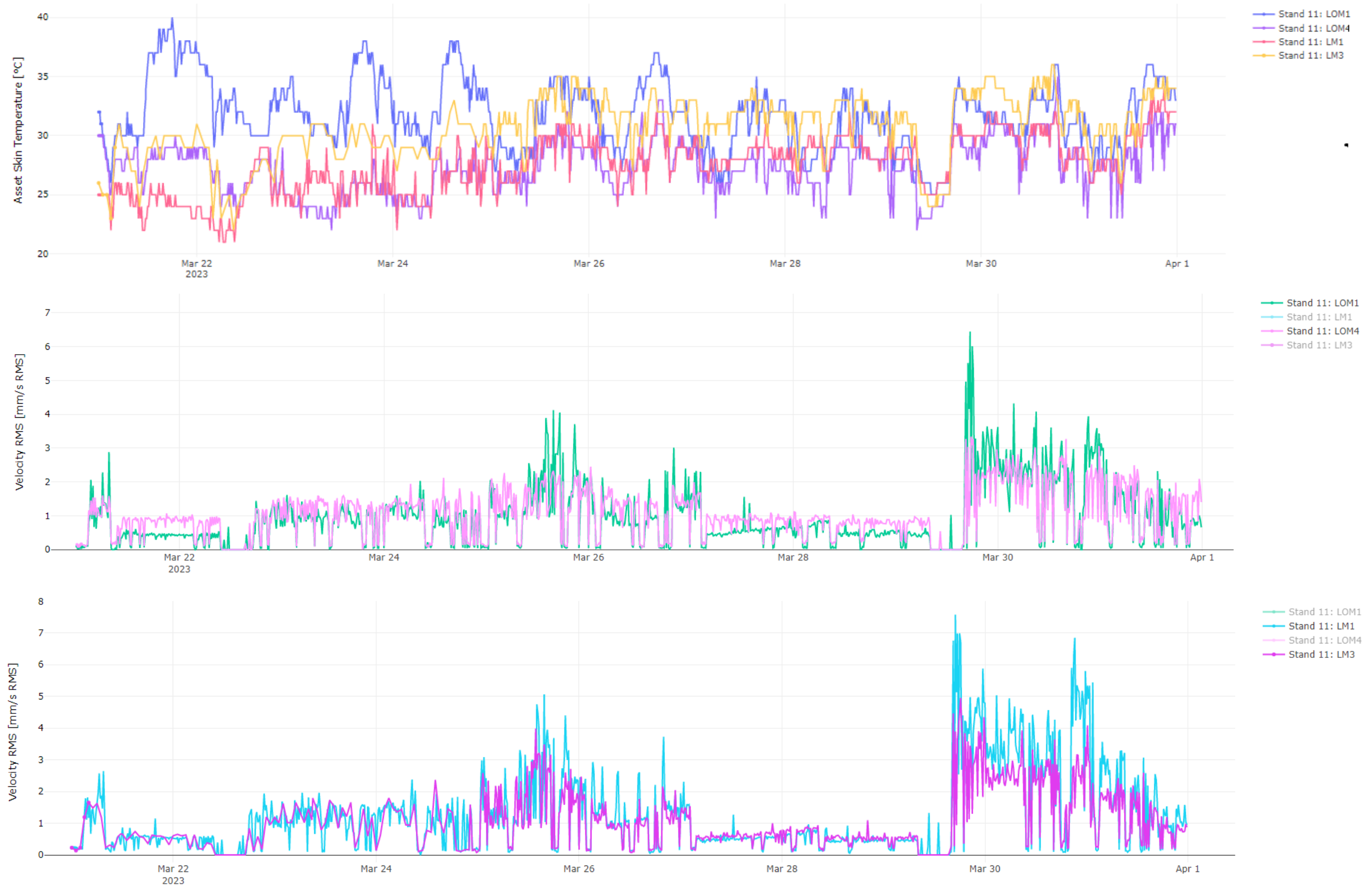
Anexo J: Gráficos de temperatura, vibración RMS en aceleración y velocidad del stand M11H en el primer periodo de monitoreo. [17]

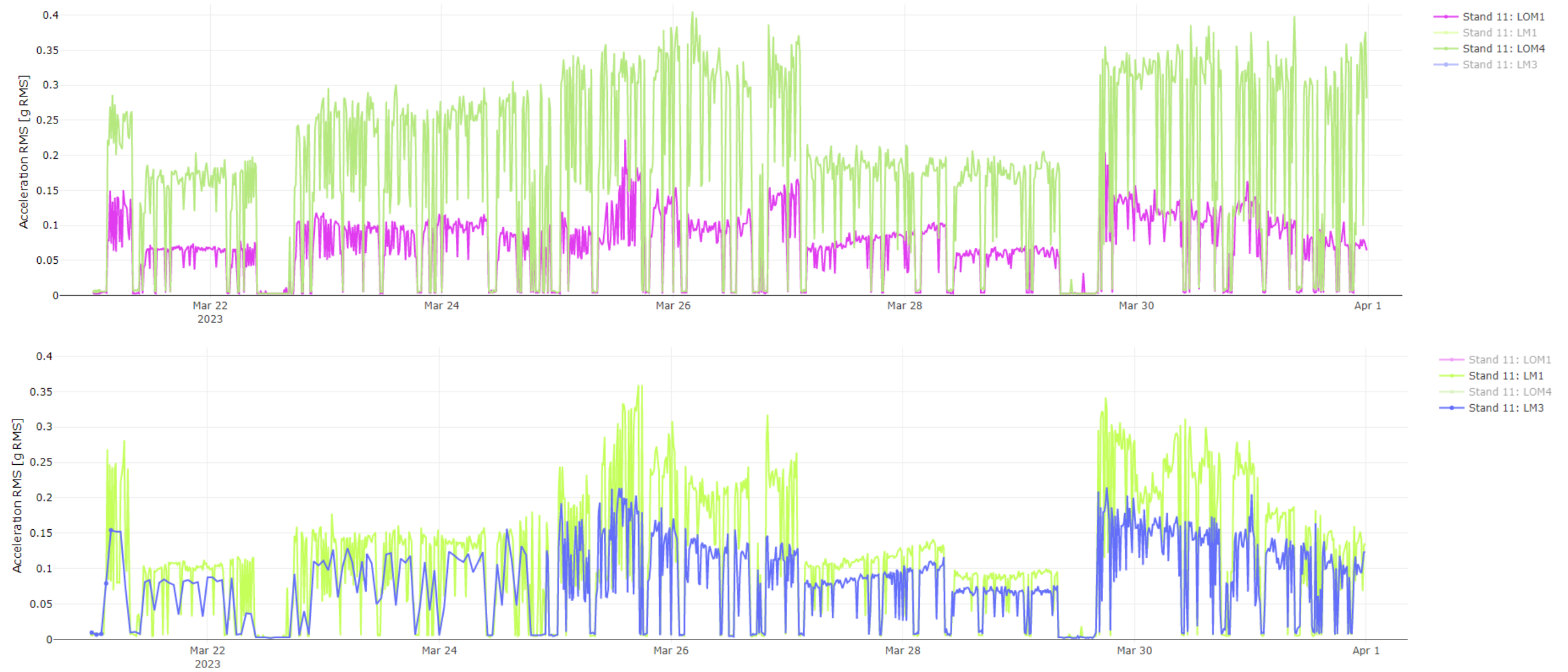
Monitoreo de vibraciones segundo periodo de monitoreo

El segundo periodo de monitoreo se lleva a cabo desde el 21/03/2023 al 12/04/2023.

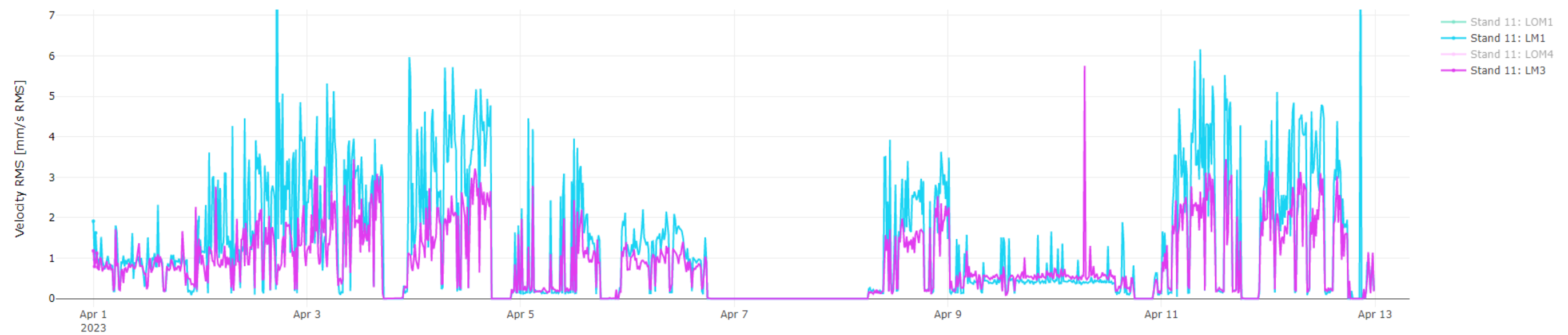
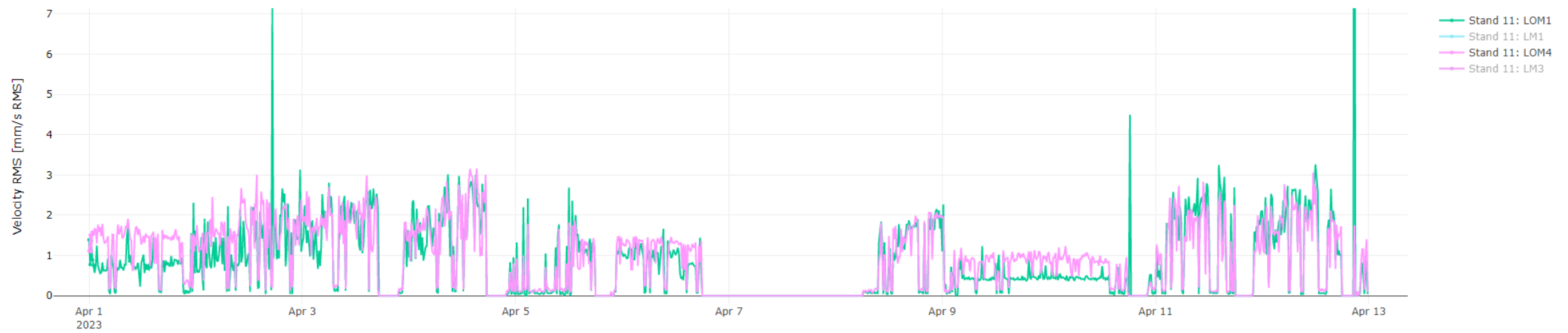
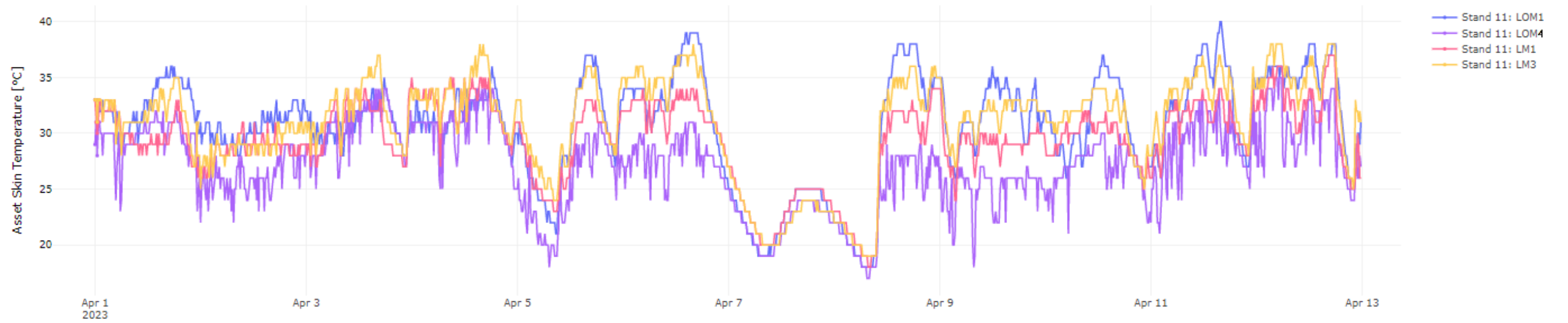
Anexo K: Tabla con los productos laminados en el segundo periodo de monitoreo, Laminación Colina.

Producto laminado	Fecha inicio real	Fecha fin real	Tiempo [horas]
Barra h. 8 mm	21/03/2023 09:33	22/03/2023 17:37	31,8
Alambrón 5,5 mm	22/03/2023 17:37	24/03/2023 09:34	39,6
Alambrón 6 mm	24/03/2023 11:29	24/03/2023 23:52	12,4
Alambrón 6,5 mm	25/03/2023 00:42	25/03/2023 07:12	6,5
Alambrón 8 mm	25/03/2023 08:36	25/03/2023 18:57	10,4
Alambrón 9,5 mm	25/03/2023 18:57	26/03/2023 16:12	21,3
Alambrón 11,5 mm	26/03/2023 18:08	27/03/2023 02:27	8,3
Barra h. 8 mm	27/03/2023 03:43	29/03/2023 08:56	53,2
Barra h. 12 mm	29/03/2023 16:17	30/03/2023 17:45	25,5
Barra h. 10 mm	30/03/2023 18:50	01/04/2023 21:08	50,3
Rollo h. 16 mm	01/04/2023 22:53	04/04/2023 17:23	66,0
Alambrón 5,5 mm	04/04/2023 22:53	06/04/2023 18:26	43,6
Rollo h. 6 mm	08/04/2023 09:56	09/04/2023 00:17	14,3
Barra h. 8 mm	09/04/2023 01:39	12/04/2023 23:59	77,6





Anexo L: Gráficos de temperatura, vibración RMS en velocidad y aceleración del stand M11H en el segundo periodo de monitoreo, parte 1. [17]





Anexo M: Gráficos de temperatura, vibración RMS en aceleración y velocidad del stand M11H en el segundo periodo de monitoreo, parte 2. [17]