



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



**DISEÑO PLATAFORMA DE VIGILANCIA EN LÍNEA DE EQUIPOS
ROTATORIOS EN BASE A PI SYSTEM**

POR

Matías Nicolás Navarrete Navarrete

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:
Félix Alberto Leaman Weiffenbach

Julio 2023
Concepción (Chile)

*A mi madre, porque mis logros son también los tuyos,
eternas gracias por tu amor y apoyo incondicional.*

Resumen

El mantenimiento industrial enfrenta desafíos complejos en la industria moderna, debido a la gestión de maquinaria sofisticada, la generación masiva de datos y la automatización continua de los procesos. La adopción de tecnologías de la Industria 4.0 ha demostrado resultados positivos en este campo, siendo indispensable su implementación en la industria nacional. Destaca la herramienta PI System, con funcionalidades y beneficios para abordar eficientemente estos desafíos.

En este trabajo, se aborda el tema del mantenimiento industrial en la Compañía Siderúrgica Huachipato con el propósito de proponer un diseño de interfaz gráfica de usuario (*graphical user interface*, GUI), que satisfaga los requisitos para un eficiente mantenimiento basado en la condición (*condition-based maintenance*, CBM) de los activos críticos operacionales de la mano de PI System.

El punto de partida consiste en definir los activos críticos. Mediante el uso de técnicas de confiabilidad adaptadas por la empresa, se identifican claramente los activos críticos operativos que serán objeto de estudio. Luego, se desarrolla un plan de trabajo que establece pautas generales para la incorporación de estos activos, centrándose en las variables de vibración y en las variables generales de proceso. En este sentido, se realiza un análisis exhaustivo del comportamiento pasado del activo, incluyendo el establecimiento de tendencias que resultan fundamentales para establecer niveles y márgenes de seguridad de operación.

Una vez establecidas las pautas generales, se aplica el análisis a un activo específico en la zona de la Acería de la planta, el Ventilador KKK. Utilizando los datos recopilados durante el proceso, se caracteriza el comportamiento de este activo mediante herramientas de análisis de datos.

Se presta especial atención al análisis de la severidad vibratoria y a los modos de falla comunes asociados al activo. Se establecen niveles de alarma y de parada para los diferentes sensores del activo, siguiendo las directrices establecidas por la normativa ISO. Además del análisis histórico de modos de fallas y la documentación correspondiente, se examina el comportamiento espectral de estos eventos, y se desarrolla un algoritmo de aprendizaje automático (*machine learning*, ML) basado en árboles de decisión para predecir fallas comunes.

Finalmente, se diseña una interfaz que integra una gran cantidad de información relevante sobre el activo, incluyendo datos básicos y operativos, que muestran clara y visualmente el estado actual basándose en los límites establecidos previamente. Este diseño será de utilidad para que los ingenieros de planta lo implementen, permitiendo la vinculación con la información necesaria de software externos.

Palabras clave: Industria 4.0, Activo crítico, CBM, PI System, GUI.

Abstract

Industrial maintenance faces complex challenges in modern industry, due to the management of sophisticated machinery, massive data generation and continuous automation of processes. The adoption of Industry 4.0 technologies has shown positive results in this field, being indispensable its implementation in the national industry. The PI System tool stands out, with functionalities and benefits to efficiently address these challenges.

In this paper, the topic of industrial maintenance at Compañía Siderúrgica Huachipato is addressed with the purpose of proposing a graphical user interface (GUI) design that satisfies the requirements for an efficient condition-based maintenance (CBM) of the critical operational assets of the PI System.

The starting point is to define the critical assets. Using reliability techniques adapted by the company, the critical operational assets to be studied are clearly identified. Then, a work plan is developed that establishes general guidelines for the incorporation of these assets, focusing on vibration variables and general process variables. In this sense, an exhaustive analysis of the past behavior of the asset is carried out, including the establishment of trends that are fundamental to establish levels and margins of operational safety.

Once the general guidelines have been established, the analysis is applied to a specific asset in the Steel Mill area of the plant, the KKK Fan. Using the data collected during the process, the behavior of this asset is characterized using data analysis tools.

Special attention is given to the analysis of the vibrational severity and common failure modes associated with the asset. Alarm and shutdown levels are established for the different sensors of the asset, following the guidelines established by ISO standards. In addition to the historical analysis of failure modes and the corresponding documentation, the spectral behavior of these events is examined, and a machine learning (ML) algorithm based on decision trees is developed to predict common failures.

Finally, an interface is designed that integrates a large amount of relevant information about the asset, including basic and operational data, which clearly and visually displays the current status based on previously established boundaries. This design will be useful for plant engineers to implement, allowing the linkage with the necessary information from external software.

Keywords: Industry 4.0, Critical Asset, CBM, PI System, GUI.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos	iii
Lista de Tablas	v
Lista de Figuras	vi
Glosario	vii
CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1 Compañía Siderúrgica Huachipato	2
1.2 Problemática y necesidad	3
1.3 Estado actual y perspectivas futuras	4
1.4 Objetivo General.....	5
1.5 Objetivos Específicos	5
1.6 Hipótesis	6
1.7 Metodología.....	6
CAPÍTULO 2: Estado del arte	8
CAPÍTULO 3: Estrategia de Mantenimiento Predictivo	9
3.1 Análisis de vibraciones	10
3.1.1 Técnicas de diagnóstico de fallas.....	10
3.1.2 Análisis de severidad vibratoria.....	12
3.2 Plataforma PI System y PdM.....	13
CAPÍTULO 4: Definición de equipos críticos	16
4.1 Evaluación PG-72-72001	16
4.2 Activos críticos actuales	20
CAPÍTULO 5: Metodología de integración.....	21
5.1 Diseño plataforma.....	22
5.2 Activos críticos de estudio.....	23
CAPÍTULO 6: Ventilador KKK	24
6.1 Información de operación	24
6.2 Antecedentes y modos de falla	26
6.3 Monitoreo del activo.....	27
6.4 Análisis variables generales.....	28
6.5 Análisis de severidad vibratoria	32
6.6 Análisis espectral	35
6.6.1 Desbalanceamiento	36

6.6.2 Desalineamiento.....	37
6.6.3 Solturas	38
6.7 Apartado diagnóstico de falla	39
CAPÍTULO 7: Diseño GUI.....	43
7.1 Información general.....	44
7.2 Mediciones de tendencias.....	45
7.3 Tiempo de soplado.....	46
7.4 Mantenición	46
7.5 Variables generales de proceso.....	47
7.6 Ventana de espectro.....	48
7.7 Apartado diagnóstico.....	49
CAPÍTULO 8: Conclusiones y trabajos futuros	50
Bibliografía.....	52
Anexo A1: Carta Gantt del proyecto.....	54
Anexo A2: Listado de activos críticos	55
Anexo A3: Límites espectrales	57
Anexo A4: Tabla resumen ventiladores centrífugos.....	58
Anexo A5: Códigos de programación.....	59

Lista de Tablas

Tabla 1: Claves análisis vibratorio y parámetros asociados. (Fuente: [12].)	10
Tabla 2: Puntuación de frecuencia de falla. (Fuente: Empresa Siderúrgica Huachipato.).....	17
Tabla 3: Puntuación de consecuencia de falla (Fuente: Empresa Siderúrgica Huachipato.)	18
Tabla 4: Puntuación de consecuencia. (Fuente: Empresa Siderúrgica Huachipato.)	19
Tabla 5: Definición nivel de criticidad. (Fuente: Empresa Siderúrgica Huachipato.)	19
Tabla 6: Información básica Ventilador KKK. (Fuente: [18].).....	25
Tabla 7: Información de operación Ventilador KKK. (Fuente [18])	25
Tabla 8: Resumen histórico fallas y síntomas. (Fuente: Elaboración propia.).....	27
Tabla 9: Descripción soplados. (Fuente: Elaboración propia.)	28
Tabla 10: Máquinas tipo I norma ISO 10816-3. (Fuente: [21].).....	33
Tabla 11: Valores de alarma y parada. (Fuente: Elaboración propia.).....	34
Tabla 12: Cambio componente 1X desbalanceamiento. (Fuente: Elaboración propia.).....	36
Tabla 13: Cambio componentes desalineamiento. (Fuente: Elaboración propia.).....	37
Tabla 14: Cambio componentes soldaduras. (Fuente: Elaboración propia.)	38
Tabla 15: Información entrenamiento modelo. (Fuente: Elaboración propia.).....	40
Tabla 16: Hiperparámetros árbol de decisión. (Fuente: Elaboración propia.)	40

Lista de Figuras

Figura 1: Vista general planta. (Fuente: Empresa Siderúrgica Huachipato.)	2
Figura 2: Panorama de monitoreo. (Fuente: Elaboración propia.)	5
Figura 3: Metodología de desarrollo proyecto. (Fuente: Elaboración propia.)	7
Figura 4: Espectro vibratorio característico desbalanceamiento. (Fuente: [12].)	11
Figura 5: Ejemplo relación entre fases vibración vertical y horizontal. (Fuente: [12].)	12
Figura 6: PI System análisis predictivo. (Fuente: [14])	14
Figura 7: Flujo proceso evaluación criticidad activos. (Fuente: Empresa Siderúrgica Huachipato.)	16
Figura 8: Activos críticos dentro de la planta. (Fuente: Elaboración propia.)	20
Figura 9: Diagrama de flujo integración de activos. (Fuente: Elaboración propia.)	21
Figura 10: Jerarquía plataforma de monitoreo. (Fuente: Elaboración propia.)	23
Figura 11: Conjunto Ventilador KKK. (Fuente: Empresa Siderúrgica Huachipato.)	24
Figura 12: Forma operación Ventilador KKK, cinco horas totales. (Fuente: Elaboración propia.)	26
Figura 13: Intervenciones históricas Ventilador KKK. (Fuente: Elaboración propia.)	26
Figura 14: Diagrama del conjunto. (Fuente: Empresa Siderúrgica Huachipato.)	28
Figura 15: (a) Distribución tiempos soplado, (b) Acumulación tiempos soplado. (Fuente: Elaboración propia.)	29
Figura 16: Temperaturas en descansos. (Fuente: Elaboración propia.)	30
Figura 17: (a) Flujo de O ₂ , (b) Variación flujo O ₂ . (Fuente: Elaboración propia.)	31
Figura 18: (a) Extracto tendencia RMS medición 4-H. (Fuente: Elaboración propia.)	33
Figura 19: Espectro sano ventilador. (Fuente: Elaboración propia.)	35
Figura 20: Espectro sano motor. (Fuente: Elaboración propia.)	35
Figura 21: Espectro desbalanceamiento. (Fuente: Elaboración propia.)	36
Figura 22: Espectro desalineamiento. (Fuente: Elaboración propia.)	37
Figura 23: Espectro soldaduras. (Fuente: Elaboración propia.)	38
Figura 24: Algoritmo árbol de decisión. (Fuente: Elaboración propia.)	41
Figura 25: Diseño GUI Ventilador KKK. (Fuente: Elaboración propia.)	43
Figura 26: Recuadro de información general. (Fuente: Elaboración propia.)	44
Figura 27: Diagrama conjunto GUI. (Fuente: Elaboración propia.)	44
Figura 28: Recuadro tendencias. (Fuente: Elaboración propia.)	45
Figura 29: Tiempos de soplado. (Fuente: Elaboración propia.)	46
Figura 30: Tiempos de mantenimiento. (Fuente: Elaboración propia.)	46
Figura 31: Variables generales proceso. (Fuente: Elaboración propia.)	47
Figura 32: Mediciones de temperaturas GUI. (Fuente: Elaboración propia.)	47
Figura 33: Ventana de espectro ilustrativa. (Fuente: Elaboración propia.)	48
Figura 34: Apartado diagnóstico GUI. (Fuente: Elaboración propia.)	49

Glosario

KPI	:	Indicadores clave de rendimiento
PM	:	Mantenimiento preventivo
PdM	:	Mantenimiento predictivo
GUI	:	Interfaz gráfica de usuario
CBM	:	Mantenimiento basado en la condición
CM	:	Mantenimiento correctivo
SAP	:	Sistemas aplicaciones y productos
MES	:	Sistema de Ejecución de Manufactura
RMS	:	Valor cuadrático medio
STD	:	Desviación estándar
CSH	:	Compañía Siderúrgica Huachipato
HH	:	Horas-Hombre
MTTR	:	Tiempo medio para reparar
ML	:	Aprendizaje automático

CAPÍTULO 1: Introducción

En las últimas décadas, el mundo y la industria han experimentado cambios tecnológicos significativos. En el campo del mantenimiento industrial, ha habido una fuerte incorporación de herramientas de interconexión digital, lo que ha llevado a la transición hacia la Industria 4.0. El objetivo de este cuarto grado de madurez es diseñar procesos más inteligentes y eficientes al disponer de información relevante en el momento y tiempo indicado para que el usuario pueda tomar decisiones de manera más adecuada [1].

Las empresas dependen cada vez más de plataformas tecnológicas que les ayudan a racionalizar su producción y aumentar su productividad. Estas plataformas ayudan a evitar tiempos de inactividad de las máquinas y la consiguiente pérdida de facturación. Los activos físicos en entornos industriales están equipados con sensores inteligentes que los conectan a la red y crean un sistema ciberfísico de máquinas interconectadas. Estos sensores recopilan y transmiten valiosos datos sobre indicadores clave de rendimiento.

Hoy en día, la visualización de datos no se limita a una oficina de control, sino que se puede acceder desde diversos dispositivos, como tabletas y smartphones a través de la nube. La información es transversal y no está confinada solo a algunos expertos. Desde la perspectiva de la Industria 4.0, la supervisión de los indicadores clave de rendimiento (*key performance indicators*, KPI) permite la detección precoz de averías, lo que es crucial para pasar de un programa de mantenimiento preventivo (*preventive maintenance*, PM) basado en el tiempo a una estrategia de mantenimiento predictivo (*predictive maintenance*, PdM) basado en la condición de la maquinaria. Esta estrategia reduce el tiempo de inactividad inesperado de la máquina y la sustitución innecesaria de piezas sanas de la máquina, lo que puede reducir el tiempo necesario para planificar el mantenimiento en un 20-50%, aumentar el tiempo de actividad de los equipos en un 10-20% y disminuir los costes generales de mantenimiento en un 5-10% [2].

En este contexto, para llevar a cabo el manejo general de la información relacionada con la condición de maquinaria, es necesario utilizar un software robusto de utilidad, dentro de la industria mundial uno de los de mayor difusión corresponde a PI System. El Sistema PI recoge, almacena y gestiona los datos de la planta o proceso. La disposición de datos tiene utilidad nula propiamente tal, es el correcto uso de estos los que entrega un potencial beneficio como mejora dentro del proceso asociado, por lo tanto, la creación de una plataforma congruente que disponga la información relevante del proceso resulta crucial en la toma de decisiones de mantenimiento.

1.1 Compañía Siderúrgica Huachipato

El proyecto presentado es realizado en la Compañía Siderúrgica Huachipato (CSH) en el marco de monitoreo de activos físicos dentro de la planta. El presente capítulo tiene por objetivo describir el panorama general, con una presentación breve de la empresa y su negocio, así como la problemática específica a abordar.

La Compañía Siderúrgica Huachipato S.A. - es una empresa del Grupo CAP y la principal industria productora de acero en Chile. La siderúrgica está ubicada en Talcahuano, a orillas de la Bahía de San Vicente, y se ha destacado por su positivo impacto productivo, económico y social en la Región del Biobío, se presenta una vista de la planta en la Figura 1.

Desde 1950, la compañía ha sido líder en el negocio del acero en Chile. Actualmente, cuenta con una capacidad de producción de 800.000 toneladas de acero líquido al año y es la única empresa integrada de acero en el país. Genera su negocio desde la elaboración de materias primas básicas hasta la entrega de productos finales de alta pureza y calidad [3].



Figura 1: Vista general planta. (Fuente: Empresa Siderúrgica Huachipato.)

A través de una variada gama de productos de reconocida calidad, la Siderúrgica Huachipato contribuye al crecimiento del país. La compañía abastece al mercado nacional e internacional en los sectores de: minería, industria metalmecánica y la construcción con una orientación principalmente a productos largos de acero. Se distinguen los siguientes sectores de negocio:

- **Sector minero:** Barras gruesas destinadas a la fabricación de medios de molienda, utilizados en la industria minera del cobre y del hierro, y pernos helicoidales para la fortificación de túneles.
- **Sector industria metalúrgica y automotriz:** A través de productos derivados del alambro, asociados a la fabricación de cables, resortes, alambres para viñas, electrodos, etc. También los productos derivados de barras gruesas lisas para fabricación de tornillería, pernos de gran dimensión, ejes, piezas y partes industriales.
- **Sector edificación y obras:** Venta de barras para refuerzo de hormigón utilizadas en la construcción de obras civiles de infraestructura y en edificación. Además, abastece a otros mercados consumidores de minerales y subproductos.

1.2 Problemática y necesidad

Debido a la necesidad de modernizar sistemas de monitoreo, con un foco en la disponibilidad en línea y la presentación estandarizada concisa y eficiente de información a nivel general de la planta, la empresa ha implementado diversas herramientas de monitoreo de condiciones de procesos en línea, esto principalmente de la mano de los softwares PI Vision y PI System, con un gran éxito asociado.

Definido el contexto, la empresa requiere modernizar sistemas de monitoreo asociados a PdM específicamente relacionados al análisis mediante vibraciones, estableciendo un portal que responda a este propósito. Actualmente para la gestión de datos de vibraciones la empresa dispone de sensores en maquinaria crítica cuyos datos son principalmente analizados por empresa externa REAM Reliability Engineers. Las visitas de la empresa solo son algunas veces por mes (1-2 en promedio), ellos entregan reportes con similar frecuencia en caso de detectar fallos incipientes, una de las deficiencias detectadas en este proceso corresponde a la parcialidad de la información entregada, mucha información del análisis queda en etapas intermedias, obteniendo principalmente un informe con detalles de diagnóstico final. Así mismo se ejecutan informes diarios de monitoreo básico, en el que se comparte un informe Excel, el cual es hecho manualmente con estados de severidad presentado en forma de casillas con colores.

En línea con el marco de progresión en técnicas de monitoreo de la empresa surge la necesidad de integrar una plataforma global relacionada al análisis de activos por vibraciones en base a PI System, brindando acceso a distintos tipos de usuarios de manera multiplataforma. Dando acceso rápido a información general del funcionamiento del equipo, así como información del estado del mismo en base a técnicas de PdM, siendo de ayuda para el analista.

1.3 Estado actual y perspectivas futuras

Como se mencionó anteriormente, la información asociada al análisis predictivo de equipos es realizada por empresa REAM. En cuanto a la adquisición de datos, aproximadamente la mitad se realiza in situ y mitad en forma en línea. Los reportes entregados son generales y el proceso de evaluación analítico queda en un plano intermedio, perdiéndose mucho valor en este trabajo.

La información en tiempo real disponible de vibraciones actualmente es limitada y solo accesible para cuatro ingenieros que cuentan con cuentas en el software SKF @ptitude Analyst en su versión de 2013. No obstante, la compañía está actualmente trabajando en mejorar y migrar su software y base de datos, específicamente actualizando a la última versión de SKF @ptitude Observer.

Según muestra se muestra en la Figura 3, la información de vibración de un activo crítico es obtenida mediante sensores y dependiendo del tipo de monitoreo y hardware instalado se tienen dos casos. En la sección izquierda de la figura, los datos son tomados desde un PLC, esta información es asociada a monitoreo general de baja frecuencia de muestreo mediante valores RMS de activos.

Por otra parte, se tiene el lado derecho de la figura, el cuál posee mayores ventajas y es el foco de este proyecto. Los datos son obtenidos son almacenados y compartidos mediante el dispositivo SKF IMx Multilog el cual posee algunas de las siguientes prestaciones [4]:

- Mediciones simultáneas en todos los canales y capacidad de configuración para mediciones reales síncronas.
- Memoria interna de 4 GB para capturas de datos y eventos
- Modo independiente o compatible con SKF @ptitude Observer
- Capacidad de detección de bloqueos (máquinas herramienta)
- Almacenamiento en memoria internad no volátil cuando se corta la comunicación.

En la fase de inicio del proyecto la información obtenida desde IMx Multilog es enviada al software SKF @ptitude Analyst donde el experto realiza análisis para evaluar condición. En el contexto del proyecto la empresa migrará la utilización del software SKF @ptitude Analyst a SKF @ptitude Observer. La migración permitirá el manejo de señales desde Observer para luego ser enviadas a PI System permitiendo la visualización del monitoreo continuo de los indicadores escogidos, además de la lectura de variables de proceso por PI System en forma remota.

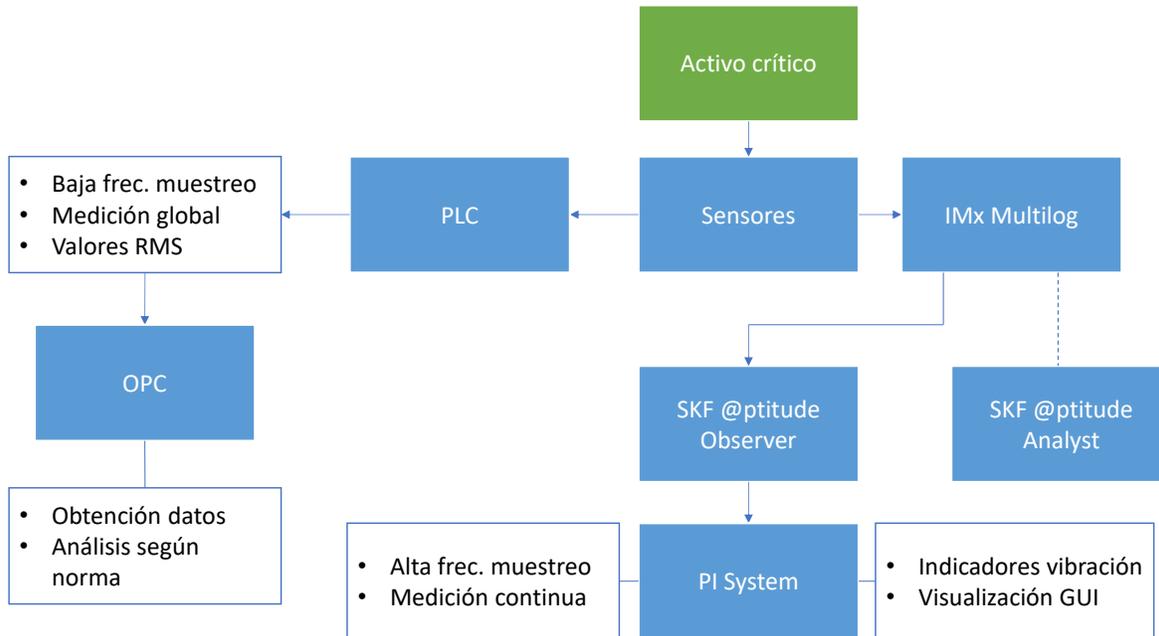


Figura 2: Panorama de monitoreo. (Fuente: Elaboración propia.)

1.4 Objetivo General

Diseñar una plataforma de vigilancia en línea de equipos rotatorios, que permita ser una ayuda en la determinación de tiempos de mantenimiento, utilizando indicadores clave de vibraciones y proceso en función de información en línea entregada por PI System.

1.5 Objetivos Específicos

- Determinar equipos críticos a monitorear.
- Construcción baseline equipos tratados.
- Investigar modos de falla de equipos rotatorios especificados.
- Determinar variables críticas asociadas a condición de maquinaria.
- Diseño y disposición plataforma enfocada al usuario (GUI).

1.6 Hipótesis

La incorporación de una plataforma de vigilancia en línea de equipos rotatorios en la planta, utilizando indicadores relevantes de vibraciones, permitirá a los expertos encargados realizar una mejor gestión de tiempos de mantenimiento asociados a la maquinaria crítica.

1.7 Metodología

El plan de trabajo asociado al proyecto considera cuatro grandes etapas de desarrollo, enfocadas a dar respuesta a los objetivos específicos definidos con anterioridad. Estas etapas corresponden a: levantamiento de información preliminar, determinación de maquinaria crítica, definición metodología integración y finalmente el diseño de GUI. La representación general del plan de desarrollo se muestra en la Figura 3, en verde las etapas principales del proyecto.

En un comienzo se debe levantar información para describir el estado del arte respecto al tema, el enfoque principal es la familiarización con el desarrollo actual de la problemática. Se debe establecer la relevancia de este enfoque en la gestión de activos en la industria contemporánea, la utilidad y beneficios que brinda en el proceso y negocio de producción de acero.

Luego, resulta imperante definir los equipos críticos a estudiar, esto fundamentado con algún procedimiento acorde, como puede ser un análisis de mantenimiento basado en confiabilidad. Los equipos rotatorios definidos en esta sección deben ser caracterizados, describiendo información esencial de los mismos, como puede ser: tipo de activo, ubicación, código identificador, área mecánica asociada, entre otros que se consideren de importancia.

La tercera etapa de desarrollo tiene por fin definir un flujo de trabajo que establezca las directrices para integrar equipos rotatorios a la plataforma de PI System, esto dada la necesidad de hacer el trabajo escalable y reproducible para nuevas máquinas. Aquí se describe el procedimiento de integración, desde la determinación de criticidad del activo pasando por la definición de umbrales vibratorios según normativa, hasta la conceptualización de la GUI. Se debe detallar cada paso, asociando también los distintos departamentos de la empresa involucrados de donde se requiera información para el desarrollo.

Finalmente, se debe conceptualizar una GUI para al menos un equipo en específico, según el equipo se deben definir parámetros esenciales a ser desplegados, que sean clave en la determinación del estado del activo y permitan tomar decisiones asociadas al mantenimiento del mismo. Se debe realizar el diseño de disposición de la interfaz, con un enfoque en el usuario y en la toma de decisiones en función de una lectura clara y precisa. Distintos departamentos de la planta tendrán acceso a la GUI, por lo que el diseño debe ser orientado tanto a las necesidades del experto, como también, al usuario sin un conocimiento profundo del tema.

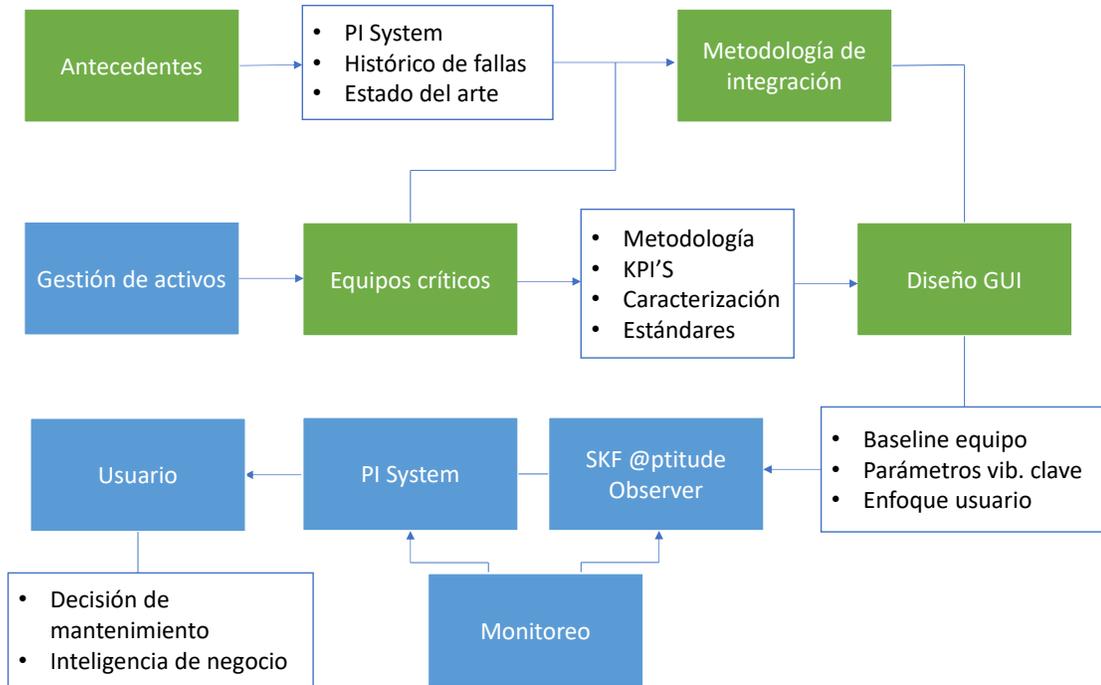


Figura 3: Metodología de desarrollo proyecto. (Fuente: Elaboración propia.)

Con la finalidad de cumplir los objetivos planteados se organizaron las diferentes actividades necesarias temporalmente, siguiendo el orden presentado en la Figura A. 1. Estas actividades se llevaron a cabo en un plazo total de diecinueve semanas.

CAPÍTULO 2: Estado del arte

Con el paso de las revoluciones industriales, las estrategias de mantenimiento han evolucionado continuamente, actualmente se apoyan en diversas herramientas con el objetivo de ofrecer el mejor resultado posible. En la base del desarrollo se encuentra el mantenimiento correctivo (*corrective maintenance*, CM), el cual se utiliza para responder a fallos o averías y restaurar la condición original. Posteriormente, el desarrollo de la técnica impulsó la creación del PM, que comprende acciones realizadas para mantener un elemento en una condición específica mediante la inspección sistemática, la evaluación y la prevención de fallos incipientes [5].

Si bien los enfoques anteriores atacan la problemática fuertemente, el proceso resultaba bastante ineficiente, por ejemplo, el mantenimiento preventivo es ineficaz porque el 82% de los fallos de las máquinas se producen en intervalos de tiempo azarosos. Los enfoques modernos de mantenimiento han evolucionado en la forma de CBM. El CBM recomienda decisiones de mantenimiento basadas en las condiciones de la máquina y su evolución, obtenidas mediante sistemas de medición y monitoreo [6]. Estrategias como el CBM reduce las prácticas de mantenimiento realizando acciones sólo cuando estas son necesarias, lo que ahorra costes de mantenimiento y mejora la consistencia de este [7].

Las técnicas de PdM orientadas en la condición del equipo utilizan diferentes formas de procesamiento de información dentro de las que se encuentran: análisis de forma de onda, análisis dominio-tiempo y análisis dominio-frecuencia. Cada uno teniendo ciertas ventajas dependientes de la situación de aplicación. Adicionalmente la combinación de estos tipos de análisis con modelos estadísticos o de Machine Learning han reportado resultados favorables en su aplicación en mantenimiento.

En la industria moderna, los softwares de monitoreo como PI System han demostrado ser muy útiles al integrar el CBM con herramientas de PdM, lo que permite dar el siguiente paso hacia una industria inteligente. La integración de estas herramientas tiene múltiples beneficios, tales como la reducción en tiempos de mantenimiento no planificado, la disminución de pérdidas de producción, el aumento de la seguridad del personal y el ahorro monetario [8].

Se han reportado diversos casos de éxito en los que se evidencia el impacto de estas prestaciones tras su implementación. Por ejemplo, la refinería Alcoa, una de las principales productoras de aluminio en el mundo, logró reducir sus tiempos de mantenimiento en un 10% y evitar un 20% de paradas imprevistas. En el negocio del acero, empresas como Liberty Ostrava y ArcelorMittal Dofasco han integrado el uso del PI System junto con otras herramientas de análisis, logrando ahorros superiores al 10% en pérdidas evitadas. Dofasco reportó que la indisponibilidad bajó del 22% al 7% y que la calidad del producto aumentó del 76% al 91% [9].

CAPÍTULO 3: Estrategia de Mantenimiento Predictivo

El PdM es una filosofía o enfoque que utiliza el estado real de funcionamiento de los equipos y sistemas de la planta para optimizar el rendimiento general de los procesos. Se basa en datos de condición con el objetivo de predecir posibles fallas en los equipos, mejorando así la productividad, la calidad de los productos y la eficacia general de la producción [10].

El PdM depende de diversas técnicas que permiten predecir eventos en maquinarias y sistemas para evitar interferencias con el proceso productivo. La implementación de sistemas de información para la gestión de activos ha sido clave para la optimización de tareas de mantenimiento en plantas industriales. Las empresas buscan reducir costos por mantenimiento y mejorar su productividad mediante la revisión de sus procesos y estructuras tradicionales. Algunas de las ventajas que representa la implementación de este tipo de mantenimiento corresponden a [10]:

- Detección de fallas en etapas iniciales, permite planificar y programar las acciones correctivas mediante paradas programadas y condiciones controladas, minimizando tiempos muertos.
- Mayor seguridad para los trabajadores mediante la detección y prevención de fallas potencialmente peligrosas en los equipos, lo que mejora la seguridad en el lugar de trabajo.
- Reducción de costos asociados al mantenimiento, logrado a través de la reducción de necesidad de reparaciones de alto costo o inoportunas.
- El mantenimiento predictivo puede identificar y prevenir el desgaste y el deterioro prematuro de los equipos, lo que puede prolongar su vida útil y reducir la necesidad de reemplazarlos con frecuencia.
- Los equipos que funcionan de manera confiable y constante producen productos de mayor calidad y reducen los riesgos de defectos y reprocesos.

Para llevar a cabo el fin de este tipo de mantenimiento se utilizan diferentes técnicas de análisis, entre las principales técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria se encuentran los análisis de: vibraciones, termografía, aceite, ondas alta frecuencia. Los objetivos del PdM se establecen en tres grandes puntos [11]:

- **Monitoreo de condición:** Detección de la presencia de un problema en el activo a través de los cambios que experimentan las magnitudes que se están midiendo, estableciendo un nivel de estado.
- **Diagnóstico de fallas:** El objetivo es identificar la falla específica que afecta a la máquina después de que el sistema de vigilancia haya detectado algún problema.

- **Pronóstico de esperanza de vida:** El objetivo es estimar cuanto tiempo puede trabajar la máquina sin riesgo, una vez identificado el problema subyacente.

3.1 Análisis de vibraciones

La vibración es un fenómeno físico que se caracteriza por un movimiento oscilatorio que se repite en el tiempo. Este movimiento es producido por el desplazamiento de algún objeto en una determinada dirección. Para determinar una vibración, se utilizan dos parámetros principales: la amplitud y la frecuencia.

Todas las máquinas vibran debido a las tolerancias inherentes a sus elementos mecánicos, lo que les proporciona una vibración característica básica. Cualquier cambio en esta vibración básica es indicativo de que algún defecto incipiente está presente en algún elemento. El análisis de vibración es una técnica utilizada para detectar estos defectos y prevenir fallas catastróficas. Al medir y analizar la vibración, los técnicos pueden determinar la causa raíz de los cambios y tomar medidas de mantenimiento preventivo.

En la industria, es importante evaluar el estado de las máquinas y, en caso de detectar problemas, investigar su causa. La siguiente la Tabla 1 muestra el panorama de estudio.

Tabla 1: Claves análisis vibratorio y parámetros asociados. (Fuente: [12].)

Clave diagnóstico fallas	Frecuencia de la vibración
Clave evaluación severidad vibratoria	Valor vibración global

3.1.1 Técnicas de diagnóstico de fallas

Para diagnosticar la causa o modo de falla de un activo, el análisis de vibraciones utiliza principalmente tres métodos de diagnóstico:

- Análisis frecuencial o espectral.
- Análisis de diferencia de fase.
- Análisis de forma de onda.

El análisis espectral corresponde a la técnica de punto de partida de estudio de máquinas rotatorias. Se inicia midiendo vibraciones en descansos o en el eje de la máquina, luego obtenida la señal en dominio tiempo esta es descompuesta en sus componentes frecuenciales asociando luego estas con las fuerzas dinámicas que actúan en la máquina. Posteriormente se evalúa el estado en base a comportamientos referenciales de buen funcionamiento.

Para lograr un análisis efectivo, es crucial interpretar correctamente los datos obtenidos, prestando especial atención tanto a los peaks como a las frecuencias asociadas. En los espectros, las frecuencias se identifican comúnmente como armónicos que son múltiplos de la frecuencia de giro del sistema, como 1X, 2X, 3X, etc. En la Figura 4, se muestra como ejemplo un espectro típico de máquina con síntomas de desbalanceamiento.

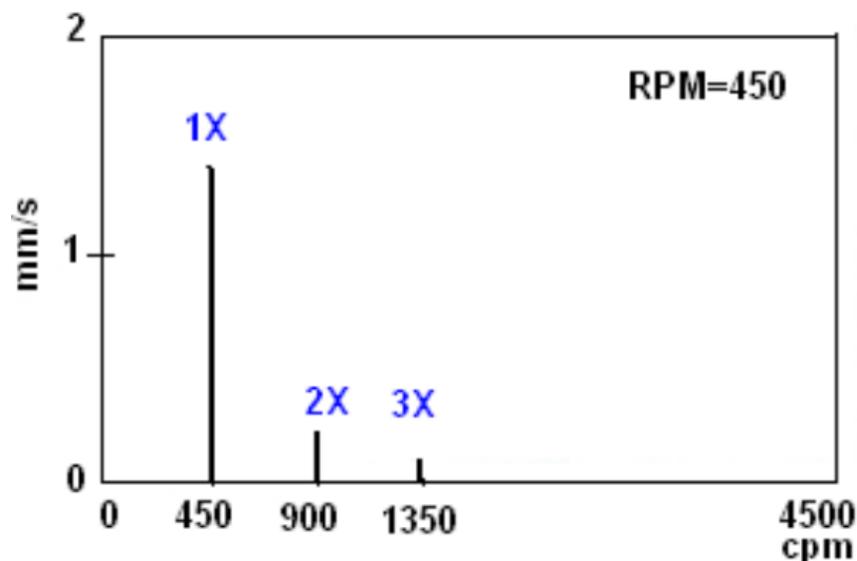


Figura 4: Espectro vibratorio característico desbalanceamiento. (Fuente: [12].)

El análisis de fase es una técnica que se utiliza para comparar el movimiento de dos o más puntos en una misma máquina. Su utilidad radica en la capacidad de distinguir modos de falla que pueden presentar espectros similares, lo que permite al analista discriminar el modo de falla correcto. En la Figura 5 se muestra un ejemplo ilustrativo para el caso de desfase entre mediciones verticales y horizontales de 90°.

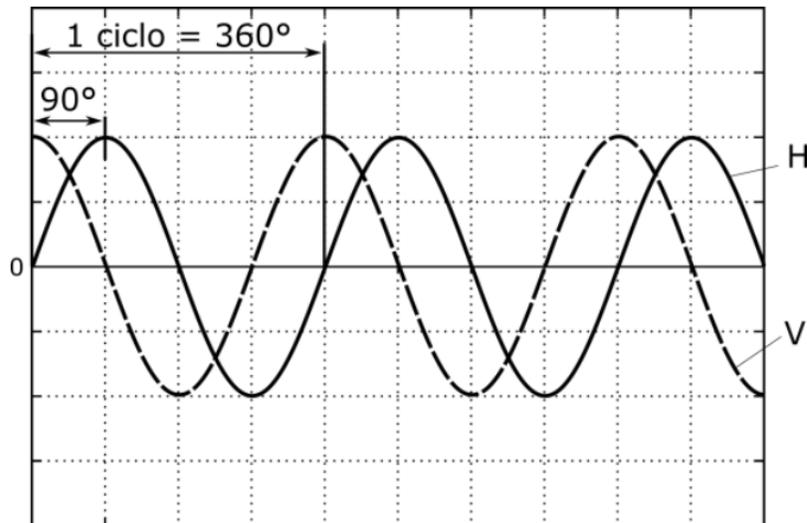


Figura 5: Ejemplo relación entre fases vibración vertical y horizontal. (Fuente: [12].)

Finalmente, también es de mucha utilidad el análisis de la forma de onda vibratoria. La forma de onda proporciona información sobre la presencia de fallas periódicas o eventos impulsivos, como golpes. También permite comparar factores como la amplitud, la fase y la frecuencia de la señal medida con respecto a una señal de referencia, lo que ayuda a identificar cambios en el estado del equipo.

3.1.2 Análisis de severidad vibratoria

En el marco de monitoreo continuo de condición, el análisis de severidad se muestra como una técnica esencial. La evaluación de la severidad se realiza de acuerdo a estándares que establecen los procedimientos a seguir para evaluar y establecer niveles de operación aceptables. De amplio uso en la industria son las normas ISO, los estándares básicos corresponden a el par de series de normas ISO 10816 e ISO 7919. Ambos estándares establecen zonas de evaluación indicativas progresivamente de distintos niveles de peligro [13].

- **ISO 10816:** Evaluación de la vibración de máquinas en base a medición en partes no-rotativas de ella.
- **ISO 7919:** Vibración mecánica de máquinas no recíprocas realizada en ejes rotatorios.

De especial atención para el proyecto es el estándar ISO 10816-3, el cuál será la norma de uso más frecuente en máquinas industriales. Los criterios de vibración de este estándar se aplican a un conjunto de máquinas con potencia superior a 15 kW y velocidad entre 120 RPM y 15.000 RPM. La clasificación se realiza de acuerdo a: tipo de máquina, potencia nominal o altura de eje y flexibilidad

de eje. En general, se utiliza el valor eficaz RMS de la velocidad vibratoria para determinar la condición de un equipo, este valor se calcula según la Ecuación 1 siendo la raíz cuadrada del promedio de valores instantáneos de vibración al cuadrado a lo largo del tiempo de medición.

$$V_{RMS} = \sqrt{(V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_N^2)/N} \quad (1)$$

Donde:

- **V:** Velocidad instantánea.
- **N:** Cantidad de muestras.

Según lo indicado en la norma se establecen límites operacionales, definiendo rangos de operación admisibles. Se definen los valores de alarma y parada:

- **Alarma:** Proporciona una advertencia cuando se alcance un valor predefinido de vibración o se produzca un cambio significativo que pueda requerir una acción correctiva. En caso de que se active una alarma, es posible que la operación pueda continuar temporalmente mientras se llevan a cabo las investigaciones para determinar la causa del cambio en la vibración y definir las medidas correctivas necesarias.
- **Parada:** Especifica el umbral de vibración que puede causar daño si se continúa operando. Si se supera este límite, se deben tomar medidas inmediatas para reducir la vibración o detener la máquina.

3.2 Plataforma PI System y PdM

La introducción de las herramientas de análisis predictivo y monitoreo continuo de activos ha experimentado un gran impulso gracias a los avances en herramientas y software de análisis modernos. En particular, el software PI System ha sido destacado como una solución eficiente para la construcción de plataformas de monitoreo. En esta sección, se analizará brevemente su funcionamiento y las ventajas que ofrece.

El software PI System es una herramienta robusta y versátil que permite recopilar, organizar y analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real. Su funcionamiento se basa en la recopilación de datos provenientes de diferentes fuentes, como sensores, dispositivos y sistema para su posterior almacenamiento en una base de datos centralizada. Esto facilita el acceso y la gestión de los datos, así como su análisis en tiempo real.

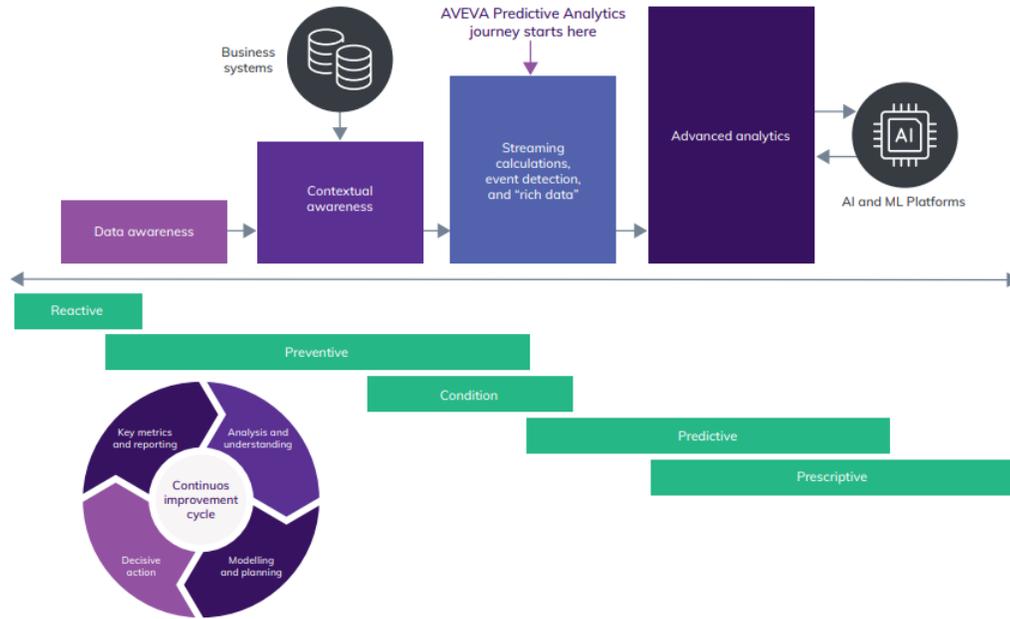


Figura 6: PI System análisis predictivo. (Fuente: [14])

La vinculación con las distintas etapas de mantenimiento se puede apreciar en la Figura 6. Los datos en tiempo real en el sistema PI facilitan la transición de los enfoques reactivos hacia un enfoque preventivo y basado en la condición. La contextualización de los datos ofrece diversas ventajas, como la visualización, la detección de eventos y notificaciones, así como el análisis de flujo para activar eventos y medir el rendimiento. Esta capacidad resulta especialmente útil, ya que permite la creación de conjuntos de datos temporales llamados tags, que pueden ser personalizados y provenir de otras plataformas. Esto posibilita la incorporación de toda la información relevante en una única pantalla, que puede ser totalmente personalizada y con presencia multiplataforma lo que resulta en la entrega oportuna de información a los ingenieros de planta.

Numerosas son las ventajas de la vinculación de una plataforma de este tipo con el PdM, algunas se listan brevemente a continuación [15].

- **Beneficios operativos:** El software optimiza la recolección de datos operativos, reduciendo el tiempo y esfuerzo requeridos. Esto garantiza la integridad y disponibilidad en tiempo real de los datos críticos. Al proporcionar acceso óptimo a estos datos, el personal de operaciones puede obtener una visión completa y actualizada, lo que facilita la toma de decisiones y la planificación eficiente del mantenimiento de la maquinaria.
- **Análisis de negocio:** Permite una conexión más entre la planificación empresarial y los equipos de desarrollo de productos y servicios con los datos operativos. Esto ayuda a la empresa a optimizar los procesos, productos y servicios existentes, así como a adentrarse en

modelos de negocio o mercados completamente nuevos basados en estrategias de productos conectados.

- **Almacenamiento y gestión de datos:** Una mejora clave de PI System es su capacidad para garantizar la integridad y disponibilidad de datos críticos en tiempo real a través del PI Server. El PI Server mantiene la fidelidad completa de los datos de series temporales, lo que permite la recuperación y visualización inmediata de datos en tiempo real cuando se necesitan, obteniéndolos desde la nube.
- **Optimización de recursos y costos:** Permite optimizar el uso de los recursos y reducir los costos de mantenimiento. Al tener acceso a datos operativos en tiempo real y análisis avanzados, se pueden identificar patrones y tendencias que permiten una gestión más eficiente de los recursos de mantenimiento. Esto incluye la programación adecuada de tareas de mantenimiento preventivo, la optimización de inventarios de repuestos y la planificación de actividades de mantenimiento de manera más precisa. Al optimizar los recursos y reducir los costos de mantenimiento, la empresa podrá mejorar su rentabilidad y competitividad.

CAPÍTULO 4: Definición de equipos críticos

La empresa tiene definido su propio estándar para el establecimiento de maquinaria crítica dentro de la planta, instituido con el nombre PG-72-72001. Este establece responsabilidades y procedimientos para la evaluación y definición de criticidad de activos. El proceso general de actuar del estándar se muestra en la Figura 7.

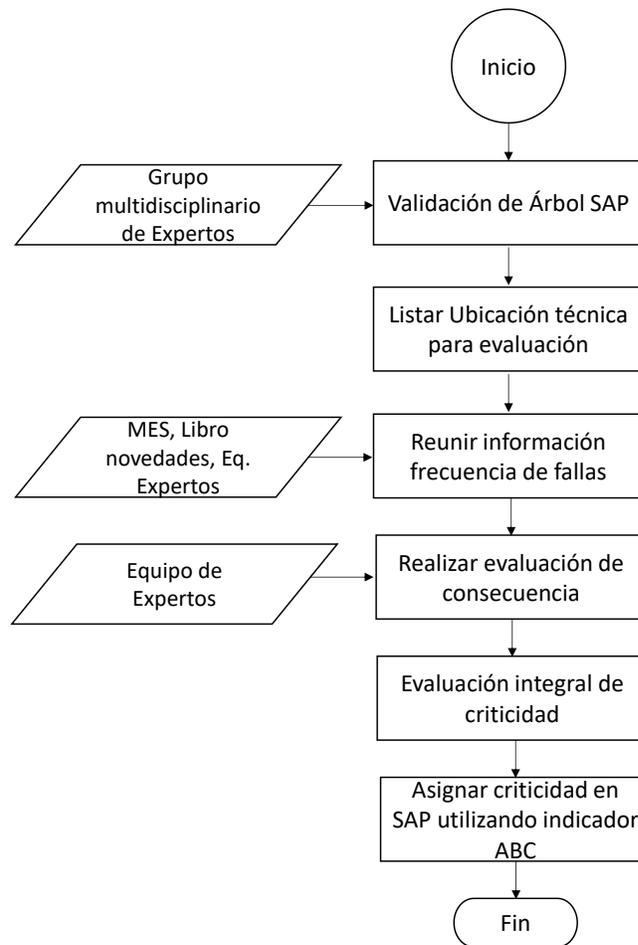


Figura 7: Flujo proceso evaluación criticidad activos. (Fuente: Empresa Siderúrgica Huachipato.)

4.1 Evaluación PG-72-72001

La evaluación integral de criticidad de activos considera como base la correcta estructuración jerárquica de los sistemas y activos en la definición del árbol de ubicaciones y equipos en el sistema de aplicaciones y productos (SAP). Por lo anterior, la metodología considera que la primera tarea a ejecutar consiste en revisar esta información y actualizar en SAP de ser necesario. La segunda tarea a desarrollar consiste en listar las ubicaciones técnicas actualizadas en la planilla de evaluación, información de entrada necesaria para llevar a cabo cálculos de criticidad posteriores.

Un aspecto fundamental en el establecimiento de criticidad en base a confiabilidad es la frecuencia de falla del activo, la cual es establecida como la cantidad de eventos que ocurre por unidad de tiempo. En la Tabla 2 se indica la puntuación que tendrá para cada caso, dependiendo de la frecuencia de falla que se obtenga del análisis. La información utilizada aquí es obtenida desde MES, discusión del equipo de expertos u otro sistema de información que permita determinar la puntuación.

Tabla 2: Puntuación de frecuencia de falla. (Fuente: Empresa Siderúrgica Huachipato.)

Frecuencia	Puntuación
Más de 52 por año (Más de 1 vez por semana)	6
Entre 27 y 52 por año (Entre 0,5 y 1 vez por semana)	5
Entre 13 y 26 por año (Entre 1 y 2 veces por mes)	4
Entre 2 y 12 por año	3
Menos de 2 por año	2
Menos de 1 por año	1

El siguiente paso del procedimiento según la Figura 7, corresponde a la evaluación de consecuencia, esta considera seis dimensiones de análisis cuyos niveles se encuentran establecidos en la Tabla 3. Los niveles de seguridad desde P1 a P6 se describen brevemente a continuación [16]:

- **P1. Seguridad:** Esta dimensión considera la evaluación de consecuencias de una falla para la seguridad de las personas. Se definen cuatro niveles de puntuación.
- **P2. Medio Ambiente:** Esta dimensión considera la evaluación de consecuencias de una falla para el medioambiente. Se definen tres niveles de puntuación.
- **P3. Calidad:** Consecuencias de una falla para la calidad de producción. Evalúa en tres niveles si la calidad del producto terminado es afectada o no.
- **P4. Producción:** Pérdidas o paradas de producción que pueden ocurrir como consecuencias de una falla. Para esta dimensión se definen los rangos dependiendo de la naturaleza del proceso, siendo el equipo de expertos el responsable de asignar estos intervalos.
- **P5. Tiempo medio para reparar (MTTR):** Para la evaluación de esta dimensión se considera el tiempo promedio para recuperar la funcionalidad de un proceso que ha sido afectada por la falla de un activo.

- **P6. Costo de reparación:** Costos totales en los cuales se incurre para restituir la funcionalidad del activo afectado por una falla. Considera costos promedio de HH, materiales y servicios.

Tabla 3: Puntuación de consecuencia de falla (Fuente: Empresa Siderúrgica Huachipato.)

P1. Seguridad	P2. Medio Ambiente	P3. Calidad	P4. Producción	P5. MTTR	P6. Costo reparación
40	40	20	12	10	10
Riesgo con fatalidad	Riesgo daño severo al medio	Afecta totalmente la producción	Rango 1 definido según el proceso	Rango 1 definido según el proceso	> 100k USD
			8	8	8
			Rango 2 definido según el proceso	Rango 2 definido según el proceso	Entre 50k y 100k USD
30	20	10	6	4	4
Riesgo de accidente medio	Riesgo de daño leve	Afecta parcialmente la calidad	Rango 3 definido según el proceso	Rango 3 definido según el proceso	Entre 25k y 50k USD
12			3	2	2
Riesgo de accidente bajo			Rango 4 definido según el proceso	Rango 4 definido según el proceso	Entre 5k y 25k USD
0	0	0	1	1	1
Sin riesgo para las personas	Sin riesgo ambiental	No afecta la calidad	Rango 5 definido según proceso	Rango 5 definido según proceso	< 5k USD

El valor a utilizar de Consecuencia se calcula como la sumatoria desde P1 hasta P6, la puntuación según el valor obtenido se presenta en la Tabla 4. Luego es posible realizar el cálculo de evaluación de riesgo del activo según la Ecuación 2.

$$R(t) = F(t) \cdot C \quad (2)$$

Donde:

- **R(t):** Riesgo o confiabilidad del componente.
- **F(t):** Frecuencia de falla.
- **C:** Consecuencia sobre el proceso.

Tabla 4: Puntuación de consecuencia. (Fuente: Empresa Siderúrgica Huachipato.)

Consecuencia P1+P2+P3+P4+P5+P6	Puntuación
Consecuencia total > 40	6
40 > Consecuencia total > 30	5
30 > Consecuencia total > 20	4
20 > Consecuencia total > 10	3
10 > Consecuencia total > 4	2
Consecuencia total < 4	1

Finalmente, el nivel de criticidad según la evaluación de riesgo Ecuación 2 es asignada a los activos según la Tabla 5.

Tabla 5: Definición nivel de criticidad. (Fuente: Empresa Siderúrgica Huachipato.)

Evaluación riesgo	Criticidad
Menor o igual a 8	Baja
Entre 8 y 18	Media
Mayor a 18	Alta

4.2 Activos críticos actuales

En base a el estándar PG-72-72001 con fecha 21-01-2023, existe un total de sesenta activos de alta criticidad operacional dentro las diferentes secciones de la planta. Cada activo se presenta en la forma de conjunto de maquinaria el cual puede estar compuesta por una o más maquinas. Un listado de los activos críticos con información de utilidad se muestra en Tabla A. 1.

Un panorama general de los activos críticos dentro de la planta se muestra en la Figura 8, existiendo seis tipos distintos de estos, debido a las necesidades se distinguen dos tipos de monitoreo de vibraciones, el monitoreo global y continuo.

- **Monitoreo global:** Medición periódica de vibraciones en un punto o varios puntos de la estructura o maquinaria, en intervalos regulares de tiempo. Se miden valores globales de vibración, asociados al valor RMS.
- **Monitoreo continuo:** Medición continua de vibraciones en tiempo real mediante sensores de vibración. Los datos de vibración se recopilan y analizan de forma continua. Utilizado en maquinaria relevante definida por expertos.

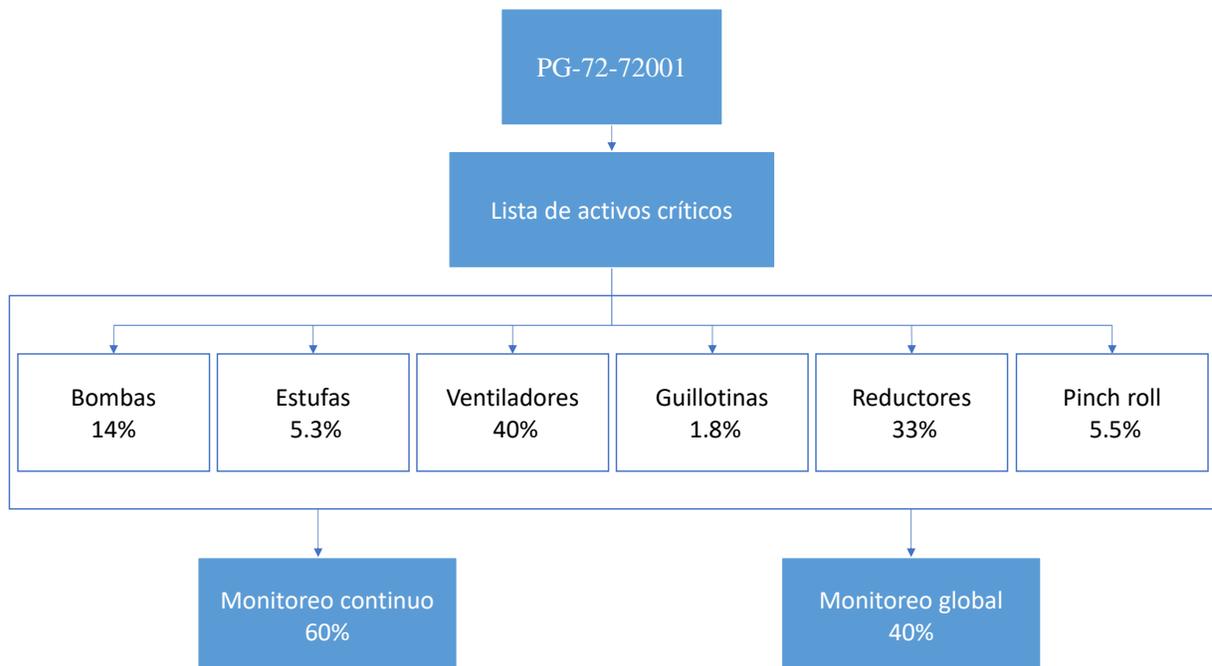


Figura 8: Activos críticos dentro de la planta. (Fuente: Elaboración propia.)

CAPÍTULO 5: Metodología de integración

Para implementar una plataforma basada en PI System, es necesario establecer lineamientos generales que permitan la integración de nuevos equipos. Es fundamental definir los pasos y procedimientos a seguir con el objetivo de establecer las bases necesarias para el desarrollo posterior de la plataforma.

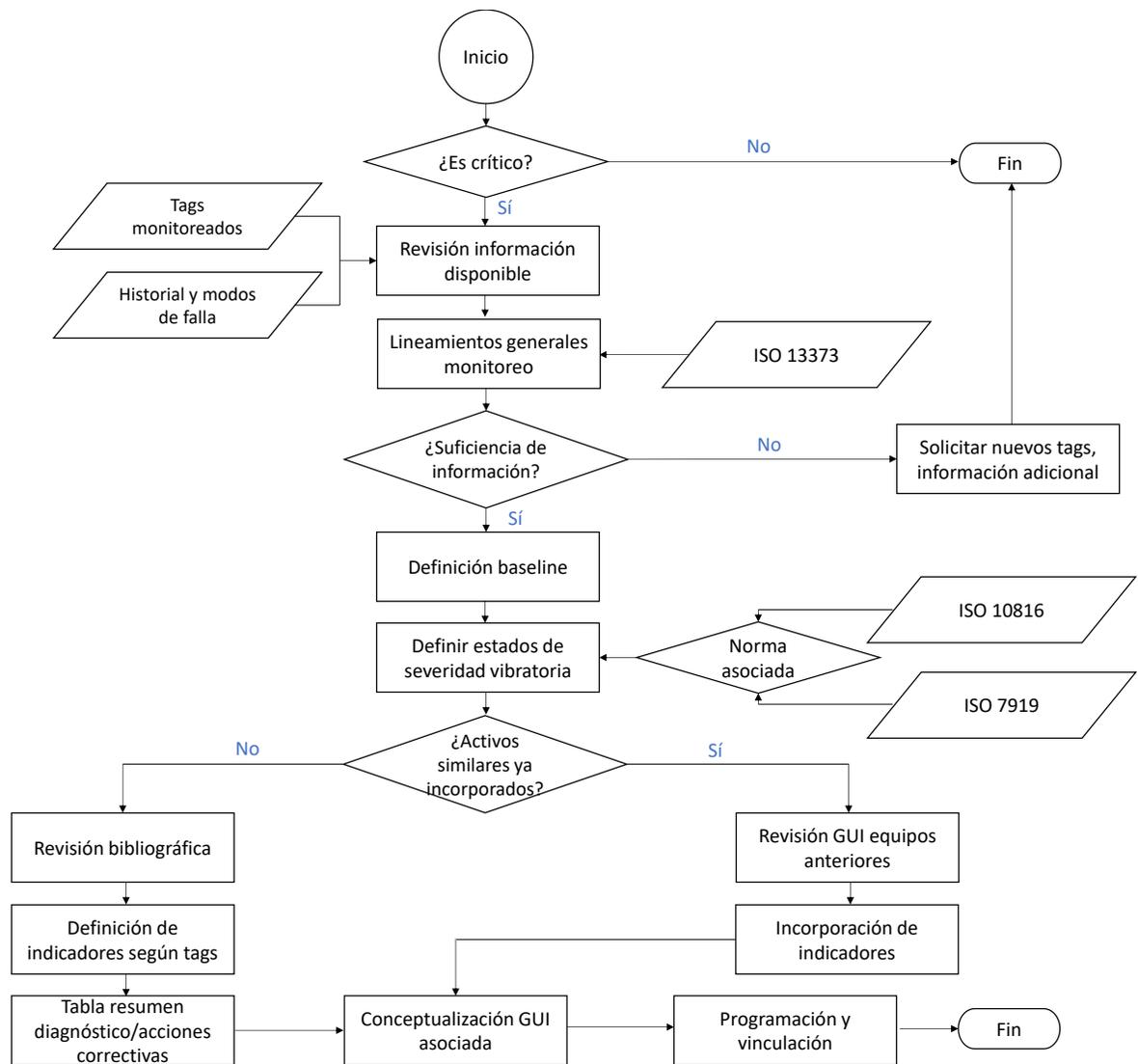


Figura 9: Diagrama de flujo integración de activos. (Fuente: Elaboración propia.)

En la Figura 9 se muestra el procedimiento general planteado para llevar a cabo la integración, el primer paso es definir si es necesario el monitoreo continuo en el caso de ser activo crítico. Luego en base a la información disponible, especialmente teniendo en cuenta los tags actualmente

monitoreados, se realiza un levantamiento de información con el objetivo de evaluar la existencia de suficiente información para la definición de una GUI propiamente tal, de utilidad es la revisión de la norma ISO 13373 [17]. De ser positivo el análisis se debe continuar con la caracterización del proceso como del funcionamiento del activo orientado al objetivo de definir baseline y a posteriores zonas seguras de operación.

Siguiendo con el flujo del proceso, corresponde a establecer niveles de referencia de estados de alerta y alarma según sea indicado en las normas ISO 10816 o ISO 7919 en caso de aplicar y según corresponda, herramienta fundamental para evaluar la severidad vibratoria.

Luego, es necesario definir indicadores que sean útiles para evaluar el estado del activo en base a los tags disponibles, una primera fuente de información corresponde a la revisión de activos similares ya incorporados en cuyo caso la GUI podría ser de gran utilidad, pudiendo replicar cierta información ya disponible. De otra manera, es necesario llevar a cabo una investigación histórica y bibliográfica más exhaustiva sobre el activo en cuestión para poder identificar los indicadores relevantes que deben ser incluidos. En esta sección, es recomendable crear una tabla resumen que contenga los principales modos de falla, su manifestación y las acciones correctivas correspondientes a llevar a cabo. Esta tabla será de gran utilidad a medida que se vayan incorporando activos similares, pues podrá entregar información concisa útil para la evaluación y tratamiento de activos del mismo tipo (por ej: bombas centrífugas, guillotinas comerciales, laminadores, etc.).

Después de completar la evaluación por pasos del activo, la siguiente etapa es desarrollar la GUI y establecer las conexiones entre el PI System y las variables de monitoreo. Se sugiere aquí llevar a cabo una fase de prueba de rendimiento para verificar el funcionamiento adecuado.

5.1 Diseño plataforma

En cuanto a las consideraciones de diseño de la plataforma de monitoreo, se define una jerarquía simple para acceder a la información de los distintos activos críticos. El acceso se muestra intuitivo para el personal de la planta, con información general bien conocida para ellos. La estructura sencilla se muestra en la Figura 10. Primeramente, al acceder al portal se filtrará por unidad de planta, se desplegarán los activos asociados, luego al seleccionar un activo se mostrará la información seleccionada como una GUI referente a los indicadores definidos.

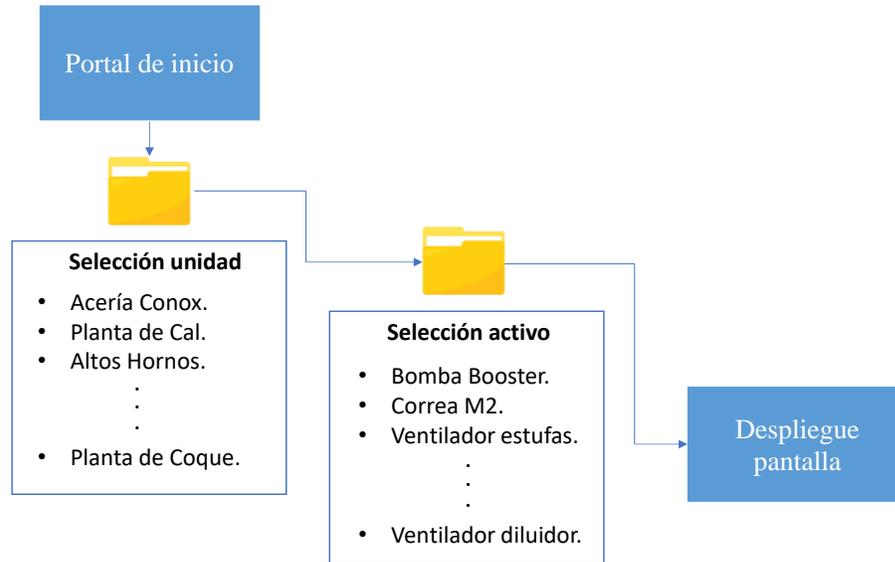


Figura 10: Jerarquía plataforma de monitoreo. (Fuente: Elaboración propia.)

5.2 Activos críticos de estudio

Las proyecciones del proyecto dentro de la empresa pretenden integrar cada activo crítico a la plataforma de monitoreo. Dentro del marco del desarrollo de memoria de título, con el objetivo iniciar el proceso y propiciar la fácil incorporación de la mayoría de nuevos equipos, se decide analizar un activo crítico correspondientes al grupo de activos críticos con mayor número Figura 8. En base a conversaciones con personal del departamento de Gestión de Activos Físicos, se decidió llevar a cabo el estudio para el Ventilador KKK, activo crítico de la zona Acería Conox.

CAPÍTULO 6: Ventilador KKK

El activo crítico operacional que se estudiará es el Ventilador KKK, el cual opera en la zona de Acería Conox. Esta sección de la planta cuenta con dos convertidores de cien toneladas y su función es procesar el arrabio proveniente de los altos hornos. El arrabio y chatarra de acero se cargan juntos en el convertidor, donde la inyección de oxígeno provoca la oxidación del carbón, silicio y fósforo presentes. Estas reacciones exotérmicas generan suficiente calor para fundir la carga metálica sin necesidad de añadir combustible. Luego, al agregar cal, se forma la escoria que atrapa las impurezas oxidadas. Finalmente, el acero resultante se envía a la estación de ajuste y, posteriormente, a la colada continua para moldearlo según las necesidades del mercado.

El Ventilador KKK desempeña un papel fundamental en el proceso descrito, este se encarga de ventilar el extractor, eliminar el material particulado y los gases de soplado del área. Su funcionamiento es esencial ya que sin él la conversión del arrabio en acero no puede llevarse a cabo. En este capítulo se realizará el análisis correspondiente para la generación de la GUI, los códigos de análisis se encuentran disponibles para su consulta en Anexo A5: Códigos de programación.

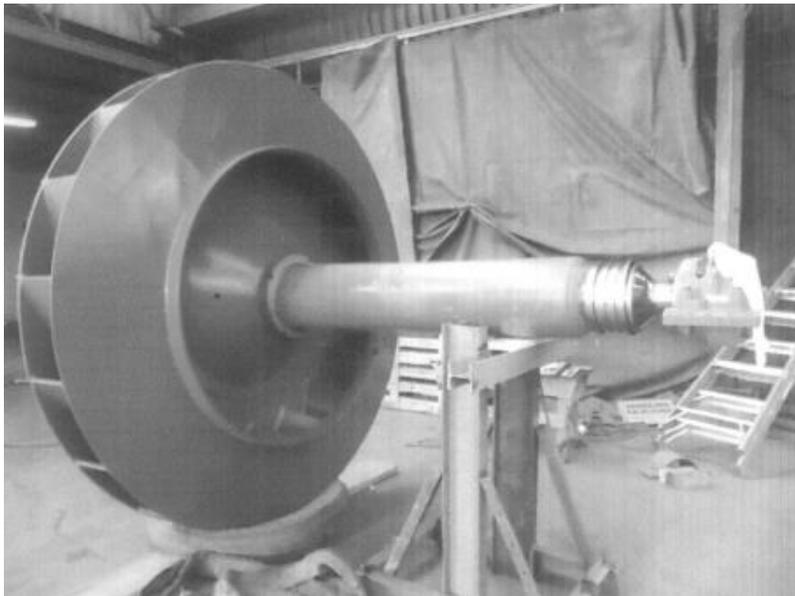


Figura 11: Conjunto Ventilador KKK. (Fuente: Empresa Siderúrgica Huachipato.)

6.1 Información de operación

El ventilador KKK corresponde a un ventilador tipo V fabricado por la compañía alemana Kühnle Kopp & Kausch la información básica del modelo se adjunta en la Tabla 6. Estos son ventiladores centrífugos de una etapa y una entrada que consisten en una carcasa soldada de dos partes con tapa,

compuertas de persiana de entrada, rotor con cojinetes y junta del eje. La carcasa de la voluta está formada por paredes paralelas soldadas en las superficies de la voluta. El rotor está alojado en cojinetes antifricción y consta de un disco impulsor y un disco de cubierta reforzados por un anillo forjado. El eje es hueco, siendo su velocidad crítica muy superior a la velocidad de operación, este está unido al impulsor mediante una brida protegida por placas de desgaste. Además, tiene instalado resortes para amortiguar las vibraciones y un rodamiento axial de rodillos autoalineables en la entrada para absorber el empuje axial.

Tabla 6: Información básica Ventilador KKK. (Fuente: [18].)

Tipo	V 24/18
Tamaño impulsor	2360 mm diámetro
Nº de alabes	18
Nº Ventilador	1.124.004

La información específica de operación del Ventilador KKK se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7: Información de operación Ventilador KKK. (Fuente [18])

Potencia nominal	1680 kW
Velocidad nominal operación	1485 RPM
Capacidad	346000 m ³ /h
Voltaje nominal motor	4000 Volt
Presión entrada	0,9 atm. abs.
Cambio de presión entrada-salida	1230 mm WG
Sentido giro (mirando desde lado succión)	Anti horario

El proceso de operación del Ventilador consiste en un funcionamiento alterno de encendido y apagado en los que ejecuta la acción de ventilación de extractor y reducción de material particulado. Con el objetivo de tener una idea referencial del proceso de funcionamiento, se muestra la potencia entregada por el motor en la Figura 12. Aquí se visualizan siete operaciones asociadas cada una a una horneada,

existen periodos transitorios inicial y final en cada operación en el cual primeramente el ventilador alcanza su velocidad su operación y luego regresa al descanso. Se caracterizará más adecuadamente este funcionamiento en la sección de análisis.

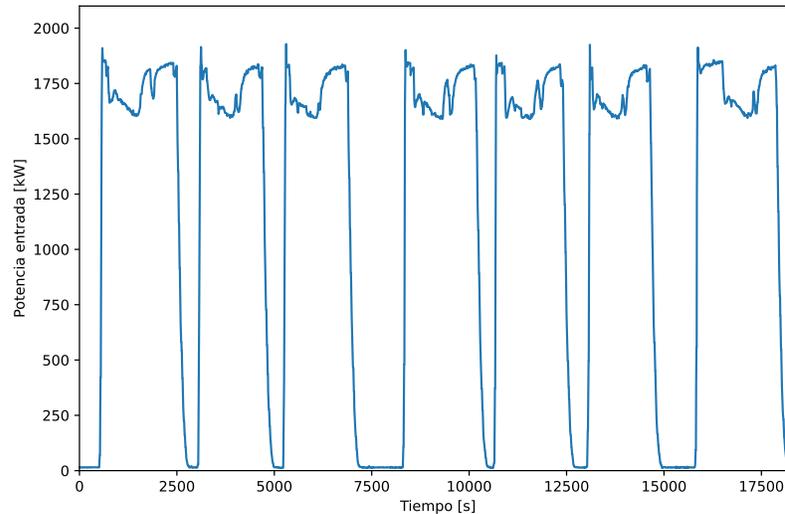


Figura 12: Forma operación Ventilador KKK, cinco horas totales. (Fuente: Elaboración propia.)

6.2 Antecedentes y modos de falla

En el pasado, el activo ha presentado dificultades para la empresa, requiriendo diversas intervenciones a lo largo del tiempo. Tras el último cambio de rotor en el año 2018, se han llevado a cabo varias intervenciones en el conjunto, como se muestra en la Figura 13, utilizando información obtenida de informes técnicos históricos.

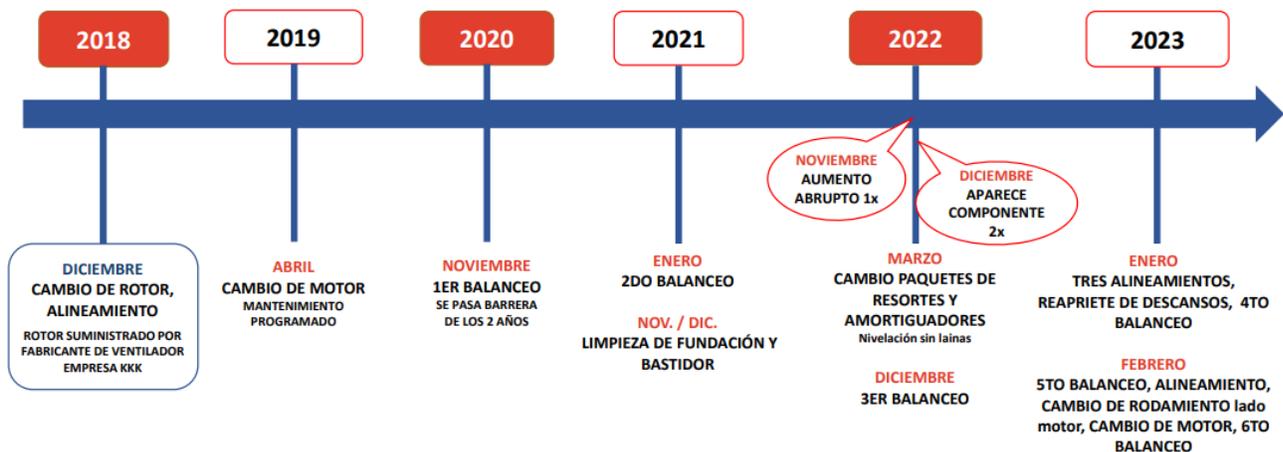


Figura 13: Intervenciones históricas Ventilador KKK. (Fuente: Elaboración propia.)

Las fallas más frecuentes que ha experimentado el ventilador están asociadas a desbalances y desalineamientos. En menor medida, se han presentado fallas asociadas a la existencia de solturas y aparición de grietas. Un resumen de la información, así como el parámetro de diagnóstico se muestra en Tabla 8.

Tabla 8: Resumen histórico fallas y síntomas. (Fuente: Elaboración propia.)

Variable	Severidad	Desbalance	Desalineamiento	Solturas	Grietas
Parámetro	Velocidad RMS	1x	2x	Múltiplos armónicos	1x-2x
Evaluación	Norma ISO	Múltiplo de baseline equipo.			

A continuación, se presenta de manera concisa los principales modos de falla con una descripción de su diagnóstico común [19].

- **Desbalance:** Modo de falla más común, se presenta un peak en la componente 1X del gráfico espectral.
- **Desalineamiento:** Puede ser angular o paralelo, son característicos los peaks en los primeros tres armónicos 1X, 2X y 3X, siendo posiblemente más notorio el múltiplo 2X axial en el caso angular, y 2X radial en el caso paralelo.
- **Solturas:** Este modo de falla se evidencia principalmente en el gráfico espectral radial a través de múltiples armónicos. A medida que la soltura aumenta, aparecen líneas espectrales subarmónicas, siendo las más comunes 1/2X, 1/3X y 1/4X.
- **Grietas:** Existen dos síntomas principales de grietas en el eje. El primero se manifiesta como un cambio en la amplitud y fase de la frecuencia 1X. El segundo síntoma es la aparición de la frecuencia 2X.

6.3 Monitoreo del activo

Al ser un activo de gran impacto en el proceso productivo de la planta, este está sujeto a un tipo de monitoreo continuo. El diagrama representativo del conjunto ventilador-motor se muestra en la Figura 14, la numeración es indicativa de los puntos de medición de vibración en descansos.

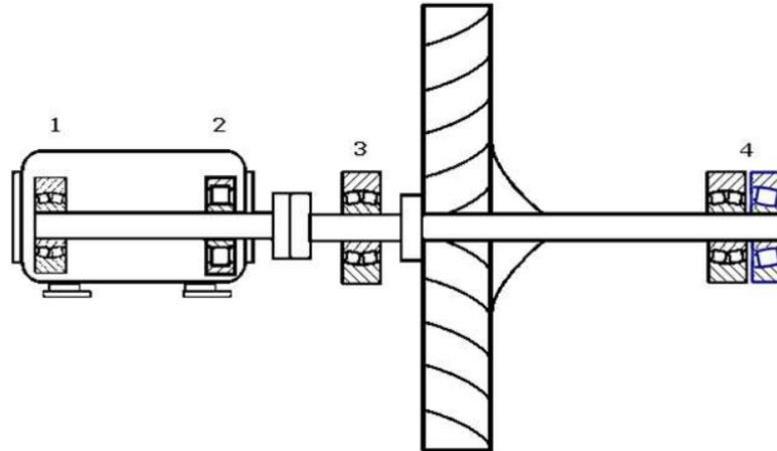


Figura 14: Diagrama del conjunto. (Fuente: Empresa Siderúrgica Huachipato.)

Para realizar el análisis de vibraciones se utiliza la información de los sensores con disposición de lectura en línea y con información histórica del activo, estos se incorporarán luego a la GUI. Adicionalmente, se monitorean otras variables importantes que sería interesante añadir a la plataforma asociadas al proceso, tales como: temperatura en los descansos, estados de consumo, entre otras.

6.4 Análisis variables generales

De acuerdo al diagrama planteado en Figura 9 corresponde definir el baseline del equipo. Se obtuvo acceso a datos históricos del funcionamiento del Ventilador KKK desde el año de último cambio de rotor hasta el presente, de acuerdo a esta información se caracterizará el proceso, la primera información relevante asociada a los sopladors se muestra en la Tabla 9. En este sentido se aprecia que en promedio el proceso dura 40 minutos, un 68% de los casos oscilando en el rango 24 a 57 minutos de funcionamiento.

Tabla 9: Descripción sopladors. (Fuente: Elaboración propia.)

N° Operaciones	31579
Tiempo promedio operación	40.56 minutos
Desviación estándar	14 minutos
Periodo análisis	2019-2023

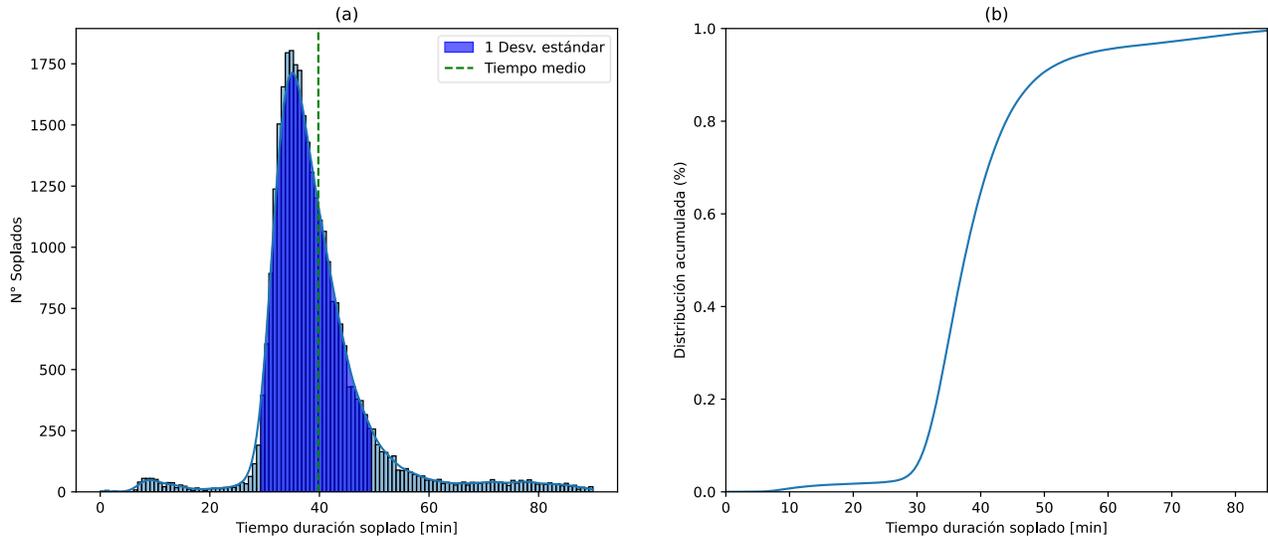


Figura 15: (a) Distribución tiempos soplado, (b) Acumulación tiempos soplado. (Fuente: Elaboración propia.)

Se caracteriza visualmente los tiempos de soplado en Figura 15 (a) y Figura 15 (b). La primera figura (a) muestra la distribución normal observada en los tiempos históricos de soplado, el rango normal asociado se muestra en tono azul oscuro y será el tiempo esperable en tiempos de operación normal. Por otra parte, la segunda figura (b) muestra la acumulación porcentual de los tiempos de soplado, también es observable el cambio de acumulación en el rango medio descrito, expresando también la baja probabilidad de los tiempos extremos de los rangos de tiempo definidos.

Los tiempos de soplado resultan útiles de medir, pues entregan información sobre:

- **Detención por control:** Si alguna de las variables de proceso integradas en el ventilador sobrepasa niveles de alarma este podría detenerse, algunos ejemplos son: superación temperatura gas entrada, flujo de agua deficiente, presión del lubricante deficiente.
- **Rendimiento:** Las cargas del proceso están dentro de un rango, por lo tanto, aumentos generalizados de los tiempos de soplado puede entregar información asociada a disminución del rendimiento de ventilador.
- **Problemas de proceso:** El ventilador cumple un rol en una etapa específica del proceso, y es importante tener en cuenta que cualquier problema en otros componentes del sistema puede afectar directamente el proceso de soplado y su duración.
- **Problemas suministro:** Debido por ejemplo al bloque en campanas de extracción, en la entrada del ventilador, o por desgaste de componentes.

Otra variable de interés en el monitoreo corresponde a las mediciones de temperaturas en los descansos, una mirada al comportamiento sano de estas se muestra en Figura 16, se tiene una temperatura media en lado Cerro de 43°C y en lado Mar de 24°C.

Se definen también límites admisibles para los valores de temperaturas medidos, tomando en consideración los niveles establecidos por el fabricante. Para evitar la disminución de la viscosidad del lubricante la medición no debería superar los 80°C además el valor máximo permisible es de 120°C [18]. Los cambios abruptos y/o excesivos de las mediciones de temperaturas en los descansos están asociados a [20]:

- **Nivel de aceite:** En el caso de detectar niveles muy altos, se recomienda drenar hasta el indicador medio del equipo.
- **Estado rodamientos:** Niveles altos de temperaturas en las mediciones en rodamientos suele estar asociado a daños en los mismos, es necesario revisar el nivel de daño y evaluar el posible cambio de estos.
- **Sistema de lubricación:** Cambios en los niveles de temperaturas también pueden ser indicativos de problemas en el sistema de lubricación evidenciando roce excesivo, evaluar estado del sistema.
- **Condiciones operativas:** anormales, asociadas a cualquier condición operativa anormal, como cambios repentinos en la velocidad de rotación, vibraciones inusuales o fluctuaciones en el caudal de aire.

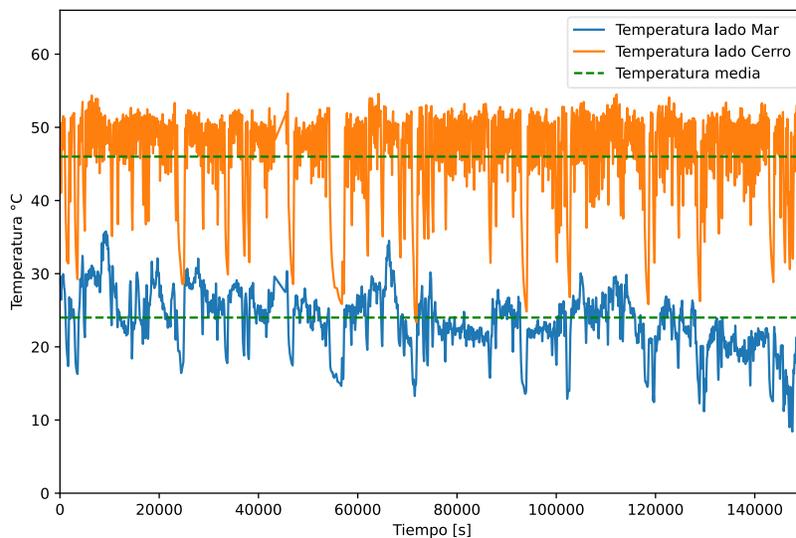


Figura 16: Temperaturas en descansos. (Fuente: Elaboración propia.)

Otra variable de alto interés en el análisis general y que es medida actualmente, corresponde al flujo de O₂ con el que está operando el ventilador, la información histórica respecto a esta variable se muestra en la Figura 17 (a) y Figura 17 (b), se muestra información del flujo y desviación estándar del mismo durante la operación. Se observa que el ventilador opera ampliamente bajo su capacidad máxima, con un flujo medio de $190079 \text{ m}^3/\text{h}$ oscilando en el rango de $176062 \text{ m}^3/\text{h}$ a $204095 \text{ m}^3/\text{h}$. El proceso en si presenta variaciones considerables de flujo asociadas, en promedio de una magnitud de $9210 \text{ m}^3/\text{h}$.

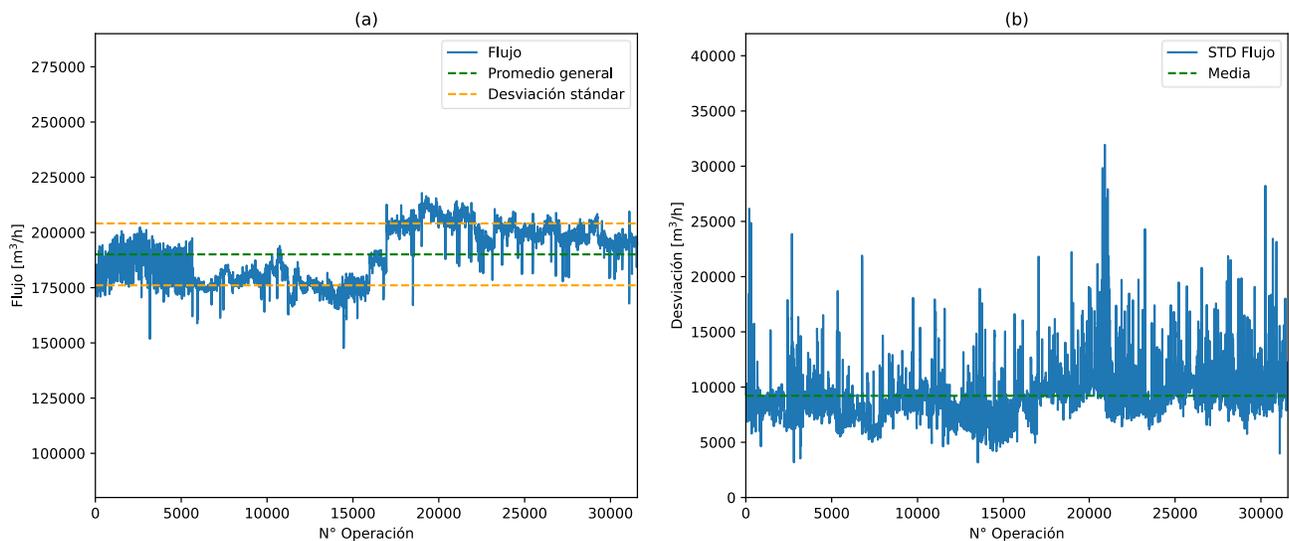


Figura 17: (a) Flujo de O₂, (b) Variación flujo O₂. (Fuente: Elaboración propia.)

Dentro del marco del monitoreo continuo y evaluación de la condición del ventilador, la medición de los valores de flujo de O₂ son provechosas pueden aportar en [20]:

- **Evaluación de la eficiencia:** El flujo de O₂ puede utilizarse como una métrica para evaluar la eficiencia del ventilador. Cualquier disminución en el flujo de O₂ puede indicar un deterioro en el rendimiento del ventilador o una obstrucción en el sistema de escape de gases.
- **Control calidad proceso:** Variaciones inesperadas en el flujo de O₂ pueden indicar problemas en el proceso, como cambios en la composición del arrabio o desviaciones en la temperatura.
- **Detección de fugas:** Si hay una disminución repentina y significativa en el flujo de O₂, podría indicar la presencia de una fuga que requiere reparación.
- **Anomalías generales:** Cambios inesperados en el flujo de O₂ pueden indicar posibles problemas en el sistema.

6.5 Análisis de severidad vibratoria

En cuanto a la primera aproximación al estudio de las vibraciones del activo, es necesario evaluar los estados de severidad. El primer análisis corresponde al de las vibraciones en 4-H históricas dados sus valores de velocidad RMS, se tomó cada periodo de operación del ventilador extrayendo el valor de velocidad RMS asociado al soplado en el rango de frecuencias 10 Hz a 1000 Hz. El valor medio se tomó como baseline, con el propósito de establecer el estado de severidad se utiliza la norma ISO 10816-3, se definen límites operacionales para el activo. Para aquello primeramente se define el tipo de soportes de la máquina Ecuación 3, según el cual de manera práctica la máquina será de soportes rígidos si la velocidad en la que opera no supera el 75% del valor de la velocidad crítica.

$$\text{Velocidad rotación máquina} < 75\% \text{ Velocidad crítica} \quad (3)$$

Así para este caso, utilizando la primera velocidad crítica del ventilador:

$$1485 \text{ RPM} < 0.75 \cdot 2227 \text{ RPM}$$

\therefore Máquina de soportes rígidos

Se deben definir los valores de alarma y parada, estos se calculan en base a la Tabla 10 asociada a la norma, luego aplicando la Ecuación 4 se obtiene el valor de alarma para el ventilador.

$$\text{Alarma} = \text{Valor máquina buenas condiciones} + 25\% \text{ Mayor valor zona B} \quad (4)$$

$$\text{Alarma} = 3.09 + 0.25 \cdot 4.5 = 4,22 \text{ mm/s}$$

El valor de parada se debe establecer entre las zonas C y D de la Tabla 10 según indica la norma, en este caso aplicando criterio según las mediciones históricas se decide que un valor de 8.0 RMS corresponde a un valor excesivo claro como cota de parada.

Tabla 10: Máquinas tipo I norma ISO 10816-3. (Fuente: [21].)

Velocidad RMS mm/s	Tipo de soporte	
	Rígido	Flexible
Bajo 2.3	A	A
2.3-3.5	B	
3.5-4.5		C
4.5-7.1		
7.1-11.0	D	C
Sobre 11.0	D	D

Una mirada histórica de las velocidades RMS medidas, además de los niveles de alarma y parada o detención, se muestran en la Figura 18, gráfico asociado a velocidades RMS por operación utilizando una media móvil de tres muestras.

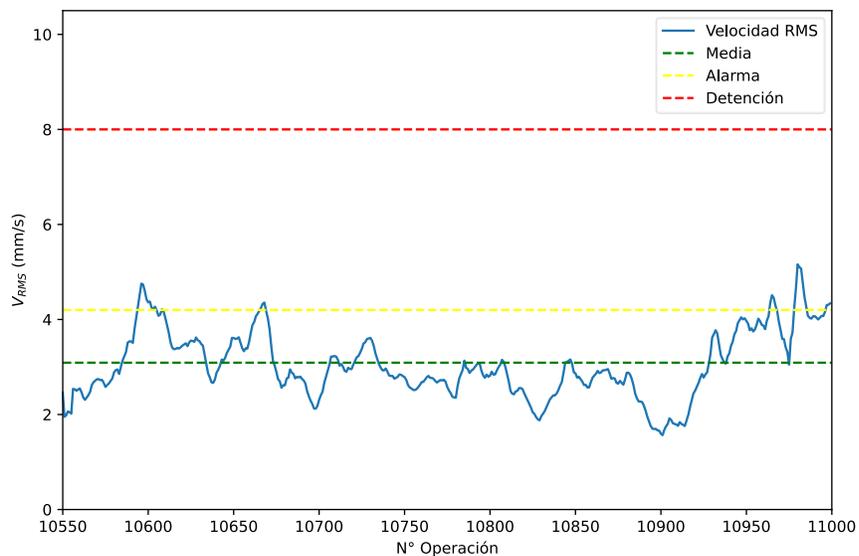


Figura 18: (a) Extracto tendencia RMS medición 4-H. (Fuente: Elaboración propia.)

De manera similar se establecen niveles de alarma y parada para el resto de los sensores Tabla 11.

Tabla 11: Valores de alarma y parada. (Fuente: Elaboración propia.)

	1-H	2-V	3-A	3-V	4-H
Baseline	2.9	3.5	2.4	2.4	3.0
Alarma	4.0	4.5	3.6	3.5	4.2
Parada	7.5	8.0	7.5	7.5	8.0

En conjunto con los valores de alarma y parada se decide incluir de forma un tanto más experimental valores de alarma para los valores de las componentes espectrales de los diferentes sensores del conjunto. Se determinan los valores promedio de funcionamiento en base a la información histórica ya recopilada, añadiendo dos valores de alarma en base al análisis estadístico del comportamiento.

En el contexto de los valores de alarma y parada, se puede considerar la inclusión de valores de alarma para las componentes espectrales de los diferentes sensores como un enfoque experimental. Para ello, se utiliza la información histórica ya recopilada para determinar los valores promedio de funcionamiento. Se agregan dos valores de alarma en base al análisis estadístico del comportamiento.

- **Alarma 1:** Este valor se establece como el valor promedio más una desviación estándar, busca notificar de un cambio en el valor de la tendencia de una componente espectral específica.
- **Alarma 2:** Corresponde a un nivel de alerta superior, se establece como un cambio en el 70% sobre el valor base, cambio sustancial en el valor de la componente espectral.

6.6 Análisis espectral

En este apartado se estudiará el espectro del activo, caracterizando el estado sano y el comportamiento asociado a las principales fallas. Uno de los fines específicos también es caracterizar comportamientos normales de ciertos armónicos espectrales para los diferentes sensores, para que dentro de la plataforma sea posible evaluar la tendencia de estas componentes y su cambio en el tiempo. Los espectros de referencia sanos correspondientes al ventilador y motor se muestran en la Figura 19 y Figura 20.

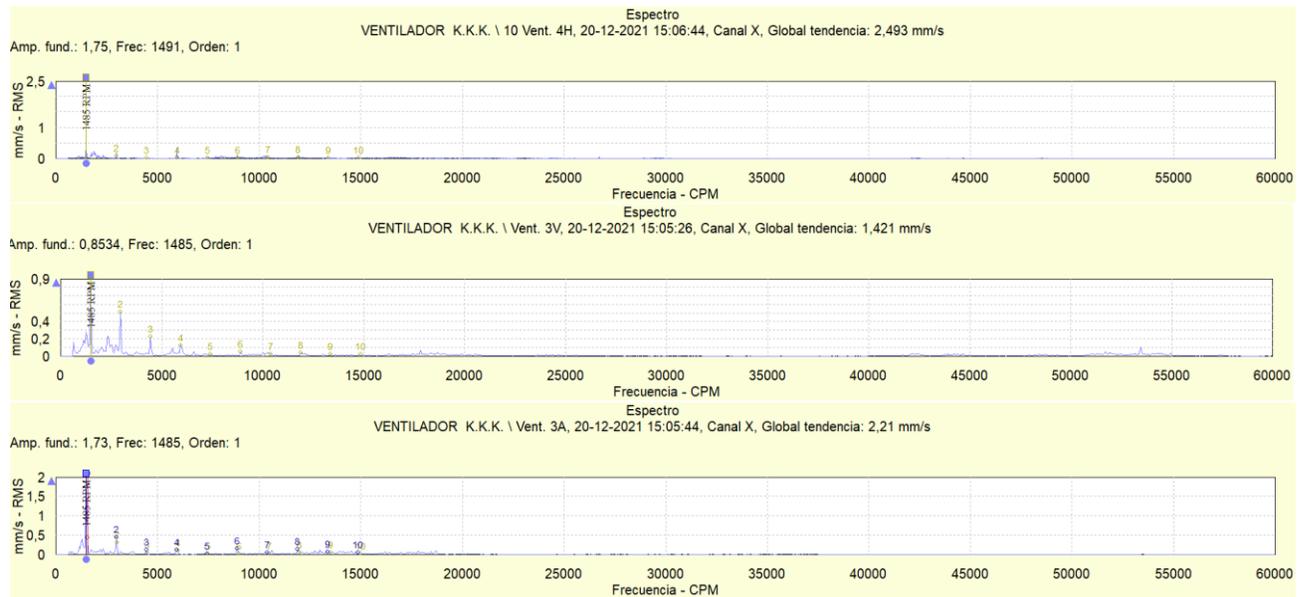


Figura 19: Espectro sano ventilador. (Fuente: Elaboración propia.)

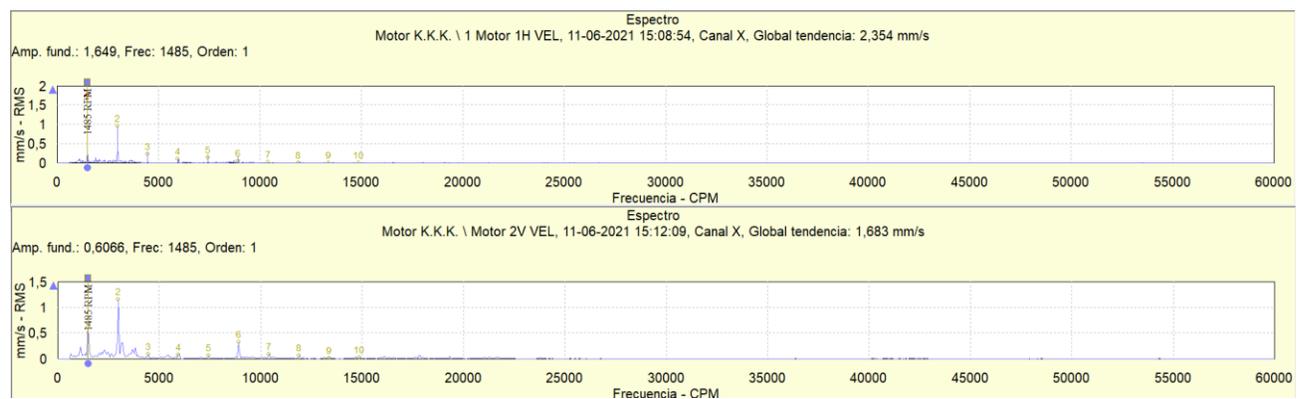


Figura 20: Espectro sano motor. (Fuente: Elaboración propia.)

6.6.1 Desbalanceamiento

Se compararon los gráficos espectrales basándose en los resultados obtenidos, analizando tanto el sistema en condiciones sanas como cada sistema afectado en sus componentes. El comportamiento espectral vinculado con el estado de desbalanceamiento se muestra en Figura 21, a priori es posible ver el aumento de la componente 1X en las mediciones radiales como también un gran aumento en el valor RMS de la medición.

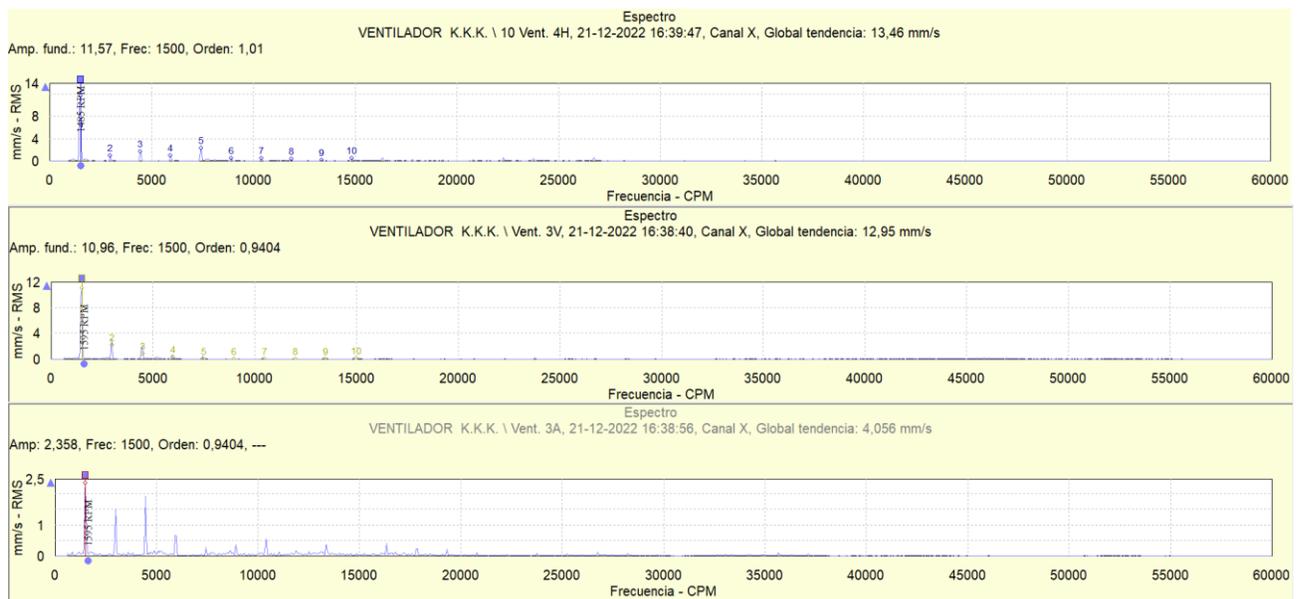


Figura 21: Espectro desbalanceamiento. (Fuente: Elaboración propia.)

El cambio de la componente principal de análisis 1X para los distintos puntos de medición se presenta en Tabla 12.

Tabla 12: Cambio componente 1X desbalanceamiento. (Fuente: Elaboración propia.)

	1X
4-H	78%
3-V	47%
3-A	6%

6.6.2 Desalineamiento

El segundo modo de falla a comparar con el espectro sano corresponde al de desalineamiento Figura 22. En este caso destaca el aumento de la componente 2X en las mediciones.

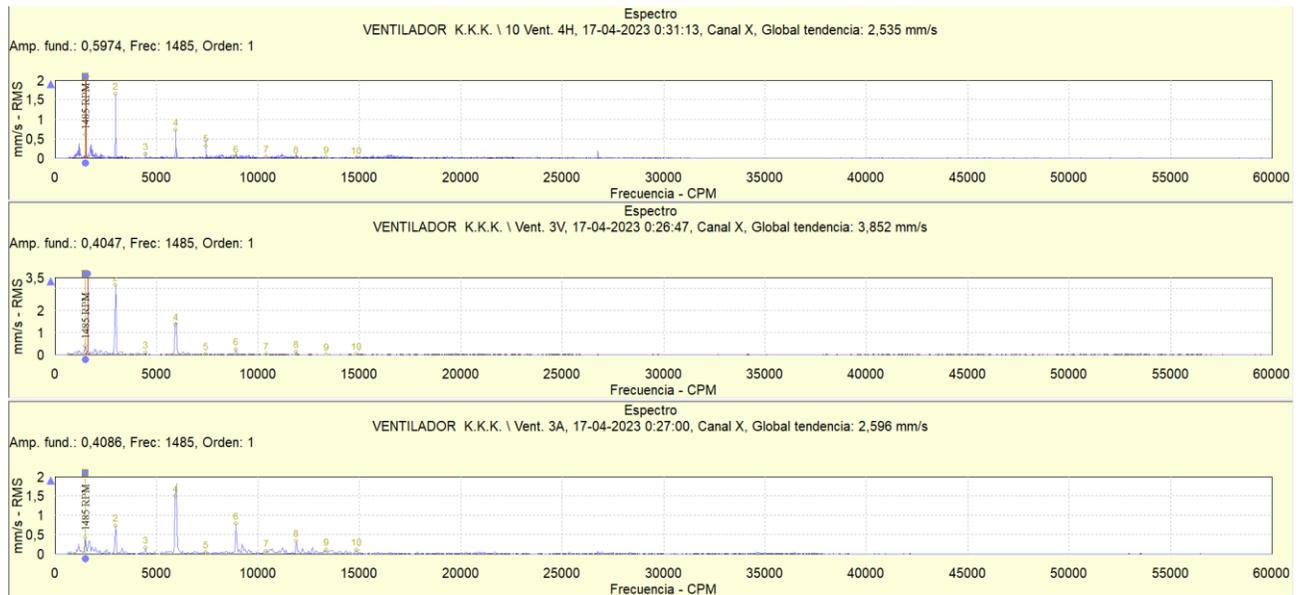


Figura 22: Espectro desalineamiento. (Fuente: Elaboración propia.)

El cambio porcentual de las primeras componentes se muestra en la Tabla 13, se observa preponderantemente el aumento de la componente 2X del sensor 4-H.

Tabla 13: Cambio componentes desalineamiento. (Fuente: Elaboración propia.)

	1X	2X	3X
4-H	-38%	250%	189%
3-V	-57%	106%	6%
3-A	-20%	20%	-15%

6.6.3 Solturas

Con relación al último modo de falla estudiado, se analiza la presencia de solturas Figura 23. En estas mediciones, se observa la aparición de múltiples componentes espectrales, como era de esperar, alcanzando incluso valores de hasta 10X, también acompañado de un incremento significativo en las mediciones RMS.

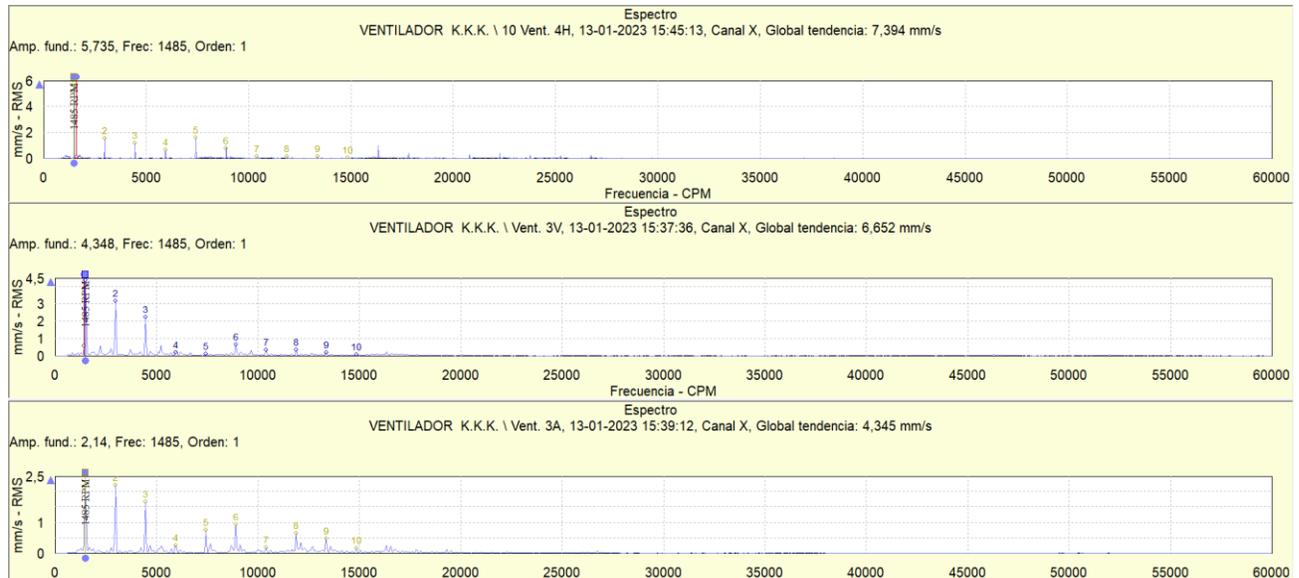


Figura 23: Espectro solturas. (Fuente: Elaboración propia.)

La evaluación de la variación de las componentes se muestra en la Tabla 14, el cambio notable se presenta en las componentes 2X y 3X del espectro, no así en la 1X.

Tabla 14: Cambio componentes solturas. (Fuente: Elaboración propia.)

	1X	2X	3X
4-H	-20%	372%	430%
3-V	22%	116%	156%
3-A	46%	90%	276%

6.7 Apartado diagnóstico de falla

Se propone agregar un algoritmo ML de diagnóstico de fallas basado en árboles de decisión como una funcionalidad adicional en la GUI, que pretenda dar un primer diagnóstico en caso de detección de fallas cumpliendo una función de apoyo para el analista. Sin embargo, es importante destacar que el análisis y la verificación definitiva del modo de falla debe ser realizados por un experto, pues existen modos de falla fuera del rango del modelo, además de chances de errar en la predicción de un evento.

La aplicación de árboles de decisión en la evaluación de diagnósticos de fallas en maquinaria rotatoria mediante el análisis de vibraciones se ha evaluado en estudios como [22] y [23] obteniendo resultados muy satisfactorios en tareas de clasificación.

Los árboles de decisión son un modelo de ML bastante utilizado que se basa en una estructura en forma de árbol para realizar predicciones. Estos árboles se construyen a partir de un conjunto de datos de entrenamiento y utilizan una serie de reglas de decisión para la división en subgrupos. Cada división se realiza en función de un atributo específico, siendo el objetivo reducir la impureza en cada división.

En cada nodo del árbol, se evalúa un atributo y se toma una decisión para seguir por una rama específica. Esta estructura jerárquica se extiende hasta las hojas del árbol, donde se asigna una etiqueta. El proceso descrito de construcción del árbol de decisión se basa en encontrar divisiones que reduzcan mayormente las impurezas en cada paso, esto está asociado a la ganancia de información entre nodos la cual es medida con la Ecuación 5. Se necesita una medida del nivel de impurezas, para el modelo final se utilizó el criterio de entropía dado por la Ecuación 6 [24].

$$IG(Y, X) = E(Y) - E(Y|X) \quad (5)$$

$$E(S) = - \sum_{i=1}^c p_i \log_2(p_i) \quad (6)$$

Donde:

- **$IG(Y, X)$** : Ganancia de información de X sobre Y.
- **$E(S)$** : Entropía asociada a un evento S.
- **p_i** : Probabilidad de seleccionar al azar un dato de la clase i .

Para diseñar el árbol de decisión se recopilan datos con información referente a los tres sensores del ventilador (4-H, 3-V y 3-A) utilizando los valores de los cinco primeros armónicos espectrales para cada uno, conteo total de quince atributos. Adicionalmente se incorpora información del estado del ventilador para llevar a cabo la tarea de clasificación, teniendo estados: normal, desbalanceado, desalineado y con solturas. El código puede ser consultado en Anexo A5: Códigos de programación.

El diseño y optimización del algoritmo se llevó a cabo principalmente utilizando la librería Sklearn [25] en lenguaje de programación Python. Para esto se creó una división de datos de prueba de un 20%, realizando una búsqueda de malla con validación cruzada con cinco divisiones, para la optimización de hiperparámetros del modelo. Se probó por lo tanto un total de 250 modelos distintos, una recopilación general de la información de esta primera parte con los hiperparámetros de análisis se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15: Información entrenamiento modelo. (Fuente: Elaboración propia.)

División entrenamiento-prueba	20%-80%
Particiones validación cruzada	5
Criterio división	Gini, entropía
Profundidad máxima	1,2,3,4,5
Mínimo de muestras por hoja	1,2,3,4,5
Mínimo de muestras para dividir	1,2,3,4,5

Los hiperparámetros del mejor modelo se presentan en la en la Tabla 16, para el cual se evaluaron diferentes métricas comunes. Se calcula el valor de la exactitud alcanzada según la Ecuación 7, para la cual se obtuvo un valor de 100% de exactitud tanto para los datos de entrenamiento como prueba.

$$Exactitud = \frac{\text{Número de predicciones correctas}}{\text{Total de predicciones}} \quad (7)$$

Tabla 16: Hiperparámetros árbol de decisión. (Fuente: Elaboración propia.)

Criterio de clasificación	Entropía
Profundidad máxima	4
Mínimo de muestras por hoja	1
Mínimo de muestras para dividir	3

El árbol de decisión a utilizar se muestra en la Figura 24, consta de nueve nodos. A medida que se desciende por el árbol, la entropía disminuye, lo cual indica que el modelo está capturando patrones y tomando decisiones más certeras a medida que se aproxima hacia las ramas inferiores. Las hojas puras alcanzadas al final del árbol representan regiones del espacio de características donde el modelo ha identificado la clase dominante.

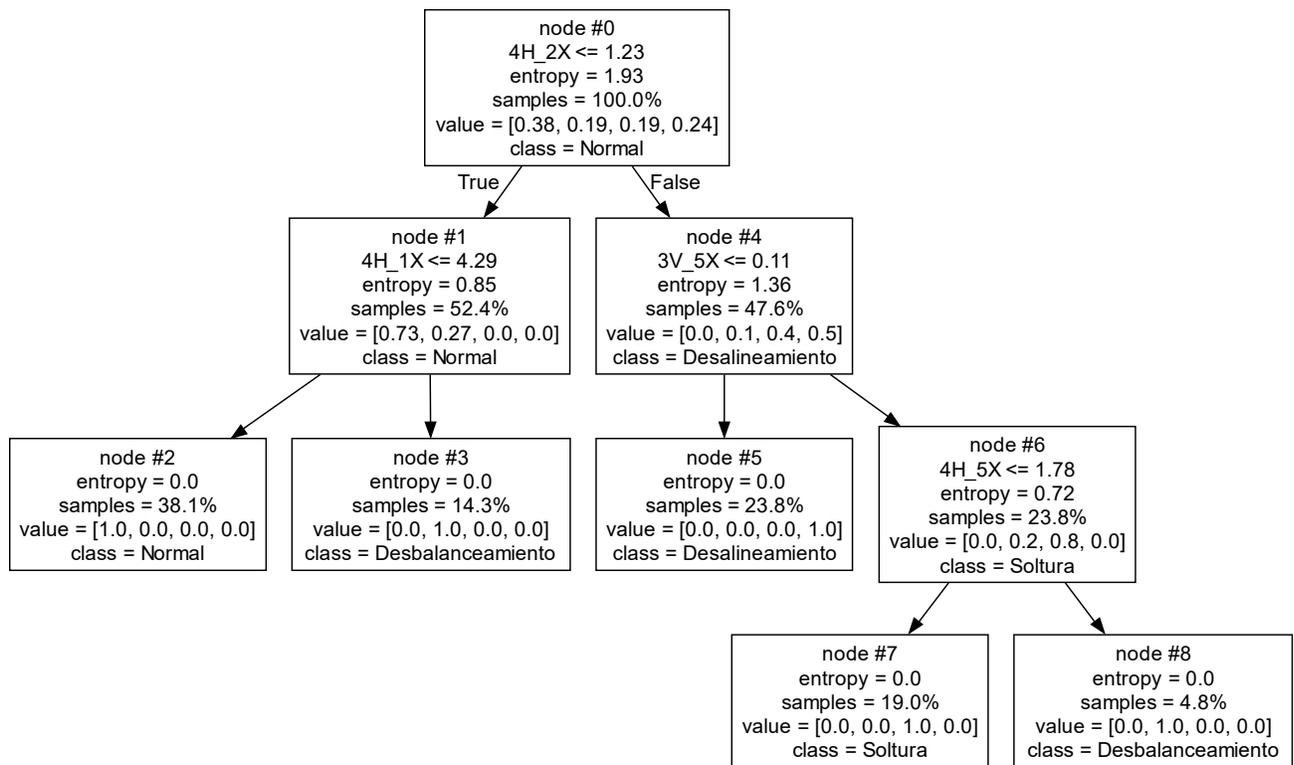


Figura 24: Algoritmo árbol de decisión. (Fuente: Elaboración propia).

La interpretación de este árbol de decisión permite entender el funcionamiento interno del modelo y es útil para verificar la lógica de las decisiones tomadas, comprobando la coherencia del modelo en especial teniendo en cuenta la información conocida del comportamiento espectral, vista en la sección Sección 6.6 para los modos de falla seleccionados.

Basado en la Figura 24, se observa que el árbol de decisión realiza la primera división de información en el nodo #0 utilizando la componente 2X del sensor 4H. Esta división genera dos grandes grupos que proporcionan la mayor ganancia de información. Al seguir por la rama afirmativa en el nodo #1, se aprecia que con solo una división se obtienen dos clases únicas. En este caso, el árbol utiliza la componente 1X del sensor 4H para realizar la siguiente división, esta elección tiene sentido desde un punto de vista mecánico, ya que específicamente la componente 1X es la que marca la diferencia en el caso de desbalanceo y sano, creando una clara distinción con respecto al caso normal en los nodos #2 y #3 generando consecuentemente hojas puras.

Por otra parte, la ramificación que se inicia en el nodo #4 utiliza un armónico de orden superior para llevar a cabo la clasificación, lo cual tiene sentido debido a la necesidad de diferenciar principalmente las clases de desalineamiento y soldaduras, la segunda mostrando claramente mayor magnitud en armónicos superiores al 3X. En este sentido, el algoritmo plantea una pregunta relacionada con la magnitud 5X del sensor 3V. Si dicha magnitud no supera el umbral establecido, el algoritmo clasificará la instancia en la clase desalineada. La última división de información ocurre en el nodo #6, donde se encuentra información referente a las clases de soldadura y desbalanceamiento. En este caso, el criterio de división resulta muy racional pues utiliza la componente 5X del sensor 4H, ya que reconoce la gran diferencia en el valor de este armónico entre ambas clases. Esta última división contribuye a lograr la máxima pureza en las hojas finales del árbol alcanzando una máxima pureza en sus terminaciones a nivel global.

CAPÍTULO 7: Diseño GUI

En este capítulo, se presentará en detalle la GUI propuesta para el monitoreo del Ventilador KKK. Se describirá la configuración de la pantalla, así como los diferentes apartados que la componen.

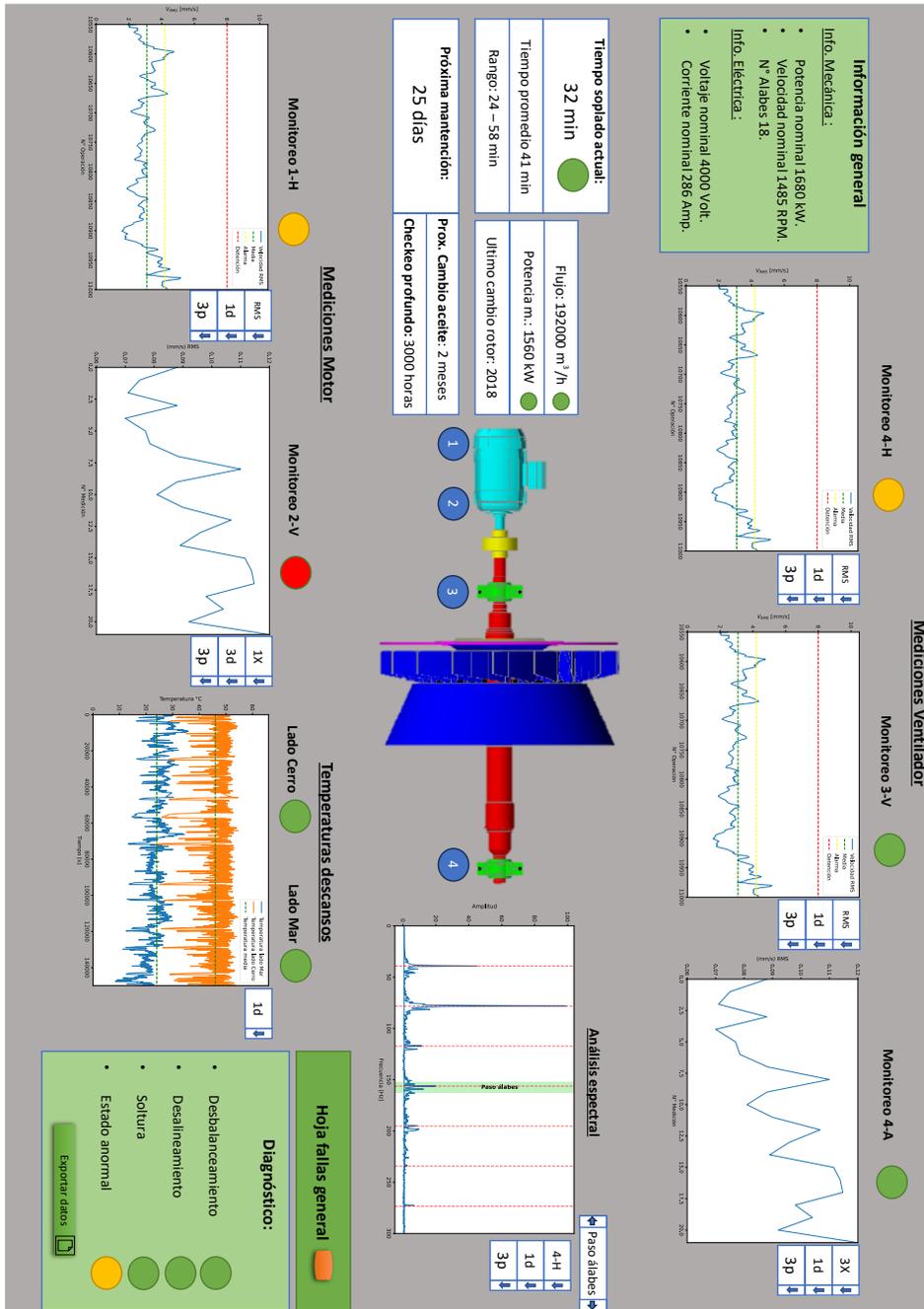


Figura 25: Diseño GUI Ventilador KKK. (Fuente: Elaboración propia).

La GUI Figura 25 ha sido diseñada de manera intuitiva y eficiente, con el objetivo de proporcionar a los usuarios una interfaz fácil de usar. A través de esta interfaz, los usuarios podrán acceder a información relevante sobre el funcionamiento del Ventilador KKK y realizar un monitoreo preciso de sus variables clave. Las decisiones de incorporación de apartados se basaron en la experiencia, diálogo con equipo, además de considerar las recomendaciones de normativa ISO 17359 [26], ISO 13373 [17].

La pantalla principal de la GUI se divide en varios apartados, cada uno de los cuales se centra en aspectos específicos del monitoreo, estos se verán y explicarán a continuación a lo largo del capítulo.

7.1 Información general

Este apartado se presenta como un recuadro conciso pero informativo que contiene datos básicos sobre el conjunto, tanto en términos mecánicos como eléctricos. Su objetivo principal es ser el punto de entrada inicial en la pantalla de análisis, brindando a los usuarios una visión general rápida y significativa del conjunto .

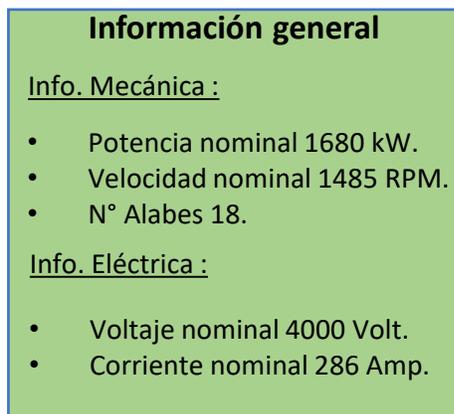


Figura 26: Recuadro de información general. (Fuente: Elaboración propia).

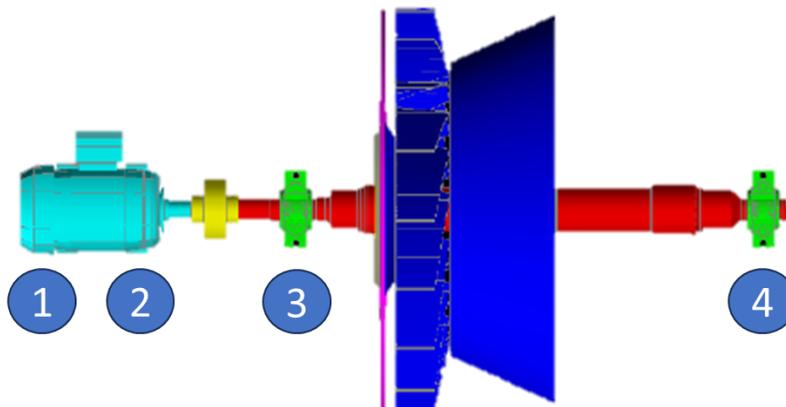


Figura 27: Diagrama conjunto GUI. (Fuente: Elaboración propia).

En relación a la información general adicional relevante del conjunto, es importante destacar el diagrama de la Figura 27. Este diagrama proporciona una visión clara de la disposición de las partes del conjunto, así como de los puntos de medición enumerados desde los cuales se realizan las lecturas necesarias. El diagrama es una herramienta visual fundamental que facilita la comprensión de la estructura y el funcionamiento del conjunto, al mismo tiempo que destaca los puntos críticos donde se toman las mediciones en tiempo real.

7.2 Mediciones de tendencias

Aquí se encuentran las cinco ventanas de medición referentes al ventilador y motor, a través de las cuales se podrá monitorear el estado de severidad vibratoria a través del valor RMS, y también el cambio de las magnitudes de componentes espectrales en el tiempo. Las mediciones de tendencias tendrán incorporado un “semáforo” indicativo del nivel de alerta asociado, pasando por los niveles: verde, amarillo, rojo, ascendentemente según en el nivel de peligro.

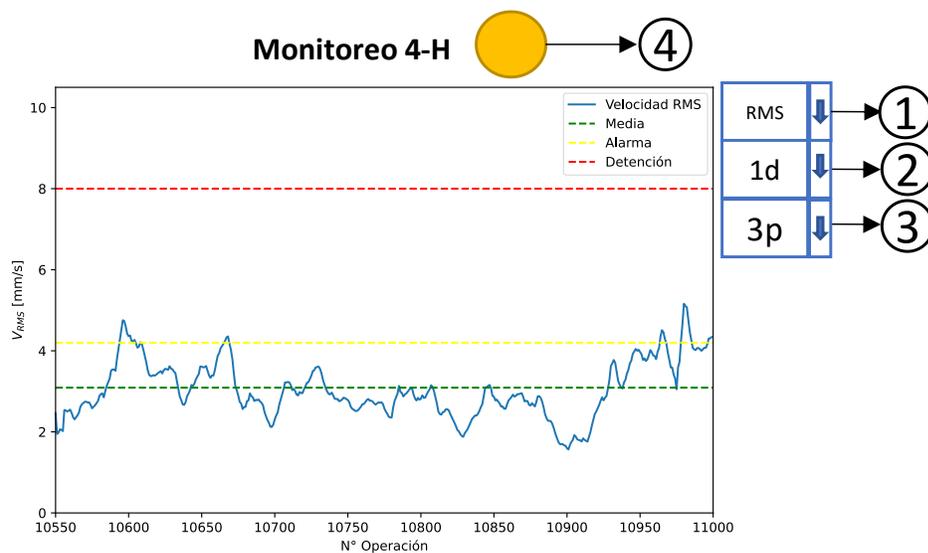


Figura 28: Recuadro tendencias. (Fuente: Elaboración propia).

- **P1. Tipo tendencia:** Permite seleccionar el valor a medir, pudiendo ser la velocidad RMS o de componentes espectrales, como por ejemplo 4X.
- **P2. Ventana temporal:** Selección de distancia temporal de medición, pudiendo entrar fechas en formato dd-mm-aa.

- **P3. Suavizado:** Herramienta de suavizado por medio de medias móviles, de utilidad para el analista al querer reducir variaciones identificando mejor el patrón de comportamiento. En este ejemplo se tiene un suavizado de 3 puntos como muestra.
- **P4. Semáforo:** Indicativo del estado de alarma según los niveles establecidos para el sensor específico.

7.3 Tiempo de soplado

En este apartado se muestra con un semáforo si el ventilador está operando o no lo está, en caso de estar en funcionamiento se muestra el tiempo actual transcurrido de soplado Figura 29. Adicionalmente se muestra la caracterización de estos tiempos, con los rangos normales y promedio de soplado.

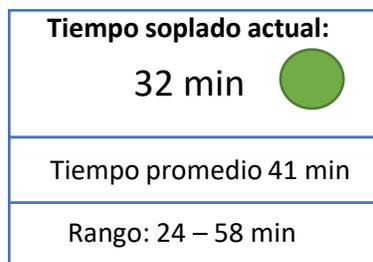


Figura 29: Tiempos de soplado. (Fuente: Elaboración propia).

Lectura de utilidad general del proceso, a partir de esta se podría deducir algún problema en la colada actual debido a una duración corta o excesiva respecto al tiempo normal de proceso, la causa subyacente del problema podría variar, se podrían iniciar acciones frente a la detección de un patrón.

7.4 Mantenición

En este apartado se resume la información asociada a los tiempos de mantenimiento del conjunto. Se establece dentro de tres periodos de tiempo Figura 30, fundamentado por fabricante [18].

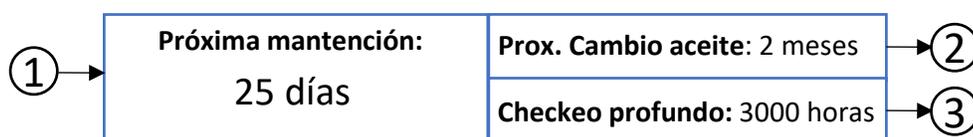


Figura 30: Tiempos de mantenimiento. (Fuente: Elaboración propia).

- **P1. Próxima mantención:** En primer lugar, se tiene la fecha de la próxima visita de mantenimiento programado asociado a la ruta, establecido por el equipo de mantenimiento.
- **P2. Próximo cambio de aceite:** Se recomienda realizar un cambio de aceite cada tres meses. Este tag proporcionará la información de la siguiente fecha en la que se debe realizar el cambio.
- **P3. Checkeo profundo:** Cada 10 000 horas de servicio, el fabricante recomienda fuertemente realizar una revisión profunda general ejecutada por un especialista, lo que incluye revisión de: rodete, rodamientos y eje, sellos del eje, acoplamiento y alineamiento.

7.5 Variables generales de proceso

Dentro de este apartado se encuentra información relevante sobre variables de proceso, como la potencia entregada por el motor, el estado del flujo, ambos con sus semáforos respectivos asociados a sus estados de alerta. Se incorpora adicionalmente la última fecha de cambio de rotor.

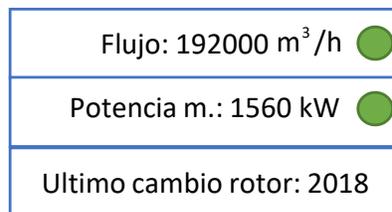


Figura 31: Variables generales proceso. (Fuente: Elaboración propia).

Dentro de esta categoría también se encuentra el monitoreo de temperaturas, se incluyen semáforos indicativos de estados de alerta, además de una caja de selección ventana de tiempo.

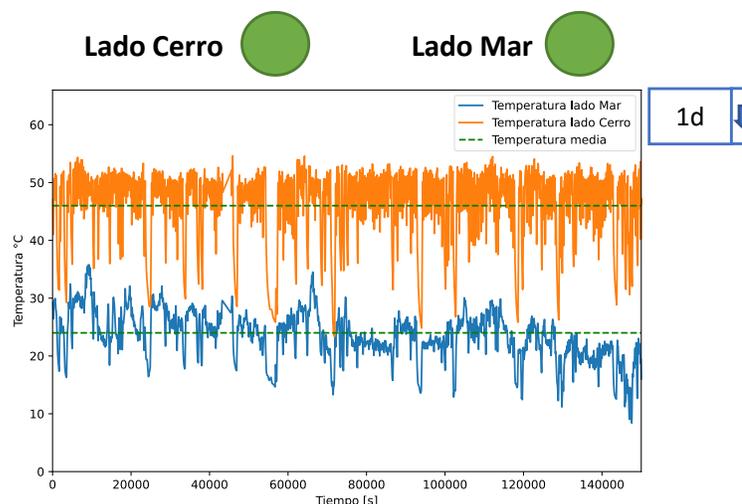


Figura 32: Mediciones de temperaturas GUI. (Fuente: Elaboración propia).

7.6 Ventana de espectro

Corresponde a una ventana fundamental dentro del monitoreo continuo para el análisis de los modos de falla y detección temprana de problemas. En la Figura 33 se muestra una forma de espectro ilustrativa, con las cajas de selección de sensor como de ventana de tiempo, será importante mostrar los armónicos de la frecuencia fundamental marcados como líneas rojas verticales en este ejemplo.

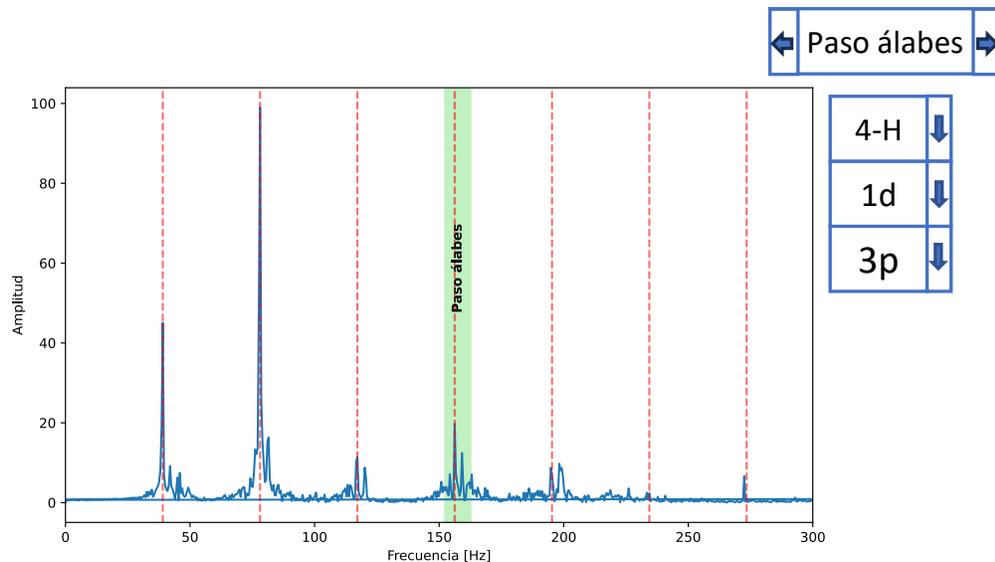


Figura 33: Ventana de espectro ilustrativa. (Fuente: Elaboración propia).

Se desea establecer una conexión entre la ventana de espectro y los puntos de tendencia asociados a cada punto de medición. De esta manera, al hacer clic en un punto de tendencia específico, se mostrará el espectro correspondiente en la ventana de espectro, ayudando a realizar un análisis más rápido e interactivo de la información.

Además, la integración con el software de SKF Observer ofrece varias ventajas y posibilidades de fácil implementación. Esto permite agregar componentes mecánicos de catálogo y proporcionar variables básicas de funcionamiento. A partir de esta información, se pueden identificar frecuencias relevantes para el análisis, como el paso de álabes, BPFI, BPFO, BSF y FTF. Esta funcionalidad adicional resultará útil tanto en este equipo como en otros, ya que proporciona información específica adicional. Sin embargo, para realizar una evaluación más exhaustiva, será necesario acceder al software y consultar información adicional, como análisis de aceleración, envolvente, etc.

7.7 Apartado diagnóstico

En esta última sección de la GUI, se proporciona acceso tanto a la hoja de fallas como al algoritmo asistente de diagnóstico desarrollado en la Sección 6.7.

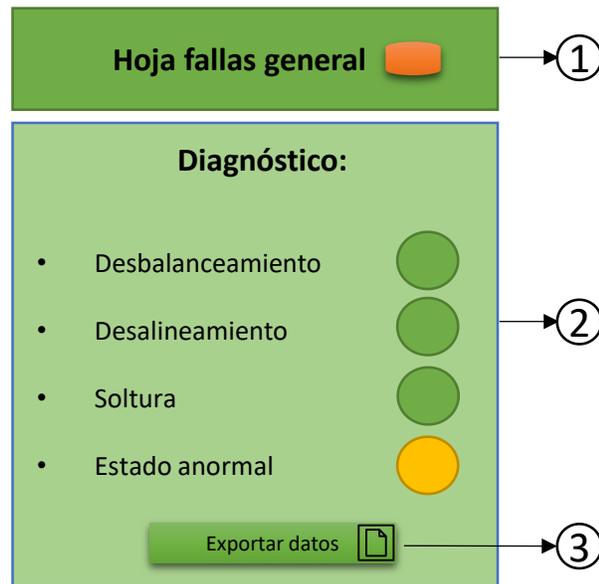


Figura 34: Apartado diagnóstico GUI. (Fuente: Elaboración propia).

- **P1. Hoja de fallas:** La primera parte entrega acceso a la hoja resumen de fallas, de utilidad como referencia de los principales modos de falla, las variables principales de diagnóstico y las acciones correctivas asociadas Tabla A. 3.
- **P2. Información diagnóstico:** Aquí se presenta la sección de diagnóstico basada en el algoritmo de árbol de decisión. Se muestran los diferentes modos de falla analizados junto con su correspondiente semáforo indicativo de detección. Además, se incluye un estado "anormal" que está relacionado con valores RMS elevados o altos valores de armónicos espectrales que pueden no cumplir necesariamente con las directrices establecidas por el árbol de decisión.
- **P3. Exportar datos:** Función integrada que permite exportar datos en formato .csv con el objetivo de realizar análisis de datos en alguna plataforma externa.

CAPÍTULO 8: Conclusiones y trabajos futuros

Durante la realización de este trabajo, se evidenció claramente la importancia fundamental de las perspectivas de monitoreo continuo y mantenimiento predictivo moderno en el enfoque del monitoreo por condición. Sin embargo, se identificó un amplio margen de mejora relacionado con la falta de transversalidad en la información, la baja adopción de tecnologías y las barreras burocráticas existentes. No obstante, las iniciativas de cambio recientemente ejecutadas como la inversión en nuevos equipos de monitoreo, actualización de softwares e integración de nuevos expertos intenta resolver problemáticas como la expuesta en el presente trabajo. En este sentido la creación de una plataforma de monitoreo de la mano de PI System resulta fundamental en la evaluación de variables clave automatizando en cierta medida la recopilación, organización y análisis de grandes volúmenes de datos.

En relación a la creación de la plataforma, es de vital importancia comenzar con la incorporación de un plan de trabajo claro que incluya procedimientos a seguir Figura 9. Esto resulta fundamental para brindar a los ingenieros de planta un camino confiable a seguir en el futuro, a medida que continúan mejorando los planes de monitoreo y mantenimiento. Este plan de trabajo se convierte en la piedra angular para lograr el escalado exitoso de este enfoque en el mantenimiento.

En relación al estudio e incorporación del ventilador KKK, se identificó que existe una cantidad considerable de información disponible, aunque aún no ha sido aprovechada de manera efectiva. Esta información es crucial para los ingenieros de planta y debe estar disponible de manera inmediata, ya que facilita su trabajo en el terreno y la comunicación con el equipo, especialmente considerando las dimensiones de la planta. Es fundamental utilizar esta información de manera fructífera.

Por lo mismo, el acceso a la información básica Tabla 6 y Tabla 7 debiese estar condensada y disponible para su rápido uso. De la misma manera, la caracterización del proceso en este caso el de soplado Figura 15, resulta de gran utilidad para conocer el proceso y comportamiento de operación normal, facilitando la detección de comportamientos alejados de la tendencia histórica.

La implementación de la norma ISO ISO 10816-3 y el análisis espectral para los modos de falla, funcionan como grandes aliados en la evaluación del estado del activo. Esto permitió establecer límites de lectura y mensajes claros en la GUI. Del análisis espectral resultó también clara la diferenciación de los tres modos de falla considerados, en línea con la literatura. Sin duda, la utilidad de ambos puntos descritos recae en el diagnóstico prematuro y toma de acciones cuestiones que son abordadas por los ingenieros de mantenimiento que tendrán una hoja de guía en la plataforma a través de la consulta de las hojas de resumen establecida Tabla A. 3.

Importante resultó también la integración del algoritmo de ML como ayudante en la detección de fallas, si bien este algoritmo respondió positivamente ante la evaluación de precisión y recuperación con un 100%, necesitará un periodo de marcha blanca para un ensayo apropiado teniendo en cuenta las limitantes de este tipo de algoritmos, como por ejemplo su tendencia a sobre ajuste. Adicionalmente no todas las variables del problema están incorporadas al entrenamiento del mismo

por lo que será labor del ingeniero encargado determinar las posibles causas de problemas subyacentes según el resto de información y herramientas dentro de la GUI.

Gracias a la implementación de nuevas herramientas y la ingeniería de datos, se espera una reducción significativa en los tiempos de mantenimiento imprevistos y las paradas no programadas. Esto se logrará mediante el acceso del personal a información relevante del activo y la integración de nuevas perspectivas a través de tags actualizados. En el futuro, será posible medir de manera tangible el impacto de estas mejoras una vez que la nueva plataforma esté completamente establecida. Esto se puede hacer mediante métricas de confiabilidad, como la disminución del tiempo medio entre fallas (MTBF), o a través del valor de Riesgo entregado por el PG-72-72001.

Dado que la plataforma se encuentra en proceso de construcción, aún hay varias cuestiones que deben abordarse para mejorar aún más los procedimientos asociados. Desde esta perspectiva, a continuación, se enumeran algunos trabajos futuros tanto dentro de la empresa como en investigación que se deben tener en cuenta:

- **Incorporación de nuevos activos:** Añadir nuevos activos críticos según el procedimiento detallado en el presente trabajo.
- **Establecer documentación básica:** Para cada activo crítico sería relevante tener un documento corto con información importante como: zona de operación, función, documentos clave disponibles, informes REAM, entre otros. Con el objetivo de estructurar la información disponible y agilizar el trabajo asociado al activo.
- **Estudio integrado fechas mantenimiento:** Sería muy útil integrar una herramienta que, utilizando la información de los tags disponibles y el estado actual, pueda indicar de manera directa si es necesario adelantar o posponer la fecha de mantenimiento, así como la cantidad de tiempo que se debería ajustar.
- **Mejora algoritmo ML detección fallas:** Existen varias oportunidades de mejora en este contexto. La inicial corresponde a la expansión del set de datos utilizado, incluyendo nuevos modos de falla y aumentando la cantidad de muestras generales disponibles. Además, se puede explorar la posibilidad de probar comparativamente otros algoritmos, como las redes neuronales convolucionales, evaluando la influencia de parámetros en detalle sobre la misma.

Bibliografía

- [1] PwC, “Predictive Maintenance 4.0: Predict the unpredictable”, 2017.
- [2] Deloitte University Press, “Making maintenance smarter: Predictive maintenance and the digital supply network”, 2017.
- [3] CAP Acero, “Memoria Integrada CSH”, 2021.
- [4] Grupo SKF, “Sistema SKF Multilog On-line IMx-8, monitoreo de condición”, 2020.
- [5] J. Lee, J. Ni, J. Singh, B. Jiang, M. Azamfar, y J. Feng, “Intelligent Maintenance Systems and Predictive Manufacturing”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 142, n° 11, nov. 2020, doi: 10.1115/1.4047856.
- [6] A. K. S. Jardine, D. Lin, y D. Banjevic, “A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, n° 7. pp. 1483–1510, octubre de 2006. doi: 10.1016/j.ymsp.2005.09.012.
- [7] M. Marseguerra, E. Zio, y L. Podofillini, “Condition-based maintenance optimization by means of genetic algorithms and Monte Carlo simulation”, 2002.
- [8] S. Gregerson y S. Reynolds, “The end of unplanned downtime in chemical manufacturing”, 2022.
- [9] OSIsoft, “A Four-Step Approach to Predictive Maintenance 4.0”, 2017.
- [10] R. K. Mobley, *An introduction to predictive maintenance*. Butterworth-Heinemann, 2002.
- [11] Pedro Saavedra, “Estrategias de mantenimiento, apunte mantenimiento predictivo UDEC”.
- [12] Pedro Saavedra, “Monitoreo de condición, apunte mantenimiento predictivo UDEC.”
- [13] Pedro Saavedra, “Tutorial severidad vibratoria parte I”. [En línea]. Disponible en: www.dim.udec.cl/lvm
- [14] OSIsoft, “A powerful match: AVEVA™ Predictive Analytics and the PI System™ maximize power plant ROI”.
- [15] Jonathan Lang, “Enabling the Industry 4.0 Ecosystem with Edge-to-Cloud Data Management”, 2021.
- [16] John Moubray, “Mantenimiento centrado en confiabilidad”.
- [17] International Organization for Standardization, “Condition monitoring and diagnostics of machines — Vibration condition monitoring”, 2021.
- [18] Kühnle Kopp and Kausch, “Service instructions radial fan KKK”.
- [19] SKF Group, “SKF Reliability Systems® Vibration Diagnostic Guide CM5003”.

- [20] T. Gustafson, H. Fan, I. T. Quinn, y R. Wroblewski, “Improving Fan System Performance - A Sourcebook for Industry”.
- [21] International Organization for Standardization, “Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurement of non-rotating parts”, 2009.
- [22] P. Lipinski, E. Brzychczy, y R. Zimroz, “Decision tree-based classification for planetary gearboxes’ condition monitoring with the use of vibration data in multidimensional symptom space”, *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, n° 21, pp. 1–17, nov. 2020, doi: 10.3390/s20215979.
- [23] M. Saimurugan, K. I. Ramachandran, V. Sugumaran, y N. R. Sakthivel, “Multi component fault diagnosis of rotational mechanical system based on decision tree and support vector machine”, *Expert Syst Appl*, vol. 38, n° 4, pp. 3819–3826, abr. 2011, doi: 10.1016/j.eswa.2010.09.042.
- [24] Juan Klopfer, “Machine learning with decision trees and random forests”.
- [25] Scikit-learn developers, “Sklearn decision Trees documentation”, 2023. <https://scikit-learn.org/stable/modules/tree.html>
- [26] International Organization for Standardization, “Condition monitoring and diagnostics of machines-General guidelines Surveillance et diagnostic d’état des machines-Recommandations générales”, 2002. [En línea]. Disponible en: www.iso.ch

Anexo A1: Carta Gantt del proyecto

Carta Gantt con la programación de actividades para alcanzar los objetivos fijados al comienzo del proyecto.

CARTA GANTT - Diseño plataforma de vigilancia en línea de equipos rotatorios en base a PI System

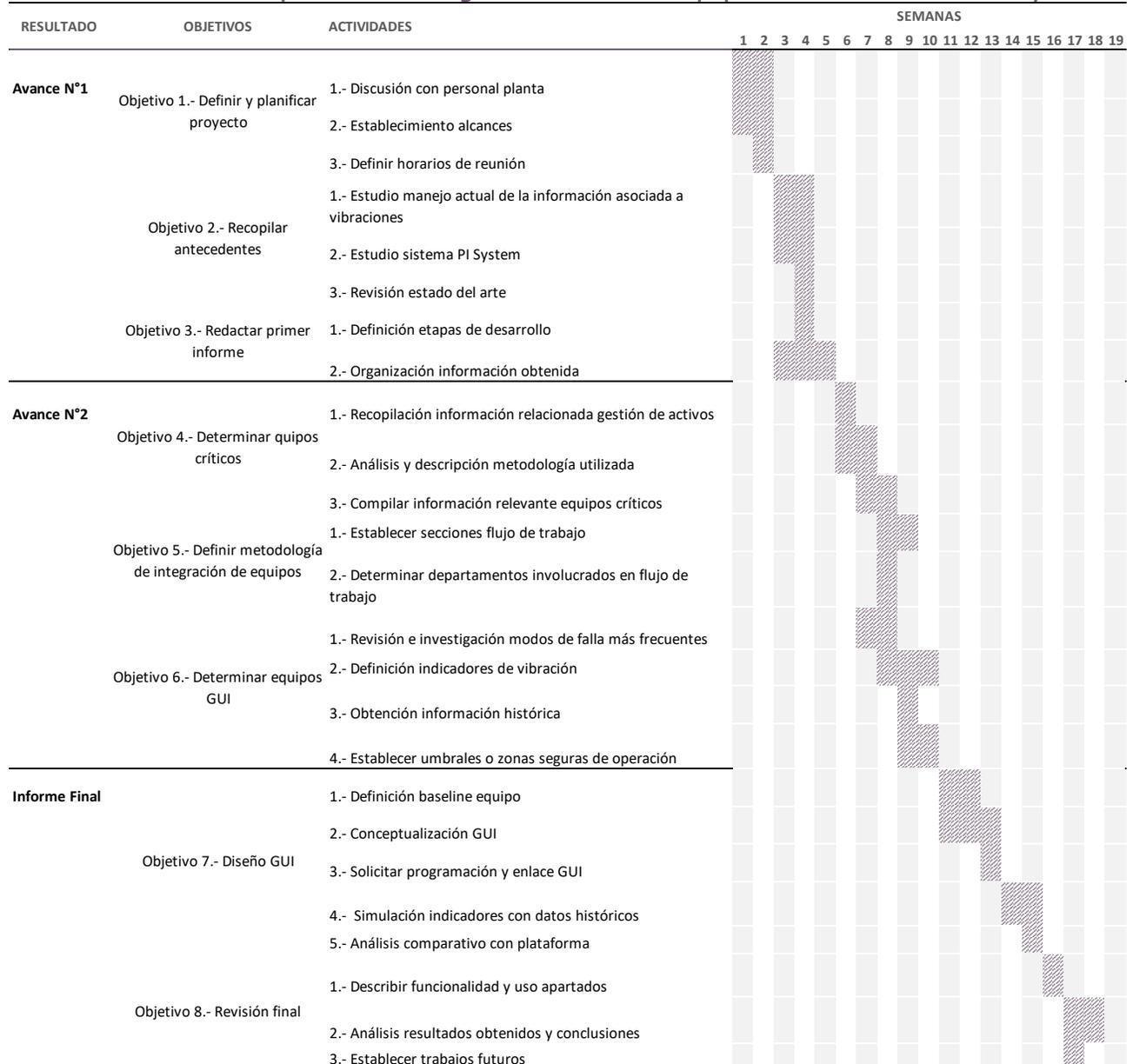


Figura A. 1: Carta Gantt proyecto. (Fuente: Elaboración propia.)

Anexo A2: Listado de activos críticos

Según los criterios de evaluación de confiabilidad establecidos por nuestra compañía, de acuerdo al PG-72-72001, se han identificado los activos críticos necesarios para mantener una operación continua. A continuación, se proporciona información relevante en las columnas correspondientes a cada conjunto.

Tabla A. 1:Listado de activos críticos operación continua CSH. (Fuente: Elaboración propia.)

Índice	Ruta	Conjunto	Puntos medición	Tipo monitoreo	Activo
1	LBR Laminación	G.C.C	9	Continuo	Guillotina
2	LBR Laminación	Reductor Laminador N°1	9	Continuo	Reductor
3	LBR Laminación	Reductor Laminador N°2	16	Continuo	Reductor
4	LBR Laminación	Reductor Laminador N°3	9	Continuo	Reductor
5	LBR Laminación	Reductor Laminador N°4	9	Continuo	Reductor
6	LBR Laminación	Reductor Laminador N°5	9	Continuo	Reductor
7	LBR Laminación	Reductor Laminador N°6	9	Continuo	Reductor
8	LBR Laminación	Reductor Laminador N°7	6	Continuo	Reductor
9	LBR Laminación	Reductor Laminador N°8	6	Continuo	Reductor
10	LBR Laminación	Reductor Laminador N°9	6	Continuo	Reductor
11	LBR Laminación	Reductor Laminador N°10	6	Continuo	Reductor
12	LBR Laminación	Reductor Laminador N°11	6	Continuo	Reductor
13	LBR Laminación	Reductor Laminador N°12	6	Continuo	Reductor
14	LBR Laminación	Reductor Laminador N°13	6	Continuo	Reductor
15	LBR Laminación	Reductor Laminador N°14	6	Continuo	Reductor
16	LBR Laminación	Reductor Laminador N°15	6	Continuo	Reductor
17	LBR Laminación	Reductor Laminador N°16	6	Continuo	Reductor
18	LBR Laminación	Reductor Laminador N°17	6	Continuo	Reductor
19	LBR Laminación	Reductor Laminador N°18	3	Continuo	Reductor
20	LBR Laminación	Caja Piñón	3	Continuo	Reductor
21	LBR Laminación	Pinch Roll N°2	6	Continuo	Pinch roll
22	LBR Laminación	Vent. Refrigeraciób N°1	1	Global	Ventilador
23	LBR Laminación	Vent. Refrigeraciób N°2	1	Global	Ventilador
24	LBR Laminación	Vent. Refrigeraciób N°3	1	Global	Ventilador
25	LBR Laminación	Vent. Refrigeraciób N°4	1	Global	Ventilador
26	LBR Laminación	Vent. Refrigeraciób N°5	1	Global	Ventilador
27	LBR Laminación	Vent. Refrigeraciób N°6	1	Global	Ventilador
28	LBR Laminación	Vent. Refrigeraciób N°7	1	Global	Ventilador
29	LBR Laminación	Vent. Refrigeraciób N°8	1	Global	Ventilador
30	LBR Laminación	Vent. Refrigeraciób N°9	1	Global	Ventilador

31	LBR Laminación	Vent. Refrigeraciób N°10	1	Global	Ventilador
32	LBR Laminación	Vent. Refrigeraciób N°11	1	Global	Ventilador
33	LBR Laminación	Vent. Refrigeraciób N°12	1	Global	Ventilador
34	LBR Laminación	Vent. Refrigeraciób N°13	1	Global	Ventilador
35	LBR Laminación	Vent. Refrigeraciób N°14	1	Global	Ventilador
36	LBR Laminación	Vent. Refrigeraciób N°15	1	Global	Ventilador
37	LBR Laminación	Vent. Refrigeraciób N°16	1	Global	Ventilador
38	LBR Laminación	Vent. Refrigeraciób N°17	1	Global	Ventilador
39	LBR Laminación	Vent. Refrigeraciób N°18	1	Global	Ventilador
40	LBT Laminación	B.G.V	7	Continuo	Bomba
41	LBT Laminación	C.F.E	7	Continuo	Guillotina
42	LBT Laminación	Laminador 15	1	Global	Pinch roll
43	LBT Laminación	Laminador 16	1	Global	Pinch roll
44	Acería	Ventilador K.K.K	14	Continuo	Ventilador
45	Acería	Vent. Desulfuración Norte	2	Global	Ventilador
46	Acería	Vent. Desulfuración Sur	2	Global	Ventilador
47	Altos Hornos N°2	Motriz Carro Skip	4	Continuo	Motor
48	Altos Hornos N°2	Estufas N°22	9	Continuo	Estufa
49	Altos Hornos N°2	Estufas N°23	9	Continuo	Estufa
50	Altos Hornos N°2	Estufas N°24	9	Continuo	Estufa
51	Altos Hornos N°2	Booster Cerro	3	Continuo	Bomba
52	Altos Hornos N°2	Booster Centro	3	Continuo	Bomba
53	Altos Hornos N°2	Soplador Norte	5	Continuo	Ventilador
54	Altos Hornos N°2	Soplador Sur	4	Continuo	Ventilador
55	Altos Hornos N°2	Recirculación Norte	6	Continuo	Bomba
56	Altos Hornos N°2	Recirculación Sur	6	Continuo	Bomba
57	Altos Hornos N°2	Bomba de Escoria	6	Continuo	Bomba
58	Altos Hornos N°2	Bomba de Reuso	6	Continuo	Bomba
59	Planta de Coque	Aspiradora "A"	2	Global	Bomba
60	Planta de Coque	Aspiradora "B"	2	Global	Bomba

Anexo A3: Límites espectrales

Con la intención de establecer límites y alarmas visibles para el personal, se proporcionan alarmas para las componentes de los sensores de estudio.

Tabla A. 2: Niveles de alarma componentes espectrales. (Fuente: Elaboración propia.)

Sensor	Variable	1X	2X	3X	4X	5X
4-H	Promedio	3,14	0,53	0,08	0,26	0,12
	Alarma 1	3,83	0,73	0,11	0,31	0,15
	Alarma 2	5,34	0,90	0,13	0,45	0,21
3-V	Promedio	2,95	1,36	0,39	0,18	0,12
	Alarma 1	3,45	1,56	0,59	0,22	0,15
	Alarma 2	5,02	2,30	0,66	0,31	0,20
3-A	Promedio	1,55	0,68	0,30	0,19	0,08
	Alarma 1	2,15	0,93	0,44	0,29	0,11
	Alarma 2	2,63	1,15	0,51	0,32	0,13
1-H	Promedio	3,02	1,07	0,21	0,14	0,14
	Alarma 1	3,42	1,34	0,24	0,17	0,15
	Alarma 2	5,14	1,81	0,36	0,24	0,24
2-V	Promedio	3,08	2,28	0,45	0,14	0,12
	Alarma 1	3,88	2,68	0,51	0,16	0,15
	Alarma 2	5,24	3,88	0,77	0,23	0,20

Anexo A4: Tabla resumen ventiladores centrífugos

Lineamientos generales de diagnóstico de falla y acciones correctivas para ventiladores centrífugos.

Tabla A. 3: Tabla resumen diagnóstico ventiladores centrífugos. (Fuente: Elaboración propia.)

Modo de falla	Sub 1X	1X	2X	≥3X	90° V-H	180° En acoplamiento	Observaciones	Acción correctiva
Desbalanceamiento		●			○		Diferencia de fase V-H mismo descenso, cercana a 90° o 270°.	Verificar causa, realizar limpieza rodete/álabes. Realizar balanceamiento de ser requerido.
Desalineamiento		●	○	○		●	Desfase 180° en ambos lados acoplamiento. Deseñe radial caso paralelo, desface axial caso angular.	Realizar alineamiento.
Solturas	○	●	●	●			Vibración radial predominante, genera gran cantidad de componentes. Forma de onda variable en cada giro del eje.	Buscar causa de soltura y corregir. Por ej: realizar apriete pernos base.
Distorsión carcasa		●	○			●	Primeros múltiplos 1X, 2X y 3X. La vibración axial es más significativa.	Ativar distorsión según causa. Por ej: Fuerzas externas, dilatación de elementos.
Holgura excesiva rodamientos		●	○	○			Predominante 1X con armónicos de baja amplitud. Suele estar asociada al desgaste.	Cambio de rodamientos.
Roce		●	●	●			Cambio forma onda temporal presencia de impactos.	Identificar causa raíz y corregir.

Esta tabla contiene los modos de falla más comunes en ventiladores centrífugos, expresa lineamientos generales.

● Indica síntomas que seguramente se observarán.

○ Indica síntomas que podrían o no estar presentes.

Anexo A5: Códigos de programación

Se comparten los códigos utilizados durante la realización del proyecto a través del siguiente [enlace](#), el cual dirige al repositorio en GitHub donde se encuentran alojados. Dentro de la página está cada archivo utilizado con una descripción general de la función y utilidad en el contexto del desarrollo del proyecto.