

Universidad Nacional de Mar del Plata

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Eléctrica

**“Plan de Mantenimiento y Mejoras basado en Termografía y
Vibraciones. Caso de Estudio: Carpintería Industrial”**

Autor

Nombres y Apellidos: Asier Hormaechea

DNI: 37399998 Nro. Legajo Alumno:9514

Mail de contacto: hormaecheasier@gmail.com

Carrera Ingeniería: Ingeniería Electromecánica

Director/es del Proyecto

Director: Dr.Ing. Justo José Roberts

Codirector: Ing. Oscar Trevisani

Mar del Plata, 31, de julio de 2024



RINFI es desarrollado por la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Universidad Nacional de Mar del Plata

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Eléctrica

**“Plan de Mantenimiento y Mejoras basado en Termografía y
Vibraciones. Caso de Estudio: Carpintería Industrial”**

Autor

Nombres y Apellidos: Asier Hormaechea

DNI: 37399998 Nro. Legajo Alumno:9514

Mail de contacto: hormaecheasier@gmail.com

Carrera Ingeniería: Ingeniería Electromecánica

Director/es del Proyecto

Director: Dr.Ing. Justo José Roberts

Codirector: Ing. Oscar Trevisani

Mar del Plata, 31, de julio de 2024

Proyecto Final de Grado

Julio . 2024

Plan de Mantenimiento y Mejoras basado en Termografía y Vibraciones. Caso de Estudio: Carpintería Industrial

Autor:

Hormaechea, Asier

Ingeniería Electromecánica

Legajo: 9514

Tutor:

Dr. Ing. Roberts, Justo José

Co-tutor:

Ing. Trevisani, Oscar

Evaluadores:

Ing. Murcia, Guillermo (Dto. Ingeniería Eléctrica)

Mg. Ing. Morcela, Antonio (Dto. Ingeniería Industrial)

Ing. Barbano, Federico (Dto. Ingeniería Mecánica)

RESUMEN

En el mundo industrial moderno, el mantenimiento se ha convertido en un componente esencial para garantizar el funcionamiento eficiente y seguro de las instalaciones y maquinaria. El mantenimiento industrial abarca un conjunto de actividades planificadas y acciones correctivas que tienen como objetivo principal mantener y optimizar el rendimiento de los equipos, infraestructuras y procesos productivos en diversos sectores industriales.

La industria en Mar del Plata se caracteriza por estar compuesta mayoritariamente por PyMEs familiares. En muchos casos no se aplican los conceptos y metodologías modernos del mantenimiento industrial. Esta problemática común en la ciudad no permite a estas empresas familiares utilizar todo el potencial de sus equipos e instalaciones y, de esa manera, reduce la competitividad de las mismas en el mercado.

El presente proyecto pretende estudiar la implementación teórica de un plan de mantenimiento y mejoras con la adecuación de tecnologías modernas del mantenimiento industrial a un caso de estudio real representativo de esta problemática. Dicho caso es el de una carpintería industrial de más de 50 años en la ciudad ubicada en la zona de los alrededores del puerto de Mar del Plata.

El objetivo es auditar e identificar las necesidades y falencias en el mantenimiento y su gestión en el caso de estudio. Sobre este escenario, establecer los lineamientos para la creación de un departamento de mantenimiento dentro de la estructura organizacional y las tareas que se realizarían para dar respuesta a dichas necesidades.

El proyecto se enfoca en el desarrollo de un marco teórico e histórico del mantenimiento, centrándose en las metodologías de mantenimiento predictivo de termografía infrarroja y análisis de vibraciones. Se realiza un relevamiento físico y una auditoría de gestión donde se identifican las necesidades del caso de estudio, se crea una lista completa de activos, se elabora un plan de mantenimiento eléctrico y mecánico y se propone un plan de mejoras que aborda las necesidades identificadas.

En líneas generales, el proyecto debe reafirmar la importancia de la aplicación del mantenimiento industrial y la ingeniería. Su contribución a la optimización y potenciamiento de equipos y procesos en base a las tecnologías y herramientas de gestión modernas.

Palabras clave: Mantenimiento industrial, Análisis de vibraciones, Termografía Infrarroja, Plan de mantenimiento, Sistemas de Gestión.

ABSTRACT

In the modern industrial world, maintenance has become in an essential component to ensure the safe and efficient function of machinery and facilities. Industrial maintenance involves a set of planned activities and corrective actions whose main objectives are maintain and optimize the performance of equipment, infrastructure and production process in various industrial sectors.

Industry in Mar del Plata is characterized by the fact that it is mainly composed of family-owned SMEs. In many cases, modern industrial maintenance concepts and methodologies are not applied. This common problem in the city does not allow this family business use the full potential of their equipment and facilities and, thus, lower their competitiveness in the market.

This project aims to study the theoretical implementation of a maintenance and improvements plan with the adaptation of modern industrial maintenance technologies to a real case of study representative of this issue. This case is that of a 50 years old family carpentry workshop located at the port area of Mar del Plata.

The objective is to audit and identify the needs and shortcomings of maintenance and its management in the case of study. In this context, establish the guidelines for the creation of a maintenance department within the organizational structure and the tasks that would be performed to address these needs.

The project is centered on the development of a theoretical and historical framework of maintenance, focusing on predictive maintenance methodologies of infrared thermography and vibration analysis. A physical survey and a management audit is carry out where the needs of the case of study are identified, a complete list of assets is created, an electrical and mechanical maintenance plan is developed and an improvement plan is proposed to address the identified needs.

In general terms, the project should restate the importance of the application of industrial maintenance and engineering. Their contribution to the optimization and enhancement of equipment and processes based on modern technologies and management tools.

Keywords: Industrial Maintenance, Vibration Analysis, Infrared Thermography, Maintenance Plan, Management Systems.

ÍNDICE

RESUMEN.....	ii
ABSTRACT.....	iii
ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 PRESENTACIÓN DEL PROYECTO.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.3 OBJETIVOS	1
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.5 METODOLOGÍA.....	2
1.6. CONTENIDO	3
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. EVOLUCIÓN DEL MANTENIMIENTO	4
2.1.1. MANTENIMIENTO CORRECTIVO	4
2.1.2. MANTENIMIENTO PREVENTIVO.....	4
2.1.3. MANTENIMIENTO PREDICTIVO	5
2.1.4. TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO AVANZADAS.....	5
2.1.5. INDUSTRIA 4.0	7
2.1.6. ESTADO ACTUAL DEL MANTENIMIENTO	9
2.2. GENERALIDADES DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO.....	13
2.2.1. ANÁLISIS DE ULTRASONIDO	14
2.2.2. ANÁLISIS DE ACEITE.....	15
2.2.3. ANÁLISIS DE HUMOS	15
2.3. ANÁLISIS DE VIBRACIONES	15
2.3.1. INTRODUCCIÓN A LAS VIBRACIONES.....	16
2.3.2. ADQUISICIÓN DE DATOS.....	25
2.3.3. TRATAMIENTO DE DATOS	36
2.3.4. TÉCNICAS DE ANÁLISIS.....	48
2.3.5. ANÁLISIS DE FORMA DE ONDA EN EL TIEMPO	51
2.3.6. NORMAS DE REFERENCIA	52
2.4. TERMOGRAFÍA INFRARROJA.....	58
2.4.1. FUNDAMENTOS DE LA RADIACIÓN TÉRMICA	58
2.4.2. LOS SISTEMAS TERMOGRÁFICOS	66

2.4.3.	NORMATIVAS RESPECTO A TERMOGRAFÍA	70
3.	METODOLOGÍA Y RESULTADOS	71
3.1.	AUDITORÍA Y RELEVAMIENTO	74
3.1.1.	AUDITORÍA	74
3.1.2.	RELEVAMIENTO DE PLANTA	85
3.1.3.	CONCLUSIONES SOBRE LA AUDITORÍA Y RELEVAMIENTO	89
3.2.	IDENTIFICACIÓN DETALLADA DE ACTIVOS	90
3.2.1.	INFRAESTRUCTURA	90
3.2.2.	CRITICIDAD	92
3.2.3.	LISTA DE ACTIVOS PARA MANTENIMIENTO	94
3.3.	PLAN DE MANTENIMIENTO.....	115
3.3.1.	MANTENIMIENTO ELÉCTRICO	115
3.3.2.	MANTENIMIENTO MECÁNICO.....	134
3.3.3.	ALMACÉN DE REPUESTOS.....	160
3.3.4.	ANÁLISIS DE FALLOS.....	163
3.4.	PLAN DE MEJORAS	171
3.4.1.	INDICADORES.....	171
3.4.2.	ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL.....	179
3.4.3.	FORMACIÓN.....	193
3.4.4.	PROCEDIMIENTOS Y EQUIPOS.....	198
4.	CONCLUSIONES	205
5.	BIBLIOGRAFÍA	206
	APÉNDICE: AUDITORÍA DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO	210

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.6.2 Nivel de automatización de MRO en 2018 según la consultora PRG. [5]	10
Figura 2.1.6.3 Nivel de adopción de tecnología 4.0 por tipo de empresa en Argentina en el 2019 según el Ministerio de Desarrollo Productivo.....	11
Figura 2.1.6.4 Caracterización de economías mundiales por nivel de implementación de tecnologías de PDA en 2019 según ONUDI. [7].....	12
Figura 2.1.6.5 Especificación de países agrupados por nivel de implementación de tecnologías de PDA en 2019 según ONUDI. [7].....	13
Figura 2.3.1.1 Sistema masa-resorte sin rozamiento.	16
Figura 2.3.1.2 Oscilación Subamortiguada. [13].....	19
Figura 2.3.1.3 Componentes de la Vibración Forzada Amortiguada sin resonancia [12]	20
Figura 2.3.1.4 Resonancia. [14]	21
Figura 2.3.1.5. Vista de una señal en el dominio del tiempo y la frecuencia. [15].....	24
Figura 2.3.2.1 Resonancia del acelerómetro atornillado a la estructura. [17]	29
Figura 2.3.2.2 Resonancia del acelerómetro montado con cera de abeja. [17]	30
Figura 2.3.2.3 Resonancia del acelerómetro montado con un imán permanente. [17]	30
Figura 2.3.2.4 Resonancia del acelerómetro acoplado con cementos de contacto. [17]	31
Figura 2.3.2.5 Resonancia del acelerómetro atornillado con perno aislado y arandela de mica. [17]	31
Figura 2.3.2.6 Resonancia del acelerómetro con punta de prueba apoyado con la mano. [17]	32
Figura 2.3.2.7 Componentes espectrales de base muy ancha indican un mal apoyo. [12]... ..	35
Figura 2.3.3.1 Modulación en amplitud. [12].....	36
Figura 2.3.3.2 Espectro de frecuencia de una señal modulada [12]	36
Figura 2.3.3.3 Transformación de una señal analógica en una digital. [12]	37
Figura 2.3.3.4 Proceso de conversión Analógica/Digital. [12].....	38
Figura 2.3.3.5 Amplificación/atenuación de circuitos integradores. [12]	39
Figura 2.3.3.6 Oscilación con distintos valores de SRN. Parte 1. [12]	40
Figura 2.3.3.7 Oscilación con distintos valores de SRN. Parte 2. [12]	41
Figura 2.3.3.8 Oscilación con distintos valores de SRN. Parte 3. [12]	41
Figura 2.3.3.9 Filtro pasa-bajo. [12]	43
Figura 2.3.3.10 Filtro pasa-alto. [12]	43
Figura 2.3.3.11 Error de análisis del FFT con una ventana incorrecta. [12].....	46
Figura 2.3.3.13 Onda senoidal antes y después de multiplicar por la función Hanning. [12] ..	47
Figura 2.3.3.14 Señal aplanada para la ventana Flattop. [12]	48
Figura 2.3.3.15 La onda azul es el “alias” de la onda roja real. [12]	48

Figura 2.3.4.1. Ejemplo del espectro de frecuencias de oscilaciones subarmónicas y armónicas. [12]	49
Figura 2.3.4.2 Cascada espectral. [12].....	51
Figura 2.3.5.1 Forma de onda en el tiempo. [12].....	52
Figura 2.3.6.1 Tabla Rathbone de criterios de vibración. [12]	53
Figura 2.4.1.1 Espectro electromagnético y sus bandas características. [19].....	59
Figura 2.4.1.2 Emitancia radiante espectral de un cuerpo negro. [8].....	62
Figura 2.4.1.3 Curvas de Planck trazadas sobre escalas marcadas desde 100°K a 1000°K. [8]	63
Figura 2.4.1.4 Energía incidente sobre un cuerpo y los 3 procesos térmicos posibles que ocurren. [19].....	64
Figura 2.4.2.1 Representación esquemática de los parámetros y elementos en la medición termográfica. Siendo 1: entorno, 2: objeto, 3: atmósfera y 4: sensor. [8].....	68
Figura 3.1.1.1 Cuadro de encabezado de la auditoría.....	74
Figura 3.1.1.2 Cuadro base de auditoría. De izquierda a derecha: Numeración, pregunta, respuestas y observaciones. Debajo puntaje total y porcentual.	75
Figura 3.1.1.3 Cuadros finales de la auditoría. Puntajes totales y máximos e índice de conformidad.....	75
Figura 3.1.1.4 Preguntas y respuestas de la auditoría sobre la identificación de activos.....	76
Figura 3.1.1.5 Preguntas y respuestas de la auditoría sobre la infraestructura física interna.	77
Figura 3.1.1.6 Preguntas y respuestas de la auditoría sobre la criticidad de activos.	78
Figura 3.1.1.7 Preguntas y respuestas de la auditoría sobre el plan de mantenimiento.	78
Figura 3.1.1.8 Preguntas y respuestas de la auditoría sobre los repuestos.....	79
Figura 3.1.1.9 Preguntas y respuestas de la auditoría sobre el análisis de fallas.....	80
Figura 3.1.1.10 Preguntas y respuestas de la auditoría sobre los KPI.	81
Figura 3.1.1.11 Preguntas y respuestas de la auditoría sobre la gestión del mantenimiento.	82
Figura 3.1.1.12 Preguntas y respuestas de la auditoría sobre la formación de personal.	83
Figura 3.1.1.13 Preguntas y respuestas de la auditoría sobre procedimientos y equipos.....	83
Figura 3.1.1.14 Índice de conformidad por categoría y el general de la auditoría.....	85
Figura 3.1.2.1 Nave principal desde el sector de depósito de materia prima, a la izquierda el sector de etapa inicial, a la derecha materia prima apilada y las mesas de mecanizado a mano. Al fondo la entrada a la nave de melamina junto a los dos tupíes.	86
Figura 3.1.2.2 Nave principal desde la entrada de personas. A la derecha la entrada al galpón de madera, en el centro las dos lijadoras de banda y al fondo a la izquierda los tupíes y la entrada al galpón de melamina.....	87
Figura 3.1.2.3 Esquema de planta con la ubicación de los equipos.	88
Figura 3.2.1.1 Clasificación de medidas de control de riesgos según su impacto en las tareas o procesos. [27]	91

Figura 3.2.2.1 Criterios de probabilidad de ocurrencia del análisis de criticidad.....	93
Figura 3.2.2.2 Criterios de impacto de falla del análisis de criticidad.....	93
Figura 3.2.2.3 Matriz de selección de criticidad del análisis de criticidad de activos.....	94
Figura 3.2.3.1 A1S/1: Sierra sin fin de 5,5kW de potencia.	95
Figura 3.2.3.2 A1S/2: Sierra sin fin de 3kW de potencia marca Maschinenbau Scholz.	96
Figura 3.2.3.3 A1G/1: Garlopa de 4kW de potencia marca Maschinen-Werke Gubisch.....	96
Figura 3.2.3.4 A1G/2: Garlopa de 4kW de potencia.	97
Figura 3.2.3.5 A2C/1: Cepilladora de 0,22kW de potencia.	98
Figura 3.2.3.6 A2C/2: Cepilladora de 0,37kW de potencia marca L'Invincible.....	99
Figura 3.2.3.7 A2E: Escuadradora SAC Klass 35 de 4,75kW de potencia marca Höchsmann.	100
Figura 3.2.3.8 AC: Compresor de 2,2kW de potencia marca Metalúrgica Modenesi.	100
Figura 3.2.3.9 AE/1: Motor 1 del sistema de extracción general de 4kW de potencia.	101
Figura 3.2.3.11 B1T/1: Tupí de 3,5kW de potencia marca Maschinen-Werke Gubisch.	102
Figura 3.2.3.12 B1T/2: Tupí de 3,5kW de potencia marca Fórmula T1 MiniMax.	103
Figura 3.2.3.13 B1F: Fresadora CNC ALFA CENTAURO.	103
Figura 3.2.3.14 B1TB: Taladro de banco de 1,5kW de potencia.	104
Figura 3.2.3.15 B1E/1: Escopladora de 3kW de potencia.	105
Figura 3.2.3.16 B1E/2: Escopladora de 3kW de potencia.	105
Figura 3.2.3.17 B2C: Lijadora de contacto de 5,3kW de potencia marca Farven.	106
Figura 3.2.3.18 B2B/1: Lijadora de banda de 4kW de potencia.....	107
Figura 3.2.3.19 B2B/2: Lijadora de banda de 4kW de potencia.....	107
Figura 3.2.3.20 Prensa hidráulica en caliente marca Marzica. Al 2023 la más grande de la ciudad de Mar del Plata.	108
Figura 3.2.3.21 B2TP: Tablero principal. Controla la iluminación del galpón y la distribución.	109
Figura 3.2.3.22 C1P: Pegadora de cantos de puertas placa de 1,5kW de potencia.	109
Figura 3.2.3.23 C1R: Refiladora de esquinas.....	110
Figura 3.2.3.24 C2A: Agujereadora múltiple SYSTEM 23 de 1,5kW de potencia marca Maggi.	111
Figura 3.2.3.25 C2P: Pegadora de cantos OAV PEGASUS MAX 340M de 1kW de potencia.	112
Figura 3.2.3.26 C3C: Compresor de cabina de pintura de 1,1kW de potencia.	112
Figura 3.2.3.27 C3P: Cabina de pintura.	113
Figura 3.2.3.28 CIE: Tablero del compresor de la cabina de pintura y alimentación del sector C.....	114
Figura 3.2.3.29 Tabla resumen de la lista completa de activos.	114

Figura 3.3.1.2 Ejemplo de punto caliente en borne sin correcto ajuste. Se observa como la temperatura decrece a medida que se aleja del punto caliente. [31].....	118
Figura 3.3.1.3 Ejemplo de consumo desbalanceado con posibilidad de una sobrecarga en el conductor central. El punto caliente en este caso es uniforme a lo largo de todo el conductor y continúa a través de elementos. [32].....	119
Figura 3.3.1.4 Curva para determinar sobredimensionamiento en variadores PowerFlex 525 en aplicaciones con altas temperaturas. [33]	120
Figura 3.3.1.5 Tabla de aislantes eléctricos y sus temperaturas máximas admisibles correspondientes. [34]	121
Figura 3.3.1.6 Tablero del compresor AC. Tablero de una sola toma.....	124
Figura 3.3.1.7 Tablero eléctrico del activo B1F fresadora CNC. En la imagen se delimitan las 4 tomas a realizar en el tablero.....	125
Figura 3.3.1.8 Ejemplo de una llave rotativa para puerta similar a la del tablero. Marcada con un círculo verde la palanca para falsear la llave.....	125
Figura 3.3.1.9 Gabinete del activo B2C lijadora de contacto. Existe riesgo de atrapamiento por las correas tan cerca de la puerta.....	126
Figura 3.3.1.10 Tablero eléctrico del equipo B2C lijadora de contacto. Se observa la aglomeración de equipos que dificulta la identificación de cada elemento.....	127
Figura 3.3.1.11 Gabinete del motor de la prensa hidráulica B2P. Se cuenta con un amplio espacio para realizar las mediciones.....	128
Figura 3.3.1.12 Tablero eléctrico de la prensa hidráulica B2P. En la imagen se delimitan las dos tomas de la termografía infrarroja.....	129
Figura 3.3.1.13 Tablero principal. Identificadas en la imagen las cinco tomas a realizar del tablero.....	130
Figura 3.3.1.14 Tablero eléctrico del equipo C1P. Indicadas en la imagen las tomas a realizar. La imagen 4 debe tomarse de frente a la caja.....	131
Figura 3.3.1.15 Tablero eléctrico del C2P. Indicadas las tomas a realizar. Las tomas deben tomarse de frente al tablero, no en ángulo como la fotografía de referencia.....	132
Figura 3.3.1.16 Tablero secundario para el sector C. Se indican en la figura las tomas a realizar.....	133
Figura 3.3.2.1 Escuadradora con partes móviles cubiertas de aserrín.....	135
Figura 3.3.2.2 Desbalanceo estático. Fuerza a frecuencia 1x y en fase sobre los rodamientos. [12]	136
Figura 3.3.2.3 Desbalanceo par. Las fuerzas sobre los rodamientos son opuestas. [12] ...	137
Figura 3.3.2.4 Espectro de un desbalanceo. Amplitud pico sólo en la 1x. [12]	137
Figura 3.3.2.5 Desalineación paralela. Fuerzas radiales en fase y tangenciales opuestas entre rodamientos. [12]	138
Figura 3.3.2.6 Espectro de frecuencias de una desalineación paralela. Picos en 1x y en mayor medida en 2x. Pequeña amplitud en 3x. [12]	139
Figura 3.3.2.7 Desalineación angular. Presencia de fuerzas axiales y según el ángulo habrá fuerzas tangenciales o radiales. [12].....	139

Figura 3.3.2.8 Eje flexionado. Fuerzas axiales y radiales o tangenciales según la flexión del eje. [12].....	140
Figura 3.3.2.9 Espectro axial de un eje flexionado. Pico a la frecuencia fundamental 1x y en 2x. [12].....	141
Figura 3.3.2.10 Esquema del remolino de aceite y su espectro característico. [12].....	141
Figura 3.3.2.11 Esquema de la holgura rotativa y su espectro característico. [12]	142
Figura 3.3.2.12 Esquema de la holgura no rotativa y su espectro característico. [12]	142
Figura 3.3.2.13 Espectro de frecuencias de un conjunto motor-ventilador con transmisión por correas. La FFC es siempre inferior a 1x. [12]	144
Figura 3.3.2.14 Espectro de frecuencia de un equipo con un rodamiento con falla de pista interna. Las bandas laterales están separadas de las armónicas de la fundamental por el valor de la BPF. [12].....	146
Figura 3.3.2.15 Comparación de espectros de un rodamiento con una falla en la película lubricante (rojo) y luego de su lubricación (azul). [12]	147
Figura 3.3.2.16 Esquema de la excentricidad del estator. Se ejemplifica la problemática para dos casos. [12].....	148
Figura 3.3.2.17 Espectro del ejemplo de motor a 50Hz. Se identifican armónicos 1x y 2x. Estando paralelo y muy cercano a 2x se ubica la vibración a 6000RPM del estator excéntrico. [12]	148
Figura 3.3.2.18 Espectro de un caso de rotor excéntrico. Se observan las armónicas 1x y la 2x en azul con las bandas laterales marcadas en rojo. [12]	149
Figura 3.3.2.19 Caracterización del espectro de frecuencias de un motor eléctrico con rotura de barras. Primer y segundo armónicos altos y un pico a la frecuencia de paso de barras con bandas laterales. [12].....	150
Figura 3.3.2.20 Espectro del Hunting Tooth Gear. Se observan los característicos picos a frecuencias subarmónicas. [12].....	151
Figura 3.3.2.21 Espectro de un caso de daño en dientes. Se observan las bandas laterales distanciadas por las RPM del engranaje alrededor del pico de la frecuencia de engrane. [12]	152
Figura 3.3.2.22 Espectro característico de un engranaje desalineado. Picos en armónicos 1x, 2x y 3x de la frecuencia de engrane. [12].....	153
Figura 3.3.2.23 Espectro característico de un engranaje excéntrico o con backlash. Muchas bandas laterales alrededor de los armónicos de la frecuencia de engrane. [12]	153
Figura 3.3.2.24 Caso 1: Puntos de medición para el pedestal de un cojinete. [37].....	155
Figura 3.3.2.25 Caso 2: Puntos de medición para el alojamiento de un cojinete. [37]	155
Figura 3.3.2.26 Puntos de medición para máquinas eléctricas pequeñas. [37]	156
Figura 3.3.2.27 Caso 4: Puntos de medición para máquinas reciprocantes. [37]	156
Figura 3.3.2.28 Puntos de medición para el conjunto de una máquina vertical. [37]	157
Figura 3.3.3.1 Diagrama de flujo de categorización de repuestos. Repuesto A: repuesto que debe permanecer en stock. Repuesto B: repuesto que no es necesario mantener en stock pero debe estar localizable. Repuesto C: resto. [25]	161

Figura 3.3.4.1 Curva de la bañera. Se indican los tres sectores que forman la bañera. [41]	166
Figura 3.3.4.2 Patrones de aparición de fallas en equipos. Los porcentajes son según bibliografía. [41]	167
Figura 3.3.4.3 Diagrama de Ishikawa o de espina de pescado como puede observarse por su forma que se asemeja a las espinas de un pescado. [25]	168
Figura 3.3.4.4 Ejemplo de un diagrama de Pareto. En el eje derecho los porcentajes acumulados y en el eje izquierdo valores de frecuencia de ocurrencia. En el eje horizontal se colocan las categorías de problemas. [42]	169
Figura 3.4.1.1 Tabla de costos general. Los períodos pueden asignarse con el criterio que se desee.	177
Figura 3.4.2.1 Organigrama de la empresa del caso de estudio. Se identifican 4 niveles y 3 columnas a partir del 2do nivel.	182
Figura 3.4.2.2 Documento de Descripción del Puesto de Electricista.	184
Figura 3.4.2.3 Documento de Descripción del Puesto de Mecánico.	186
Figura 3.4.2.4 Documento de Descripción del puesto de Gerente de Mantenimiento.	188
Figura 3.4.2.5 Ejemplo del uso de la hoja de predictivos en el sistema informático para el caso de estudio.	189
Figura 3.4.2.6 Continuación del ejemplo del caso de estudio de hoja de hallazgos en el sistema informático.	190
Figura 3.4.2.7 Continuación del ejemplo del caso de estudio en la hoja de OT en el sistema informático.	191
Figura 3.4.3.1 Distribución de tareas por área. Adaptando al caso de estudio que las tareas de RRHH recaen en Administración y el cliente interno es Mantenimiento. [24]	193
Figura 3.4.4.1 Tipos de documentos y su función.	200
Figura 3.4.4.2 Ciclo PDCA integrado al Sistema de Gestión de la Calidad según norma ISO-9001/2015. [46]	202
Figura 3.4.4.3 Ciclo PDCA simplificado para la aplicación en el caso de estudio. [47]	203

1. INTRODUCCIÓN

1.1 PRESENTACIÓN DEL PROYECTO

En el mundo industrial moderno, el mantenimiento se ha convertido en un componente esencial para garantizar el funcionamiento eficiente y seguro de las instalaciones y maquinaria. El mantenimiento industrial abarca un conjunto de actividades planificadas y acciones correctivas que tienen como objetivo principal mantener y optimizar el rendimiento de los equipos, infraestructuras y procesos productivos en diversos sectores industriales.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La actividad industrial en Mar del Plata se distingue principalmente por la presencia predominante de pequeñas y medianas empresas de carácter familiar. En numerosas situaciones, no se emplean los enfoques y prácticas contemporáneas en el ámbito del mantenimiento industrial. Este problema, que se observa de manera frecuente en la ciudad, impide que estas empresas familiares aprovechen al máximo las capacidades de sus equipos e instalaciones, provocando así una disminución en su competitividad en el mercado. A partir de esta problemática es que se decide realizar el presente proyecto para concientizar sobre la importancia de la ingeniería y el mantenimiento industrial.

1.3 OBJETIVOS

El presente proyecto final de grado tiene por objetivo implementar de manera teórica el mantenimiento industrial moderno en un caso de estudio real.

Si bien la implementación del plan de mantenimiento es teórica, para la elaboración del mismo se tienen en cuenta las limitaciones del caso real para adecuar las tecnologías modernas al mismo.

Para lograr el objetivo principal se planean realizar los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar las tecnologías y metodologías actuales utilizadas en el mantenimiento industrial.
- Desarrollar los conceptos y las técnicas de mantenimiento predictivo, realizando énfasis en la termografía infrarroja y el análisis de vibraciones.
- Auditar la gestión industrial y relevar la planta para comprender el estado actual del mantenimiento en el caso de estudio.
- Crear una lista completa de activos de planta con su codificación y su sistema de clasificación.
- Establecer el plan de mantenimiento mecánico y eléctrico para todos los equipos de la planta del caso de estudio.
- Analizar los resultados de la auditoría para complementar las necesidades de la empresa del caso de estudio en el ámbito del mantenimiento industrial.

- Componer un plan de mejoras en la gestión y estructura administrativa del mantenimiento en la planta del caso de estudio

1.4 JUSTIFICACIÓN

La importancia del mantenimiento industrial radica en su capacidad para prevenir y reducir los fallos, averías y tiempos de inactividad no planificados que pueden generar importantes pérdidas económicas y productivas para las empresas. En un entorno altamente competitivo, donde la eficiencia y la calidad son factores clave, el mantenimiento adecuado se ha convertido en un factor crítico para el éxito y la supervivencia de las organizaciones.

El mantenimiento industrial no solo implica la reparación de equipos cuando se rompen, sino que también abarca actividades preventivas como inspecciones regulares, lubricación, calibración, limpieza y reemplazo programado de componentes desgastados. Estas acciones preventivas ayudan a detectar y corregir problemas potenciales antes de que se conviertan en fallas graves, lo que permite minimizar el tiempo de inactividad y maximizar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos.

El rol del ingeniero en este rubro es crucial ya que puede ocupar puestos en todas las líneas, abarcar múltiples roles y hasta plantear un cambio completo en el mantenimiento de una empresa, tal es el caso del presente proyecto.

Además de mejorar la eficiencia y la confiabilidad de los activos industriales, el mantenimiento adecuado también tiene un impacto significativo en la seguridad laboral. Las inspecciones regulares y el mantenimiento preventivo garantizan que los equipos estén en condiciones óptimas de operación, reduciendo los riesgos de accidentes y lesiones para los trabajadores.

El mantenimiento industrial en Mar del Plata no solo contribuye al desarrollo económico de la ciudad, sino que también promueve la generación de empleo local y fomenta la mejora continua de los estándares de calidad y seguridad en la industria. Asimismo, el uso de tecnologías y enfoques innovadores en el mantenimiento industrial impulsa la transformación digital de las empresas marplatenses, posicionándolas en un contexto competitivo a nivel nacional e internacional.

1.5 METODOLOGÍA

Dentro de las técnicas de mantenimiento predictivo, dos herramientas destacadas son el análisis de vibraciones y la termografía infrarroja. El análisis de vibraciones se utiliza para monitorear y evaluar las vibraciones de los equipos en funcionamiento, lo que permite identificar posibles desequilibrios, desalineaciones, holguras, problemas en los rodamientos u otras irregularidades que podrían derivar en fallos. Esta técnica ayuda a detectar problemas incipientes antes de que se manifiesten en forma de averías, evitando interrupciones inesperadas y costosas.

Por otro lado, la termografía infrarroja se utiliza para medir y visualizar las temperaturas de los componentes y sistemas. Esto permite identificar puntos calientes, fugas de calor, sobrecalentamientos o problemas de aislamiento térmico en equipos eléctricos, mecánicos o sistemas de tuberías. Al detectar estas anomalías térmicas, se pueden tomar medidas preventivas para evitar daños mayores, mejorar la eficiencia energética y garantizar la seguridad de las instalaciones y los trabajadores.

En el contexto de la industria 4.0 y la digitalización, el mantenimiento industrial también se ha beneficiado de los avances tecnológicos. El uso de sensores, análisis de datos, el Internet de

las cosas (IoT) y la inteligencia artificial (IA) han permitido la implementación de sistemas de mantenimiento predictivo y proactivo. Estos sistemas utilizan algoritmos y modelos predictivos para anticipar fallos y programar el mantenimiento en momentos estratégicos, evitando así interrupciones no deseadas en la producción y optimizando los recursos y costos asociados al mantenimiento.

1.6. CONTENIDO

El proyecto se divide en tres capítulos principales, a su vez, divididos en las secciones más importantes.

Capítulo 2: Marco teórico

En este capítulo se hace una breve descripción de la historia del mantenimiento hasta la actualidad. En otra sección se desarrolla sobre el mantenimiento predictivo y sus diferentes metodologías. Las secciones siguientes explican las metodologías a usar en el proyecto: análisis de vibraciones y termografía infrarroja.

Capítulo 3: Metodología y resultados

En este capítulo se inicia con la sección de auditoría y relevamiento del estado actual del caso de estudio. La segunda sección analiza los equipos e instalaciones, clasificándolos por criticidad e importancia. Se continúa con la sección del plan de mantenimiento de la planta. La sección final del capítulo explica el plan de mejoras en la gestión del mantenimiento.

Capítulo 4: Conclusiones

En este capítulo se extraen conclusiones sobre los resultados obtenidos en el desarrollo del proyecto.

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se interioriza sobre los orígenes y el recorrido del mantenimiento hasta la actualidad. Se señala la importancia que fue cobrando y cómo los países y empresas se esforzaron en lograr estándares de mantenimiento cada vez mejores. A lo largo del capítulo se irán mencionando y explicando brevemente las distintas metodologías y técnicas utilizadas para el mantenimiento, especialmente del predictivo. Para los casos del análisis de vibraciones y la termografía infrarroja se realiza un desarrollo completo de la teoría y la técnica en las que se basan dichas metodologías.

2.1. EVOLUCIÓN DEL MANTENIMIENTO

El origen del mantenimiento de máquinas eléctricas puede remontarse hasta el origen de las máquinas mismas, en la revolución industrial del siglo XVIII. A partir de allí comenzaron la producción en masa, las máquinas a vapor, el uso de la electricidad y los motores de combustión interna. Si bien existían mecanismos básicos antes de la revolución industrial, eran de manufactura artesanal y se administraban de manera doméstica.

2.1.1. MANTENIMIENTO CORRECTIVO

Ante el avance de las nuevas tecnologías y la implementación de la producción a gran escala traída por la revolución industrial llevo a la sociedad a entender la idea de realizar mantenimiento a equipos por su importancia económica.

Esta primera etapa del mantenimiento se limitaba a realizar acciones correctivas sobre las máquinas en el momento de la falla. Las máquinas eran lo suficientemente simples como para identificar la falla rápidamente y tomar las acciones necesarias. El mantenimiento era realizado por los mismos operarios de las máquinas casi sin capacitación técnica.

Las consecuencias de este tipo de mantenimiento es la imprevisibilidad de la falla, el tiempo muerto generado para la reparación, la pérdida de producción que puede generar dicha falla, el riesgo que representa para los trabajadores y tener que disponer de una cuadrilla disponible para realizar correctivos de urgencia. Este último fue implementado ya en el siglo XX debido a la necesidad de personal específico de mantenimiento.

El foco en el mantenimiento correctivo se encuentra en estar disponible para dar una respuesta al momento de la falla, que se desconoce en qué momento ocurrirá.

El costo total de esta práctica es muy elevado ya que incluye un reemplazo casi completo de la máquina por el daño de la falla, a las cuadrillas de respuesta que deben estar alertas a la falla inminente y de los elevados tiempos de inactividad no programados.

Un avance dentro de esta práctica vino de la mano de máquinas formadas por piezas intercambiables. Reduciendo el tiempo de la reparación, pero manteniendo los problemas de la imprevisibilidad [1].

2.1.2. MANTENIMIENTO PREVENTIVO

A partir de las Guerras Mundiales del siglo XX bajó la cantidad de trabajadores en las líneas de producción, aumentó la complejidad de las máquinas y las líneas de producción se encontraban más exigidas. Este escenario generó la necesidad de capacitar en prevención a las cuadrillas.

Al volverse la industria más competitiva cobra importancia el rendimiento, la productividad y los costos de producción. El foco del mantenimiento pasa a la reducción de los tiempos de parada y la preservación de los equipos.

Se comienza con las rutinas de inspección, el monitoreo de fallas y de horas de funcionamiento de componentes. Se establecen tiempos de vida útil para piezas que se deben reemplazar antes de llegar a la falla. Las paradas de mantenimiento se realizan por rutina, pero sigue desconociéndose la existencia de un problema o la naturaleza del mismo.

La estadística cumple un rol fundamental ya que el ciclo de vida de los componentes de las máquinas se establece según un promedio histórico. En este período del mantenimiento se comenzaron a desarrollar teorías alrededor del mantenimiento como el “Principio de Pareto” para el análisis de causas, el Control Estadístico de Calidad o la administración con cinco elementos de Fayol.

El esquema de mantenimiento basado principalmente en acciones preventivas tuvo muchas complicaciones en la industria aérea. Lo cual incentivó el desarrollo de nuevos métodos que se centraran en confiabilidad [1].

2.1.3. MANTENIMIENTO PREDICTIVO

A partir de la década de 1960 la automatización de procesos complejizó aún más el mantenimiento y los accidentes se volvían más costosos ya que la producción o el transporte dependiera en mayor medida de las máquinas. Las inspecciones rutinarias se reemplazan por el monitoreo de variables e indicadores mediante sensores y dispositivos.

En esta década se estudian aún más las causas de los fallos lo que deriva en la técnica del Análisis de Causa Raíz, que mejora el diagnóstico. En el mantenimiento se comienza a utilizar predicciones basadas en mediciones y análisis de las mismas. Estas mediciones se toman con la máquina en operación y cuando se predice que el equipo va a fallar se planifica la acción correctiva.

El foco de este tipo de mantenimiento se encuentra en que no haya paradas por fallo ni se realicen paradas por cambio de piezas sin un justificativo como ocurre con el mantenimiento preventivo. De esta manera se puede interpretar que el foco deja de estar en la máquina sino en la calidad del proceso. Es crucial la aplicación de técnicas y conceptos predictivos a fin de alcanzar dichos objetivos.

La capacitación del personal de mantenimiento se vuelve más especializado y profundizando más en técnicas avanzadas. Se requieren lectura y comprensión de resultados de las mediciones. Se realizan análisis y se sacan conclusiones basadas en conceptos físicos. A lo largo del mundo se establecieron normas y criterios de evaluación de los indicadores del mantenimiento predictivo.

Este tipo de mantenimiento trae consigo costos más grandes en lo que respecta al mantenimiento en sí, pero trae de la mano un ahorro en paradas de producción, fallos inesperados y accidentes [1].

2.1.4. TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO AVANZADAS

a) Mantenimiento Productivo Total

En Japón, luego de la Segunda Guerra Mundial, se buscó la excelencia en calidad y productividad. Lo que llevó al desarrollo de técnicas cada vez más avanzadas de mantenimiento y calidad.

En la década del 60 se desarrolló el sistema poka-yoke (a prueba de errores) y se comenzó a utilizar técnicas de mantenimiento productivo y círculos de calidad, donde se buscaba que el mismo operario realice pequeñas reparaciones.

A lo largo de la década del 70 se avanzó con este concepto y se creó el mantenimiento productivo total (TPM). El TPM es más una filosofía de gestión que una técnica de mantenimiento.

Su objetivo es eliminar las 6 grandes pérdidas: pérdidas por avería, pérdidas por preparación y ajuste, pérdidas por tiempos muertos y pequeñas paradas, pérdidas por reducción de velocidad, defectos de calidad y repetición de trabajos y las pérdidas por puestas en marcha.

Se lo llama total porque requiere que toda la compañía se involucre en el mantenimiento y en los procesos. Es productivo porque el objetivo final es maximizar la eficiencia minimizando los obstáculos. Hace que desde el mantenimiento se mejore la eficiencia de la planta dando una mejora sustentable y permanente a la condición general de las instalaciones.

Esta técnica utiliza el mantenimiento predictivo para eliminar las pérdidas, pero no como una tarea específica del personal de mantenimiento sino como un objetivo global.

Una característica es que para su implementación se realiza una limpieza inicial en la que participa toda la compañía. Luego se implementan tarjetas para identificar cualquier tipo de anomalía, ya sea de limpieza, de una avería o de un riesgo de seguridad o ambiental. El siguiente paso es desarrollar documentos detallados de los procedimientos de limpieza y producción. A continuación, se entrena al personal en detección de fallas menores para que todo el tiempo se esté realizando una inspección y mediante planillas se dejan asentados todas las inspecciones. Ya estandarizados todos los procesos se comienzan a registrar todos los paros para posterior análisis y se aplica mejora continua en todos los procesos.

b) Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad

Al igual que con el TPM, el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) no es una técnica, sino que es una serie de conceptos integrales de gestión del mantenimiento aplicables a una compañía.

Fue desarrollado por la industria aeronáutica debido a la falta de confiabilidad del mantenimiento sin una gestión eficiente detrás.

En el RCM el mantenimiento depende del área de operaciones además de la de mantenimiento.

El foco se encuentra en prevenir, reducir y/o evitar fallas con mucha anticipación y requiere un trabajo intenso en lograr dichos objetivos.

Uno de sus conceptos es que es un proceso lógico en el que se determinan las distintas tareas de mantenimiento. Se realizan análisis de criticidad de activos (ACA), se establecen las condiciones específicas de funcionamiento y diseño en las cuales se asegura la confiabilidad y se optimiza el plan de mantenimiento para cada contexto.

Otro de sus conceptos es que dentro de la confiabilidad de un proceso se incluyen la seguridad y el medio ambiente. De tal manera que dentro de los fallos a evitar se tienen en cuenta los posibles accidentes o enfermedades laborales.

Su aplicación requiere plantearse una serie de preguntas sobre el equipo: función, posibles fallas, consecuencias de dichas fallas, causas evitables, causas no evitables, acciones a tomar en cada caso.

Luego de su aplicación en la industria aeronáutica, esta práctica se comenzó a aplicar en la industria militar y finalmente en el resto de las industrias. En las plantas de generación eléctrica con energía nuclear, se observó un sobremantenimiento y se requería reducir costos.

Por lo cual se modificó profundamente al RCM con el enfoque hacia los costos y se creó la Optimización del Mantenimiento Planificado (TPM).

A su vez, la industria en general fue modificando el RCM hasta llegar a lo que hoy en día se conoce como el RCM2.

c) Las Cinco Eses

Es una filosofía de orden y limpieza en el espacio de trabajo que mejoró de manera notable la calidad y productividad. Se aplica principalmente al área operacional de las fábricas, pero incluye en gran medida al mantenimiento.

Las cinco eses son:

- Clasificación: Seiri. Consiste en identificar los objetos no necesarios y desecharlos. De los objetos necesarios, clasificar por frecuencia de uso.
- Orden: Seiton. Está ligada a la clasificación ya que indica que haya un lugar para cada cosa. Indica que se coloquen los objetos cerca del lugar de uso según la frecuencia de uso. Una herramienta usada todos los días por un operario se ubicará al alcance de la mano del mismo. En cambio, un material usado una vez por año se guardará en un depósito. Se recomiendan la señalización por colores y planillas de stock para la fácil ubicación de los objetos.
- Limpieza: Seiso. Este paso establece que la limpieza sea parte de las tareas de cada puesto. No se debe relegar la limpieza a sólo la tarea correctiva de limpiar la suciedad, sino que se debe tomar acciones proactivas de buscar la fuente de la suciedad.
- Estandarización: Seiketsu. Es el paso en el que se establecen las normas y reglas de limpieza, orden y clasificación.
- Disciplina: Shitsuke. Es el control riguroso del cumplimiento de los pasos anteriores.

Muchas veces se aplican estos conceptos dentro de los sistemas de gestión TPM o RCM [2].

2.1.5. INDUSTRIA 4.0

El concepto “Cuarta Revolución Industrial” se ha instalado a nivel internacional desde la Feria de Hannover de 2011, donde se discutieron opciones para la mejora de la productividad manufacturera en Alemania. A partir de allí se instauró el concepto de la industria 4.0 como un nuevo set de tecnologías, que transforman tanto los procesos de elaboración y las prestaciones de productos, como la gestión empresarial, las relaciones cliente-proveedor y, en un sentido más amplio, los modelos de negocios. Este nuevo paradigma no solo afecta al productor sino a toda la cadena de valor.

Desde el mantenimiento se aplican tecnologías como los datos en tiempo real, el almacenamiento en la nube, la digitalización de procesos, la interconexión de dispositivos, el IoT (internet de las cosas), el big data y la robótica [3].

a) Sistemas Tecnológicos Integrados

Se busca que exista la mayor interconexión entre máquina-máquina, máquina-producto o entre cliente-proveedor para que funcionen de manera coordinada. Esta interconexión mediante software y hardware deben articular los distintos sistemas de una unidad productiva.

Si bien los PLC y otras tecnologías que permiten esta integración ya existen hace décadas, este punto se refiere a la universalización de su uso.

Las industrias de primera línea cuentan con controladores periféricos con un programa unificado donde se encuentran todos los procesos. De esta manera desde cualquier unidad conectada se pueden corregir variables de cualquier parte del proceso.

b) Internet de las Cosas (IoT)

Es la interconexión digital a través de redes inalámbricas. Si bien este punto es parte de los sistemas de integración, la IoT hace hincapié en las fábricas inteligentes. Se incluyen herramientas de inteligencia artificial y análisis de datos que dan directrices para el funcionamiento de otras máquinas o dispositivos. La IoT no sólo es aplicable a los procesos de manufactura, sino que, aplicada en los productos, permite la adquisición de información sobre el rendimiento dando una retroalimentación de su desempeño.

Los análisis de las variables del mantenimiento predictivo pueden automatizarse. La información se procesa en simultáneo mientras se mide y se toman medidas al respecto.

El perfil del técnico y del ingeniero de mantenimiento adquiere nuevas facetas para adecuarse a la automatización de procesos.

c) Robots

Según la Asociación de Industrias de Robótica (RIA), los robots industriales son manipuladores multifuncionales reprogramables, que pueden ser controlados tanto por personas como por un sistema informático. Esta tecnología también existe hace décadas y está muy esparcido su uso en el montaje, empaquetado, paletizado, soldadura, inyección y laboratorios. Lo que se busca en la industria 4.0 es la aplicación de sensores periféricos y una inteligencia artificial que modifique su comportamiento de acuerdo al entorno. Estos denominados "cobots" son robots colaborativos capaces de interactuar de forma material con humanos en diversas tareas. Dichos cobots también pueden interconectarse con los dispositivos integrados y obtener información de las máquinas del entorno.

d) Big Data

Es el conjunto de técnicas de procesamiento y análisis de grandes cantidades de información generados por las tecnologías de integración. Una de estas técnicas es el "data mining" la cual permite identificar la información relevante en un gran volumen de datos, así como detectar patrones y tendencias en los mismos.

La ciencia de datos toma muchos conceptos de la estadística y la programación para el análisis de la información. Este punto es crucial para la toma de decisiones en tiempo real y la planificación del mantenimiento.

e) Simulación Virtual

Consiste en un grupo de tecnologías que permiten operar en entornos virtuales. Tienen su principal aplicación en la capacitación de personas también tienen utilidad en el mantenimiento.

Existen distintos tipos de usos de esta tecnología en el entorno del mantenimiento. Entre ellos está la realidad virtual, que recrea un entorno ficticio y permite interactuar con el mismo. Permite ahorrar materiales en la capacitación y mantener fuera de riesgo al personal de mantenimiento que se entrena para situaciones peligrosas.

Otra herramienta es la realidad aumentada, que suma información a imágenes reales. Entre esta información adicional se puede incluir el historial de mantenimiento, la condición actual o indicaciones para ubicar la falla en una máquina.

La realidad mixta y los gemelos digitales son dos herramientas que generan réplicas digitales de entornos, equipos o procesos reales que permiten la interacción en tiempo real. Estas

tecnologías requieren la aplicación de todos los puntos mencionados porque para lograr esto se requieren sensores integrados que generen los datos, una inteligencia artificial que los procese, una realidad virtual donde aplicar en simultáneo las características técnicas del funcionamiento y una realidad aumentada que permita visibilizar la información complementaria.

f) Computación en la Nube

Es la capacidad de ejecutar programas, desarrollar o utilizar aplicaciones y almacenar información desde cualquier dispositivo sin tener la infraestructura tradicional. Existen muchos prestadores de este servicio, aunque algunas empresas pueden gestionar su propia nube.

g) Inteligencia Artificial

Consiste en el desarrollo de modelos computacionales con algoritmos capaces de procesar información a gran velocidad de forma adaptativa y automática, ya que van mutando y perfeccionándose en la medida en la que los datos que incorporan suman nueva información [3].

Su función en el mantenimiento es principalmente para la toma de decisiones en modelos automatizados. En el mantenimiento predictivo con sensores fijos se están tomando mediciones en tiempo real y una inteligencia artificial realiza el análisis de las variables para informar de las acciones correctivas necesarias.

2.1.6. ESTADO ACTUAL DEL MANTENIMIENTO

Actualmente a nivel mundial se encuentran implementados todos los tipos de mantenimiento mencionados o combinaciones de estos. Muchas empresas se ven atraídas hacia los modelos de la industria 4.0 por la mejora en productividad y la disminución de tiempos muertos y paradas. Pero el balance entre ganancia/costos es particular para cada empresa y siempre existe inercia al cambio.

De acuerdo a estudios llevados a cabo en Europa y Estados Unidos entre 2018 y 2021 por las empresas *CFE Media and Technology*, *Advanced Technology Services (ATS)* y *Peerless Research Group (PRG)* se observa que las rutinas de mantenimiento preventivo siguen estando presente en la mayoría de plantas industriales. Esta práctica es mayoritaria pero no exclusivamente la única aplicada. En acompañamiento a esta práctica histórica, la mitad de las plantas utilizan sistemas automatizados de gestión del mantenimiento (ver Figura 2.1.6.1).

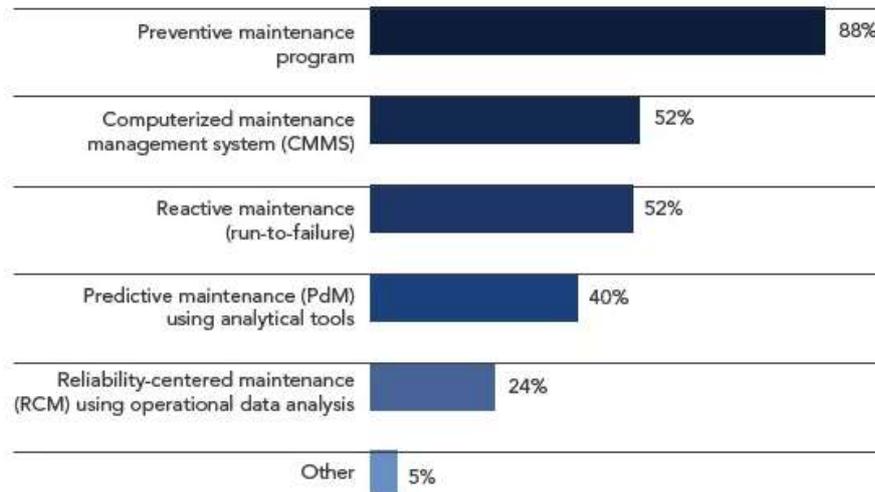


Figura 2.1.6.1 Estrategias de mantenimiento utilizadas en EEUU en 2021 según CFE y ATS. [4]

A pesar de la difusión de técnicas de mejor rendimiento, aún se observa que un 50% de las plantas tiene que seguir recurriendo al uso del mantenimiento correctivo en algunos equipos. Mientras que menos de la mitad utilizan el mantenimiento predictivo o el mantenimiento centrado en confiabilidad [4].

Por otra parte, el nivel de automatización del mantenimiento, reparaciones y operaciones (MRO) sigue siendo mayoritariamente bajo, aunque un poco más del 30% de las plantas industriales posee más del 50% automatizado (ver Figura 2.1.6.2) [5].

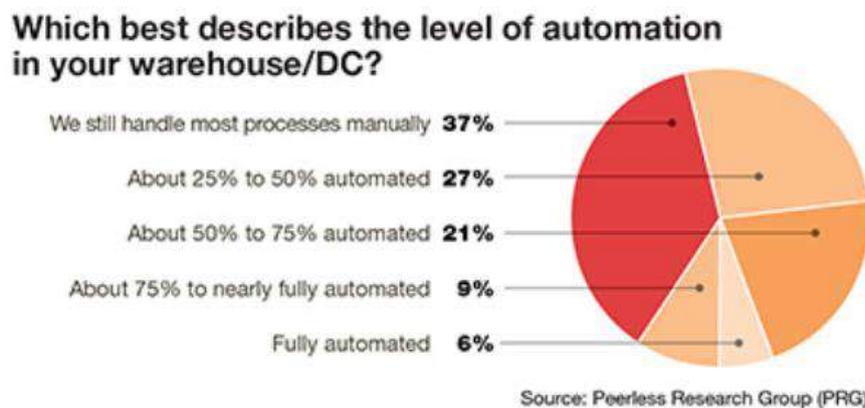


Figura 2.1.6.2 Nivel de automatización de MRO en 2018 según la consultora PRG. [5]

En Argentina, al igual que en todos los países que no desean que su industria deje de ser competitiva, se intenta ser parte de la “Cuarta Revolución Industrial”. Como parte de esto, en 2021 el gobierno lanzó la iniciativa Argentina 4.0 en la cual se realiza un análisis de fortalezas y debilidades para la implementación de tecnologías 4.0. En la iniciativa también se incluyen detalles de su fomento a empresas y estimulación de mercados.

Dentro del análisis de fortalezas y debilidades se identifican distintos factores:

- FORTALEZAS

La principal fortaleza se encuentra en el capital humano, en la educación y la cantidad y calidad de profesionales. Otra fortaleza es el entorno científico, propicio al desarrollo de

tecnología propia, participación en publicaciones científicas e instituciones prominentes. La combinación de estos puntos fuertes genera una buena infraestructura para la inclusión digital.

Desde el enfoque demográfico, Argentina posee una gran población y representa un mercado interesante y con perspectivas de desarrollo.

- DEBILIDADES

La principal debilidad es la inestabilidad macroeconómica del país que, en conjunción con el reducido sistema financiero y baja productividad comparada con otros mercados, no presenta un entorno propicio a la inversión. En consecuencia, existe un rezago en materia de infraestructura de datos. Allí encuentran dificultades la implementación de las herramientas de Big data, IoT y computación en la nube.

Si bien se mencionó el ecosistema científico como una fortaleza, la debilidad en este ámbito se encuentra en la falta de interacción con el sistema productivo.

Estudios elaborados por el Banco Interamericano de Desarrollo, CIPPEC, la Unión Industrial Argentina y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (dependiente de la ONU en América Latina) en el 2019, que alcanzó a 307 firmas de 6 ramas industriales, hallaron que el grado de difusión de las tecnologías 4.0 en la industria argentina es todavía muy bajo (las utilizan menos del 10% de las firmas encuestadas y ni siquiera ese porcentaje de empresas lo hace de forma integrada); un segundo punto relevante es que en la mayoría de las empresas predominan las tecnologías digitales de primera y segunda generación; y un tercer aspecto llamativo es que más del 60% de las firmas consultadas dijo no estar tomando ninguna acción tendiente a incorporar tecnologías 4.0 [3] [6].

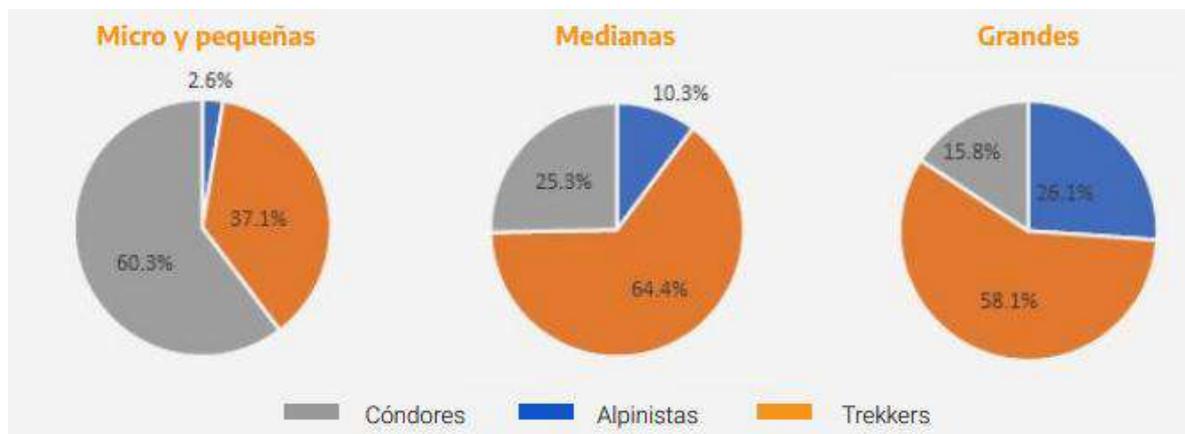


Figura 2.1.6.3 Nivel de adopción de tecnología 4.0 por tipo de empresa en Argentina en el 2019 según el Ministerio de Desarrollo Productivo.

En la Figura 2.1.6.3 se catalogan las empresas según las categorías Cándores, Alpinistas o Trekkers. Los autores definen a las categorías utilizadas en el trabajo de la siguiente manera: cándores a las empresas tecnológicamente avanzadas; alpinistas por usar tecnologías de desarrollo intermedio y ser activas en incorporar nuevas soluciones, y trekkers a las que usan tecnologías de primera y segunda generación y muestran cierta inactividad frente al cambio tecnológico. [3]

Para realizar una comparación entre el estado actual de Argentina con el resto del mundo se puede tomar de referencia el estudio realizado por la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI). Informe que hace énfasis en la utilización y producción de tecnologías de Producción Digital Avanzadas (PDA), forma en la que se refieren a las tecnologías de la industria 4.0.

El estudio cataloga los países según si son economías punteras, de segundo nivel ya sea en uso o en producción, si son de industrialización tardía en producción y uso y si son rezagadas. La caracterización corresponde a 167 economías que, según la División de Estadísticas de las Naciones Unidas, tenían más de 500.000 habitantes en 2017 (ver Figura 2.1.6.4) [7].

Grupo		Descripción breve	Criterios	Economías con una implementación activa de tecnologías de PDA
Economías punteras (10 economías)		10 países principales en el ámbito de las tecnologías de PDA	Economías con 100 o más solicitudes de familias de patentes globales en tecnologías de PDA (valor medio para todas las economías con alguna actividad de patentes en este ámbito)	
Economías de segundo nivel en términos de producción (23 economías)	Como innovadoras	Economías implicadas activamente en la creación de patentes en el ámbito de las tecnologías de PDA	Economías con 20 o más solicitudes de familias de patentes normales o 10 o más solicitudes de familias de patentes globales en tecnologías de PDA (valores medios para todas las economías con alguna actividad de patentes, una vez excluidas las economías punteras)	
	Como exportadoras	Economías implicadas activamente en la exportación de bienes relacionados con la PDA	Economías relativamente especializadas en la exportación de bienes relacionados con la PDA que venden grandes volúmenes en los mercados internacionales (por encima de la cuota de mercado media, una vez excluidas las economías punteras)	
Economías de segundo nivel en términos de uso (17 economías)	Como importadoras	Economías implicadas activamente en la importación de bienes relacionados con la PDA	Economías relativamente especializadas en la importación de bienes relacionados con la PDA que compran grandes volúmenes en los mercados internacionales (por encima de la cuota de mercado media, una vez excluidas las economías punteras)	
Países de industrialización tardía en términos de producción (16 economías)	Como innovadores	Economías con alguna actividad de creación de patentes en tecnologías de PDA	Economías con al menos una solicitud de familia de patentes normal en tecnologías de PDA	
	Como exportadores	Economías con alguna actividad de exportación de bienes relacionados con la PDA	Economías que muestran una especialización relativa en la exportación de bienes relacionados con la PDA o que venden grandes volúmenes en los mercados internacionales (por encima de la cuota de mercado media, una vez excluidas las economías punteras)	
Países de industrialización tardía en términos de uso (13 economías)	Como importadores	Economías con alguna actividad de importación de bienes relacionados con la PDA	Economías que muestran una especialización relativa en la importación de bienes relacionados con la PDA o que venden grandes volúmenes en los mercados internacionales (por encima de la cuota de mercado media, una vez excluidas las economías punteras)	
Economías rezagadas (88 economías)		Economías en las que las tecnologías de PDA están muy poco o nada implementadas	El resto de economías no incluidas en los grupos anteriores	

Figura 2.1.6.4 Caracterización de economías mundiales por nivel de implementación de tecnologías de PDA en 2019 según ONUDI. [7]

Cabe destacar de los resultados que el 91% de las patentes mundiales de PDA y el 70% de las exportaciones pertenecen a las 10 economías punteras.

Por otro lado, sólo 50 economías participan activamente en la implementación de tecnologías 4.0 y en la gran mayoría de estos coexisten tecnologías de generaciones anteriores [7].

Economías punteras (10 economías)	Economías de segundo nivel (40 economías)		Economías de industrialización tardía (29 economías)		Economías rezagadas (88 economías)
	Como productoras (23 economías)	Como usuarias (17 economías)	Como productoras (16 economías)	Como usuarias (13 economías)	
<i>Economías que implementan de forma activa las tecnologías de PDA</i>					
China	Australia	Argelia	Bosnia Herzegovina	Costa Rica	Todas las demás economías que, de acuerdo con la División de Estadística de Naciones Unidas, cuentan con más de 500 000 habitantes en 2017
Francia	Austria	Argentina	Bulgaria	Costa de Marfil	
Alemania	Bélgica	Bangladesh	Chile	Ecuador	
Japón	Brasil	Bielorrusia	Rep. Dominicana	Egipto	
Rep. de Corea	Canadá	Colombia	Estonia	El Salvador	
Países Bajos	Croacia	Hungría	Grecia	Etiopía	
Suiza	Chequia	Indonesia	Kirguistán	Malawi	
Taiwán, Provincia de China	Dinamarca	República Islámica de Irán	Letonia	Serbia	
Reino Unido	Finlandia	Malasia	Rep. de Moldavia	Túnez	
Estados Unidos	Hong Kong, China (SAH)	México	Nueva Zelanda	Turkmenistán	
	India	Portugal	Nigeria	Uganda	
	Irlanda	Rumania	Filipinas	Uzbekistán	
	Israel	Arabia Saudita	Eslovenia	Zambia	
	Italia	Sudáfrica	Ucrania		
	Lituania	Tailandia	Emiratos Árabes Unidos		
	Luxemburgo	Turquía	República Bolivariana de Venezuela		
	Noruega	Viet Nam			
	Polonia				
	Federación Rusa				
	Singapur				
	Eslovaquia				
	España				
	Suecia				

Figura 2.1.6.5 Especificación de países agrupados por nivel de implementación de tecnologías de PDA en 2019 según ONUDI. [7]

Como se observa en la Figura 2.1.6.5, el lugar que ocupa Argentina en esta clasificación es de una Economía de segundo nivel en términos de uso. Esto implica que participa de manera activa en la adopción de las nuevas tecnologías, aunque a un ritmo sensiblemente inferior a los países líderes. Esto lo coloca en una situación de cierta ventaja relativa con relación a una gran cantidad de países que aún no dialogan con estas tecnologías, pero al mismo tiempo da cuenta de un importante rezago o brecha que, en la medida de que no se adopten políticas activas, tenderá a incrementarse con el pasar del tiempo. Y, al mismo tiempo, el informe señala que Argentina no cuenta con un sector oferente de soluciones tecnológicas denso [3].

2.2. GENERALIDADES DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO

Una definición de mantenimiento podría ser la siguiente: todas las actividades desarrolladas con el fin de conservar las instalaciones y equipos en condiciones de funcionamiento seguro, eficiente y económico. Por otro lado, abordar el mantenimiento sin ningún tipo de estrategia ni organización, limitándonos a reparar daños producidos o, en el mejor de los casos, realizando la gama de mantenimiento preventivo recomendada por el fabricante de los

equipos, es hacer mantenimiento pero a ciegas, sin gestión. Se debe pensar en el mantenimiento como en una herramienta de valor dentro del proceso productivo sin perder su finalidad, como es la máxima utilización de los equipos y recursos disponibles durante el mayor tiempo posible con el menor número de intervenciones y al menor costo en la ejecución del mismo [8].

Como se mencionó en la sección anterior, el mantenimiento predictivo surgió como la solución tecnológica al problema de las paradas imprevistas de máquinas. Se basa en el estudio de los fenómenos físicos que permiten establecer niveles de alarma antecediendo a la rotura o el mal funcionar de los equipos. Se caracteriza por ser programado y planificado, para lo cual requiere el seguimiento de las rutinas y mediciones periódicas sobre los activos.

Si bien se han mencionado tipos de mantenimiento más modernos, éstos incluyen al mantenimiento predictivo como base técnica del trabajo sobre los equipos. Los avances en mantenimiento luego del auge de las técnicas predictivas fueron acompañando al progreso de las ramas de la intercomunicación, las filosofías de trabajo, el internet, la gestión, etc. No se reemplazó al mantenimiento predictivo por una nueva tecnología, sino que se fueron modernizando sus aplicaciones. Se pasó de medir con sensores analógicos a mano equipo por equipo a que los activos tengan integrados sensores midiendo continuamente, que un especialista analice los datos y los archive en papel a que una inteligencia artificial identifique patrones y analice la información en simultáneo.

Cada técnica de mantenimiento predictivo se basa en uno o más de estos fenómenos físicos. Se caracterizan fallos o mal funcionamientos con respuestas físicas y cada técnica tendrá su debida importancia según el equipo o el problema que se desee prevenir.

Se mencionarán brevemente algunas técnicas predictivas para luego profundizar en las dos que se utilizarán en el proyecto que son el análisis de vibraciones y la termografía infrarroja.

2.2.1. ANÁLISIS DE ULTRASONIDO

Se llama ultrasonido a las ondas sonoras con frecuencias superiores a los 16 kHz, aproximadamente (superior a lo que el oído humano puede percibir). Las ondas ultrasónicas obedecen a las mismas leyes básicas del movimiento ondulatorio de las ondas de frecuencias más bajas, las cuales conocemos como ondas sonoras.

El sonido es una onda elástica, lo cual significa que se propaga mediante la compresión del medio. A diferencia de las ondas electromagnéticas que pueden propagarse en el vacío, el sonido requiere de un medio elástico para su propagación.

La forma de detectar el ultrasonido es mediante cristales piezoeléctricos que transforman la onda elástica en un impulso eléctrico. De esa manera se fabrican dispositivos sensibles.

Las características de la onda y de la elasticidad del medio son similares a las que se analizarán en detalle sobre las vibraciones. Estos fenómenos permiten obtener información importante para el análisis ya que mediante el ultrasonido se pueden caracterizar tanto el medio como los objetos contra los que rebote la onda sonora.

Las aplicaciones en mantenimiento predictivo cobran importancia gracias a su índole no destructiva ni intrusiva. Entre sus principales aplicaciones en mantenimiento se citan las siguientes:

- La onda atraviesa fluidos inflamables, corrosivos y radioactivos por lo que es útil para el estudio estructural de recipientes.
- Las ondas electromecánicas propagándose en un medio elástico generan ondas de sonido que pueden ser percibidas para diagnosticar fallas eléctricas tales como el efecto corona, descargas parciales y arcos.

- Diagnóstico de estado de máquinas. Si se toman mediciones ultrasónicas del funcionamiento normal de una máquina se establece una “huella acústica”. La cual se compara con mediciones periódicas y permite identificar un mal funcionamiento [8].

2.2.2. ANÁLISIS DE ACEITE

El análisis de aceite es una técnica predictiva que nació en la industria ferroviaria y luego se trasladó al resto del ambiente industrial.

Consiste en el estudio de los fluidos de una máquina o elemento del sistema que permite identificar el estado de los equipos y del fluido en sí. Esta técnica se aplica tanto a aceites como a lubricantes, combustibles, refrigerantes y grasas.

Dependiendo del estudio que se desee realizar, el ensayo será destructivo o no. En esta técnica es mayoritariamente intrusiva ya que, de alguna manera, se requiere extraer del proceso o de la máquina una muestra del fluido a analizar.

Su importancia en el mantenimiento es clara si se piensa en que gran parte de las máquinas y procesos contienen algunos de los fluidos mencionados. Otro uso de esta técnica es la detección de fallas o desgaste de los equipos en base a los estudios de contaminantes.

Sus principales aplicaciones en el mantenimiento son:

- Estudio de propiedades físico-químicas para establecer la “salud” e integridad del fluido (viscosidad, acidez, oxidación, estabilidad química o envejecimiento).
- Control de contaminación.
- Identificación de partículas ferrosas o que indiquen desgaste del equipo.
- Cálculo de vida útil del fluido.

2.2.3. ANÁLISIS DE HUMOS

Si bien el análisis de humos es requerido mayoritariamente para control de contaminación ambiental, tiene un uso similar al análisis de aceites para el mantenimiento predictivo.

El análisis de humos o análisis de gases de combustión permite realizar un diagnóstico del funcionamiento de equipos tales como calderas, hornos o equipos de combustión interna.

No existen muchas otras herramientas para analizar la calidad de la combustión más que el análisis de humos.

El sensor que se utiliza es el analizador de humos y puede llevar integrada la medición de uno o más gases. El análisis consta en medir la concentración de distintos compuestos gaseosos en los gases de escape, interpretar si son concentraciones normales o anómalas y mostrar los resultados.

2.3. ANÁLISIS DE VIBRACIONES

El análisis de vibraciones es la técnica que estudia las vibraciones de una máquina e identifica fallos según los resultados del mismo. Su aplicación industrial es principalmente en máquinas rotantes o elementos de máquinas que tengan movimiento periódico. Un claro ejemplo de este tipo de equipos son los compresores, las cajas reductoras o motores eléctricos.

Es ampliamente usado para detectar desbalanceo, dientes de engranajes rotos, desalineación de ejes, falta de lubricación de rodamientos y muchos otros problemas que reducen sustancialmente la vida útil de un equipo y no es detectable por otros medios.

Para explicar cómo funciona el análisis de vibraciones hace falta un desarrollo breve del fenómeno vibratorio en sí, de los elementos que miden dicho fenómeno y del análisis en sí. Así como definir los métodos de adquisición de datos, el procesamiento de los mismos y el análisis para llegar a un diagnóstico del equipo. Finalmente, en esta sección se mencionan las distintas normas que rigen sobre el análisis de vibraciones.

A partir de la sección 2.3.1 hasta la 2.3.6.5 se profundiza sobre el análisis de vibraciones brindando información necesaria para comprender la metodología a aplicar en el proyecto. Queda a consideración del lector cubrir esta sección, para volver más fluida la lectura se recomienda dirigirse directamente a la sección 2.4 TERMOGRAFÍA INFRARROJA en la página 58.

2.3.1. INTRODUCCIÓN A LAS VIBRACIONES

Se puede definir a una vibración como el movimiento de oscilación respecto de una posición de equilibrio de una partícula o un cuerpo. [9]

2.3.1.1. MOVIMIENTO ARMÓNICO

El ejemplo más simple de una vibración es el del movimiento armónico sencillo. Este consiste en un resorte de masa despreciable y constante elástica k , sujeto al punto E. En el otro extremo del resorte se coloca una masa m que descansa sobre una superficie horizontal sin rozamiento colineal al eje x . [10]

Si m se desplaza a lo largo del eje x y se suelta, oscilará respecto al eje O.

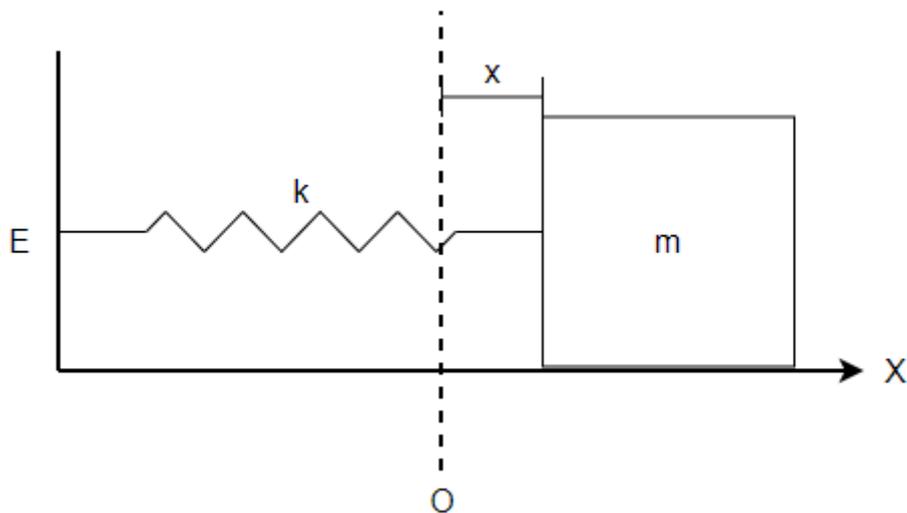


Figura 2.3.1.1 Sistema masa-resorte sin rozamiento.

El resorte genera una fuerza restauradora proporcional al movimiento pero opuesta cuyo valor está dado por la ley de Hooke.

$$F_R = -kx \quad (2.3.1.0)$$

Donde x es el vector desplazamiento con origen en el punto O.

Para determinar la ecuación general del movimiento hace falta utilizar la segunda ley de Newton. Con lo que nos queda la siguiente ecuación diferencial:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx \rightarrow m\ddot{x} + kx = 0 \quad (2.3.1.1)$$

Resolviendo esta ecuación diferencial:

$$x = A \cos \omega t + B \sin \omega t \quad (2.3.1.2)$$

Siendo ω la pulsación propia del sistema. A y B se determinan con las condiciones iniciales $t = 0, x = x_0$ y $v = \dot{x} = v_0$. [11]

De las que resultan:

$$A = x_0, B = \frac{v_0}{\omega} \quad (2.3.1.3)$$

Si se considera a esta ecuación como la suma de las proyecciones de dos vectores sobre el eje x con módulos A y B. Llegamos a:

$$x = A \sin(\omega_0 t - \theta) \quad (2.3.1.4)$$

Donde $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ y $A = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{v_0}{\omega}\right)^2}$.

Ya que $\sin(\omega_0 t)$ varía entre -1 y +1, la masa oscilará entre $x = -A$ y $x = +A$.

La amplitud del movimiento es la distancia A que es la máxima al punto de equilibrio. [10]

El período (T) del movimiento es el tiempo necesario para efectuar una oscilación o un ciclo.

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (2.3.1.5)$$

La frecuencia (f) es el número de oscilaciones o ciclos completos por unidad de tiempo.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.3.1.6)$$

Otros valores interesantes a resaltar serán los siguientes:

Velocidad instantánea:

$$\dot{x} = \omega_0 A \cos(\omega_0 t - \theta) \quad (2.3.1.7)$$

Aceleración instantánea:

$$\ddot{x} = -\omega_0^2 A \sin(\omega_0 t - \theta) \quad (2.3.1.8)$$

Valor medio

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T |x| dt \quad (2.3.1.9)$$

Valor eficaz:

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int x^2 dt} \quad (2.3.1.10)$$

Que en el caso de una onda senoidal se puede decir como:

$$x_{rms} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) A = \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{2}\right) \bar{x} \quad (2.3.1.11)$$

2.3.1.2. TIPOS DE VIBRACIÓN

Se pueden clasificar primeramente según si existe una fuerza perturbadora permanente sobre el sistema. De esta manera tendríamos las vibraciones Libre y Forzada. A su vez pueden separarse en si se tiene en cuenta el amortiguamiento o no. Se debe tener en cuenta que el amortiguamiento existe siempre, pero en algunos casos puede despreciarse su influencia [12].

- VIBRACIÓN LIBRE NO AMORTIGUADA

El caso de la vibración libre no amortiguada es el estudiado en el caso general en la sección 2.3.1.1 ya que es el caso más simple de analizar.

- VIBRACIÓN LIBRE AMORTIGUADA

Ahora, para el caso de la vibración libre no amortiguada, se agrega el componente dependiente de la velocidad y de la constante de amortiguación viscosa. Tomando una respuesta lineal con la velocidad, la ecuación diferencial a resolver quedará como:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (2.3.1.12)$$

La resolución es similar a la ya desarrollada, sólo que la solución tiene 2 posibles soluciones dependiendo del amortiguamiento: Estos son sobreamortiguado, subamortiguado.

El primer caso no es de nuestro interés ya que no genera una respuesta oscilatoria, sólo un decrecimiento aperiódico de la velocidad hasta que se detiene.

El caso subamortiguado, el sistema oscilará hasta que se consuma la energía y se detenga. Para que haya movimiento periódico la constante del amortiguador c debe ser:

$$c < 2\sqrt{km} \quad (2.3.1.13)$$

Y si:

$$c_c = 2\sqrt{km} \quad (2.3.1.14)$$

El amortiguamiento será crítico. Esto significa que desde ese punto comienza el comportamiento sobreamortiguado.

A continuación definimos el factor de amortiguamiento:

$$\varepsilon = c/c_c \quad (2.3.1.15)$$

La forma de la vibración en el caso subamortiguado seguirá la ecuación:

$$x = Ae^{-\frac{c}{2m}t} \cos(\omega_1 t - \theta) \quad (2.3.1.16)$$

Siendo $\omega_1 = \sqrt{\omega^2 - \left(\frac{c}{2m}\right)^2}$ la pseudo-frecuencia angular. Graficando (2.3.1.16) tenemos:

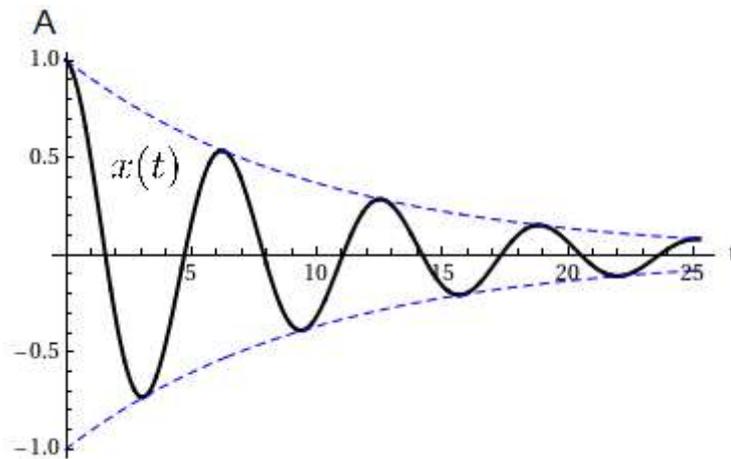


Figura 2.3.1.2 Oscilación Subamortiguada. [13]

En la Figura 2.3.1.2 se observa en color azul el decaimiento logarítmico.

Se mencionó que un amortiguador incrementa el período de oscilación a ω_1 , pero en la mayoría de las aplicaciones prácticas de interés la variación puede no tomarse en cuenta por ser pequeña. Por lo tanto $\omega_1 \cong \omega_0$ por $\varepsilon < 0,2$.

- VIBRACIÓN FORZADA

Si el sistema se ve excitado por una fuerza periódica de amplitud F_0 y frecuencia angular ω , oscilará con la frecuencia de ésta una vez alcanzado el estado permanente.

Antes de llegar a este estado, tendrá un breve período transitorio. Dicho transitorio será de vital importancia cuando involucre choques, impactos y cargas en movimiento. La falla producida por el estado transitorio se asocia en general a que se sobrepasa la resistencia mecánica de algún componente.

La vibración forzada permanente se asocia a la operación continua de la máquina (el paso de las palas de una turbina, la frecuencia del engranaje, un desbalance, etc.). El mecanismo de rotura más común en este caso será el de fatiga luego de un tiempo de exposición prolongado [12]. En la Figura 2.3.1.3 se observan los componentes del movimiento forzado amortiguado.

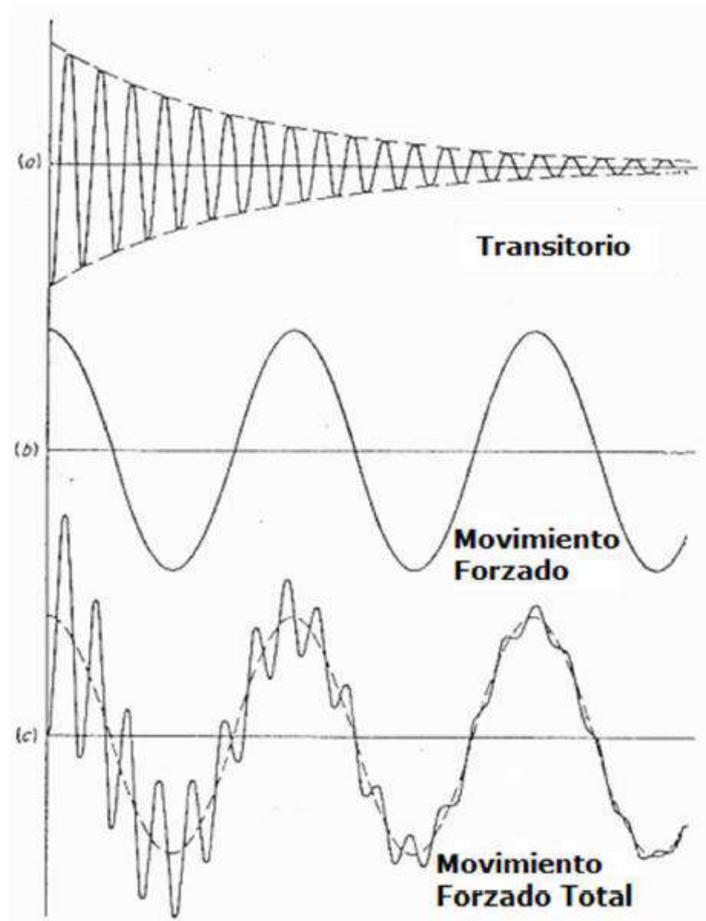


Figura 2.3.1.3 Componentes de la Vibración Forzada Amortiguada sin resonancia [12]

La ecuación de movimiento será:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (2.3.1.17)$$

Cuya solución será:

$$x = A \sin(\omega t - \theta) \quad (2.3.1.18)$$

Donde:

$$A = \left(\frac{F_0}{k}\right) \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + \left(\frac{c\omega}{k}\right)^2}} \quad (2.3.1.19)$$

Si graficamos la amplificación de la amplitud en función de la relación entre la pulsación de la perturbadora y la natural del sistema, tendremos la respuesta en frecuencia de la Figura 2.3.1.4 Resonancia.:

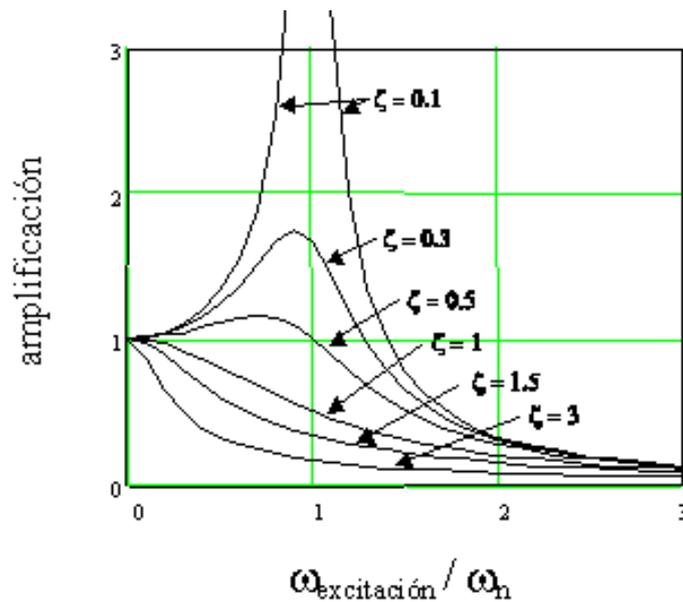


Figura 2.3.1.4 Resonancia. [14]

La condición de resonancia se obtiene cuando $\omega = \omega_0$ donde la amplitud de la oscilación tiende a infinito sin amortiguamiento. Con amortiguamiento, los valores máximos se concentran en el mismo valor. A medida que se incrementa el amortiguamiento, los valores máximos se producen a valores de $\omega < \omega_0$. Pero como ya se comentó, los valores de ζ tienden a ser menores de 0,2 y dicho corrimiento puede despreciarse. [9]

2.3.1.3. SISTEMAS DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD

Un gran número de sistemas resorte-masa-amortiguación que forman un sistema mecánico se llaman grados de libertad, y la energía de vibración que se pone en la máquina, se distribuirá entre los grados de libertad en cantidades que dependerán de sus frecuencias naturales y de la amortiguación, así como de la frecuencia de la fuente de la energía [12].

A cada pulsación le corresponde una configuración determinada, esto significa que las posiciones instantáneas de cada una de las coordenadas que definen la posición del sistema guardan una relación constante entre sí. Cada configuración es un “modo de vibrar”.

Si el sistema es excitado por una perturbación periódica de frecuencia angular igual a alguna de sus pulsaciones propias, éste entrará en resonancia. O sea que tenemos tantas condiciones de resonancia como grados de libertad del sistema. [9]

2.3.1.4. VIBRACIONES TORCIONALES

Todas las ecuaciones y conceptos vistos hasta ahora en vibraciones rectilíneas pueden trasladarse con toda validez al caso de vibraciones torsionales. Sólo bastará con reemplazar en las ecuaciones (2.3.1.1) y (2.3.1.12) a la masa m por el momento de inercia I , la constante elástica k por $k_{\text{torsión}}$ y el desplazamiento x con sus derivadas por los parámetros angulares θ y sus derivadas. [9]

2.3.1.5. VELOCIDAD CRÍTICA EN EJES

Todos los ejes, aun sin la presencia de cargas externas, se deforman durante la rotación. La magnitud de la deformación depende de la rigidez del eje y de sus soportes, de la masa total

del eje, y de las piezas que se le añaden, del desequilibrio de la masa con respecto al eje de rotación y del amortiguamiento presente en el sistema. [12]

La velocidad crítica es aquella que produce una amplitud de flexión del eje que lo lleva a la rotura. Esta deformación corresponde a una flexión lateral del eje. Si igualamos la fuerza del desequilibrio con la fuerza elástica de restitución podemos calcular la velocidad crítica mediante un sistema vibratorio equivalente:

$$\omega_c = \omega_0 = \sqrt{k_{eq}/m} \quad (2.3.1.20)$$

La velocidad crítica no depende del amortiguamiento por tratarse de un desequilibrio de fuerzas que son constantes para cada ω . [9]

Como se explicó en la sección 2.3.1.3, se corresponde un grado de libertad por cada sistema masa-resorte-amortiguador. Y por cada grado de libertad existe un modo de resonar. Por lo tanto, para un eje de masa despreciable con varias masas concentradas unidas a él (n grados de libertad) existen distintos métodos de cálculo de las n velocidades críticas:

- Método de Rayleigh: proporciona una aproximación para la primera velocidad crítica de un sistema de masas múltiples (sobrestimación)
- Método de ecuación de frecuencias: proporciona valores exactos de las n velocidades, pero resulta un método complejo para $n > 3$
- Método de Dunkerley: proporciona otra aproximación para la primera velocidad crítica de un sistema de masas múltiples (subestimación)

La aproximación de Rayleigh resulta la más utilizada, consiste en considerar que las deformaciones o amplitudes son proporcionales a las deformaciones debidas a los pesos:

$$\omega_{c1} = \sqrt{\frac{g \cdot \sum m_n \cdot \delta_n}{\sum m_n \cdot \delta_n^2}} \quad (2.3.1.21)$$

Donde:

ω_{c1} : primera velocidad crítica

g : aceleración de la gravedad

m : pesos asociados al eje

δ : deformación estática correspondiente a cada peso

Según su clasificación los rotores se dividen en rígidos y flexibles, también se habla de semirígidos o semiflexibles para indicar estados intermedios.

Un rotor rígido es aquel que opera bastante por debajo de su primera velocidad crítica o primera frecuencia natural de vibración. Por el contrario, uno flexible es aquel en que su velocidad nominal de rotación está en las proximidades o es superior a su primera frecuencia natural de vibración.

Entendiéndose como frecuencia natural de vibración o velocidad crítica a cualquiera de las velocidades que coinciden con la frecuencia natural de vibración del rotor y para la cual la respuesta del sistema a una excitación no es lineal (por ejemplo, la excitación producida por

un (desbalanceo). Es decir que la clasificación de un rotor como flexible o rígido depende de la relación entre su velocidad crítica y la velocidad a la cual tiene que operar. [12]

2.3.1.6. MAGNITUDES USUALES EN LA MEDICIÓN DE VIBRACIONES

Para el desplazamiento se utiliza la doble amplitud; o sea el valor pico a pico de la señal medida en micrones [μ] o milésimas de pulgadas [mils].

Para velocidad y aceleración se utiliza usualmente el valor máximo, o sea cero a pico. Se los expresa en [mm/s] o [ips] para la velocidad y para la aceleración en [g] o [mm/s²]. [9]

Una unidad muy utilizada es el Decibel, que responde a:

$$dB = 20 \log_{10} \left(\frac{A}{A_r} \right) \quad (2.3.1.22)$$

Siendo A la magnitud medida y A_r un valor de referencia. Este valor de referencia según Norma ISO R1683 será:

Para el desplazamiento = 10^{-9} mm

Para la velocidad = 10^{-6} mm/s

Para la aceleración = 10^{-3} mm/s²

2.3.1.7. ESPECTRO DE FRECUENCIA

La vibración de una máquina es un fenómeno complejo. Su origen es diverso y normalmente es el resultado de la interacción de diversas fuentes. Un sensor de vibración permite capturar una señal en función del tiempo que da una visión del movimiento oscilatorio. En estas señales se encuentra plasmada toda la información acerca del comportamiento de cada componente de la máquina, pero por lo general es imposible distinguir a simple vista los diferentes componentes. Existen otras formas para realizar un estudio de vibraciones, entre las cuales se encuentra mirar esta señal en el dominio de la frecuencia. Esta es la gráfica de Amplitud vs Frecuencia y es conocida con el nombre de espectro, en la cual a se tiene separadamente la frecuencia de cada excitación y la amplitud que ésta produce separadamente. Esta es la herramienta más usada para el análisis de maquinaria. En la Figura 2.3.1.5 se aprecia una descomposición de la señal en espectros de frecuencia y tiempo.

El análisis de espectro se basa habitualmente en las Series de Fourier y de forma más concreta en la Transformada de Fourier.

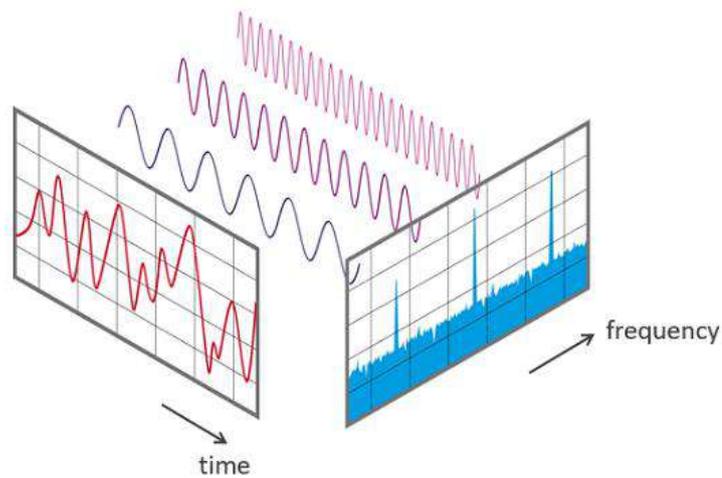


Figura 2.3.1.5. Vista de una señal en el dominio del tiempo y la frecuencia. [15]

- Serie de Fourier

La serie de Fourier consiste en una sumatoria infinita de funciones sinusoidales multiplicadas por factores de ponderación. De esta manera se puede descomponer una función periódica en una sumatoria de funciones sinusoidales con frecuencias enteras, lo cual es mucho más simple de analizar. [16]

Esto se indica en la ecuación de la serie escrita de forma compleja como:

$$f(t) \sim \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{in\omega t} \quad (2.3.1.23)$$

Donde C_n sería:

$$C_n = \frac{1}{T} \int_{T/2}^{T/2} f(t) e^{-in\omega t} dt \quad (2.3.1.24)$$

- Transformada de Fourier

La transformada de Fourier nos permite pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia y está dada por la siguiente ecuación:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.3.1.25)$$

Y para pasar del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo existe la transformada inversa siguiente:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (2.3.1.26)$$

La dificultad de este procedimiento es que se requiere conocer la ecuación de la señal, que para los casos reales es imposible, ya que la señal está contaminada con ruido y señales provenientes de otros equipos lo que hace prácticamente inviable que este método sea aplicable en la realidad. [12]

- Transformada Discreta de Fourier (DFT)

Al no poder contar con una función de la vibración, se mide la señal y se procede a tomar valores puntuales de ésta (discretizarla), luego, la DFT transforma N puntos tomados de la señal temporal en N/2 puntos discretos del espectro, que son llamados “Líneas” cuando se trabaja en el espectro en frecuencias. La ecuación de la DFT es la siguiente:

$$X(k) = \sum_{n=1}^N x(n) e^{-\frac{j2\pi kn}{N}}, \quad k = 1, 2 \dots N \quad (2.3.1.27)$$

Este método requiere muchos recursos y no es el más utilizado en la actualidad.

- Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Este método reduce la cantidad de puntos a analizar de N^2 a $N \cdot \log N$, reduce el error y el tiempo de cálculo respecto al DFT.

Estrictamente hablando, la FFT es un algoritmo optimizado para implementar la DFT. Este impone algunas limitaciones en la señal y en el espectro resultante ya que la señal muestreada y que se va a transformar debe consistir de un número de muestras igual a una potencia de dos. La mayoría de los analizadores de FFT permiten la transformación de 512, 1024, 2048 o 4096 muestras. El rango de frecuencias cubierto por el análisis FFT depende de la cantidad de muestras recogidas y de la proporción de muestreo. [15]

2.3.2. ADQUISICIÓN DE DATOS

La adquisición de datos es el primer y principal paso a dar para hacer un análisis de vibraciones. Los datos a tomar, desplazamiento, velocidad o aceleración dependerán de la velocidad de la máquina, de acuerdo con su relación equivalente de frecuencia (rpm=cpm). [12]

2.3.2.1. PROCEDIMIENTO DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Los pasos a seguir para la adquisición de datos es la siguiente:

- I. Determinación de las características de diseño y funcionamiento de la máquina: Velocidad de rotación de la máquina (rpm), apoyos, ruido, acoplamientos, entorno, etc.
- II. Determinación de la finalidad del análisis: mediciones de rutina, mediciones como parte de la creación de un histórico de datos de la máquina o toma de datos antes y después de una reparación.
- III. Selección de los parámetros de medición: desplazamiento, velocidad o aceleración.

- IV. Determinación de posición y dirección de las medidas de los transductores
- V. Selección del instrumento de medición y transductores.
- VI. Determinación del tipo específico de datos requeridos para la interpretación de las medidas realizadas: valores de magnitud total, espectro de frecuencias, amplitud-tiempo, envolvente, estudio de engranajes o de cavitación.
- VII. Toma de datos.

Se ampliará sobre algunos de estos pasos en secciones siguientes. [12]

2.3.2.2. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

La cantidad de elementos que se incluyan en la configuración del sistema de medición y análisis va a depender del fin que se requiera para los datos.

Se puede clasificar a los elementos en las siguientes categorías: Elementos electrónicos (modulación de amplitud, conversores analógico/digitales, integradores, atenuadores, amplificadores y filtros) e instrumentos de análisis.

El funcionamiento de los componentes electrónicos escapa del alcance de este proyecto por lo que se estudiará su función y su utilidad en el procesamiento de la señal en la sección de análisis.

De los instrumentos de análisis, el mayormente utilizado es el denominado Analizador F.F.T. basado en la transformada rápida de Fourier ya mencionada en la sección 2.3.1.7.

El funcionamiento a grandes rasgos consiste en tomar muestras (valores discretos) de la señal continua y, con estas muestras y aplicando una expresión matemática descubierta por el matemático Fourier, se obtiene el espectro correspondiente a la señal que habíamos medido. Por tanto, todo el proceso se reduce a digitalizar la señal continua a analizar y efectuar un cálculo numérico.

La precisión de los analizadores de Fourier se evalúa a través del número de líneas que pueden representar, siendo los valores más habituales los de 400, 800 y 1600 líneas.

Cada línea corresponde a una banda de frecuencia de ancho constante y de valor el de la frecuencia más alta analizada dividida por el número de líneas calculadas. Así, por ejemplo, si obtenemos un espectro en el que la frecuencia más alta sea de 1,6 kHz y tenemos un analizador de 3200 líneas, entonces el ancho de cada línea será de $1,6 \text{ kHz} / 3200 \text{ líneas} = 0,5 \text{ Hz/línea}$. Se ampliará sobre el ancho de banda en la sección de análisis. [12]

2.3.2.3. TRANSDUCTORES

Para poder medir una vibración, cuantificarla y analizarla, es necesario contar con sensores capaces de recibir el movimiento oscilatorio y transformarlo en una magnitud física proporcional que pueda ser procesada. Estos elementos son los transductores.

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

El tipo de transductor a utilizar depende de las características de la máquina a ser analizada. Los datos a tomar, desplazamiento, velocidad o aceleración dependerán de la velocidad de la máquina, de acuerdo con su relación equivalente de frecuencia ($\text{rpm} = \text{cpm}$). Así, para bajas rpm, (0 a 1200), se podrán tomar datos de desplazamientos. Para velocidades que estén

dentro del orcen de 600 y 60.000 rpm, se medirán velocidades. Y para los que sean de orden superior, los datos a tomar serán aceleraciones.

Otro hecho a tener en cuenta es que, si bien con cualquier transductor ya sea de desplazamiento, velocidad o aceleración, mediante adecuados circuitos de integración o derivación se pueden obtener los otros parámetros. Igualmente, debido a dichas modificaciones en la señal, puede que los valores no coincidan con los medidos con un transductor sensible a la magnitud física deseada.

- **TRANSDUCTOR DE PROXIMIDAD (DESPLAZAMIENTO)**

Estos se basan en efectos electromagnéticos que varían al modificarse la distancia entre la punta de prueba y el cuerpo vibrante metálico (corrientes de Foucault). Tienen la ventaja de no interferir por contacto en el cuerpo, pero generalmente requieren un montaje rígido y pesado.

Es una unidad de montaje permanente, y necesita un amplificador que condiciona la señal para generar un voltaje de salida, proporcional a la distancia entre el transductor y la extremidad del eje.

Cuando los desplazamientos son muy pequeños, del orden de los micrones, se requiere que el eje esté perfectamente pulid, desmagnetizado y puesto a tierra eléctricamente. [9]

Es importante saber que el transductor mide el desplazamiento relativo entre el rodamiento y el eje, y no mide el nivel de vibración total.

Las frecuencias de trabajo van desde los 0 Hz hasta los 1000 Hz aproximadamente. [12]

- **TRANSDUCTOR SÍSMICO (VELOCIDAD)**

Estos vibrómetros poseen una masa suspendida respecto de una carcasa, con características tales que, en el rango de frecuencia a medir, esa masa se comporta como un sistema inercial de referencia sin movimiento. De esa manera, la carcasa acompaña al cuerpo vibrante y el desplazamiento relativo entre ésta y la masa suspendida dará una indicación de la vibración.

La señal eléctrica proporcional a la vibración se genera utilizando un imán permanente como la masa suspendida y colocando una bobina de alambre en la carcasa rodeando dicho imán. El movimiento relativo del imán respecto de la bobina genera una fuerza electromotriz (f.e.m.) proporcional a la velocidad de la vibración.

La importancia de la velocidad de vibración como parámetro indicativo de la misma, en el rango de frecuencias más comunes de las máquinas rotativas, lo ha dado la experiencia, al mostrar con ella características que no se encuentran claramente al medir desplazamiento o aceleración. [9]

Aun tomando en cuenta estas ventajas, el transductor de velocidad tiene muchas desventajas, que lo vuelven casi obsoleto para instalaciones nuevas, aunque hoy en día todavía se usan varios miles. Es relativamente pesado y complejo y por eso es caro. El resorte y el imán forman un sistema resonante de baja frecuencia, con una frecuencia natural de 10 Hz. La resonancia tiene que ser altamente amortiguada, para evitar un pico importante en la respuesta a esta frecuencia. El problema es que la amortiguación en cualquier diseño práctico es sensible a la temperatura, y eso provoca que la respuesta de frecuencia y la respuesta de fase dependan de la temperatura. [12]

Esto debe tenerse en cuenta al momento de seleccionar un transductor de este tipo ya que siempre deberán trabajar por encima de su frecuencia natural, siendo este su límite inferior

de trabajo. Este límite inferior se encuentra generalmente en los 10 Hz y el límite superior, aunque teóricamente no tiene limitaciones a frecuencias altas, se suele utilizar en la práctica entre los 500 y los 2000 Hz.

- **ACELERÓMETRO PIEZOELÉCTRICO (ACELERACIÓN)**

Un acelerómetro piezoeléctrico es un instrumento que genera de forma natural una señal eléctrica y, por tanto, no necesita una fuente de alimentación. Tampoco tiene piezas móviles que se desgasten. Ofrece una salida proporcional a la aceleración que puede integrarse y transformarse en señales proporcionales de velocidad y desplazamiento. [17]

Pueden trabajar a temperaturas extremas, pero a cambio tienen una alta impedancia de salida que exige utilizar cables con bajo nivel de ruido y amplificadores de carga para acondicionar la señal. Si se incrementa la temperatura de un material piezoeléctrico, se va a llegar al llamado "punto Curie" o "temperatura Curie" y se pierde la propiedad piezoeléctrica. Una vez que esto pasa, el transductor está defectuoso y no se puede reparar. [12]

El elemento central de un acelerómetro piezoeléctrico es una lámina de material sensible al efecto piezoeléctrico, normalmente un elemento cerámico ferroeléctrico polarizado artificialmente. Cuando esta lámina se somete a un esfuerzo mecánico de tensión, compresión o cizallamiento, genera entre sus polos una carga eléctrica proporcional a la fuerza aplicada. Cuando se mueve el acelerómetro en la dirección arriba abajo, la fuerza que se requiere para mover la masa sísmica esta soportada por el elemento activo. Según la segunda ley de Newton, esa fuerza es proporcional a la aceleración de la masa. La fuerza sobre el cristal produce la señal de salida, que por consecuencia es proporcional a la aceleración del transductor. Los acelerómetros son lineales en el sentido de la amplitud, lo que quiere decir que tienen un rango dinámico muy largo. Esto último es válido si se trabaja por debajo de la frecuencia natural, la cual en el caso de los cristales piezoeléctricos se encuentra entre los 40 a los 70 kHz.

Hay dos configuraciones típicas según el tipo de fuerza que ejerza la masa sobre el elemento piezoeléctrico: Compresión y cizallamiento. [9]

La mayoría de los acelerómetros que hoy en día se usan en la industria son del tipo "PCI", lo que quiere decir que tienen un preamplificador interno de circuito Integrado. El acelerómetro PCI tendrá un límite de baja frecuencia, debido al mismo amplificador y este se sitúa generalmente a 1 Hz para la mayoría de las unidades disponibles comercialmente.

El rango de utilización es muy amplio y se extiende desde 1 (o 0,1 Hz si es un transductor especialmente diseñado) hasta cerca de 35 kHz. El límite inferior está marcado por la pérdida de sensibilidad mientras que el límite superior se debe a la resonancia. La resonancia del conjunto depende del montaje del mismo.

2.3.2.4. MONTAJE DEL SENSOR

Se analizará el montaje sólo del acelerómetro ya que es el más utilizado en la actualidad para las aplicaciones en máquinas eléctricas. Para los acelerómetros, existen varias posibilidades con sus respectivas características que deben adaptarse a la medición específica. En dependencia del elemento de fijación empleado se podrá contar con un mayor o menor aprovechamiento del rango de frecuencias del acelerómetro durante la medición.

- ATORNILLADO A LA ESTRUCTURA

Se emplea para medir vibraciones en una banda de altas frecuencias, para lo cual se requiere garantizar una frecuencia de resonancia alta. También se emplea para el monitoreo permanente de las vibraciones en maquinarias y estructuras.

Lo ideal es montarlo sobre una superficie plana y lisa utilizando un perno roscado. El orificio en la pieza de la máquina debe ser lo suficientemente profundo como para que el perno no haga presión contra la base del acelerómetro. No debe ajustarse exageradamente pues puede deformarse y perder sensibilidad (ver Figura 2.3.2.1) [12].

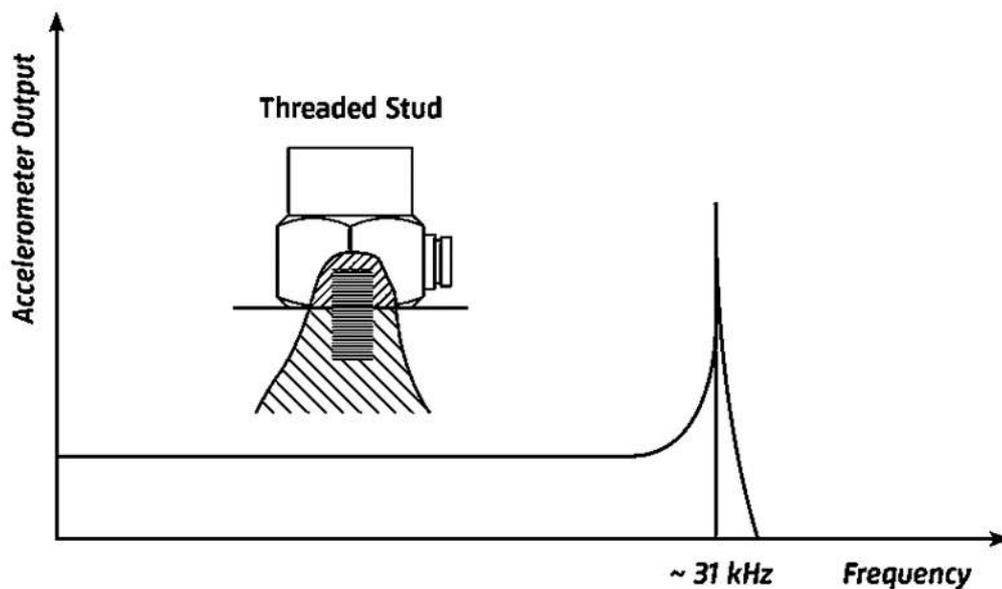


Figura 2.3.2.1 Resonancia del acelerómetro atornillado a la estructura. [17]

- MONTADO CON CERA DE ABEJA

Es un método de fijación muy empleado para realizar mediciones rápidas cuando no es posible taladrar la superficie de medición o cuando se utilizan acelerómetros que no poseen agujero roscado en su base.

Es una opción de montaje rápida y fácil reportando una frecuencia de resonancia ligeramente menor que la lograda con perno roscado, debiéndose emplear la menor cantidad de cera posible ya que un exceso de ésta contribuye a reducir el rango de frecuencias de operación satisfactoria del acelerómetro. Es importante apretar la cera lo más posible para conseguir una capa muy fina.

Este método solo puede emplearse hasta unos 40 °C porque, a temperaturas más altas, la cera de abeja se ablanda. Sobre una superficie limpia, este método de montaje con cera de abeja puede utilizarse hasta niveles de aceleración de unos 100m/s² (ver Figura 2.3.2.2) [17].

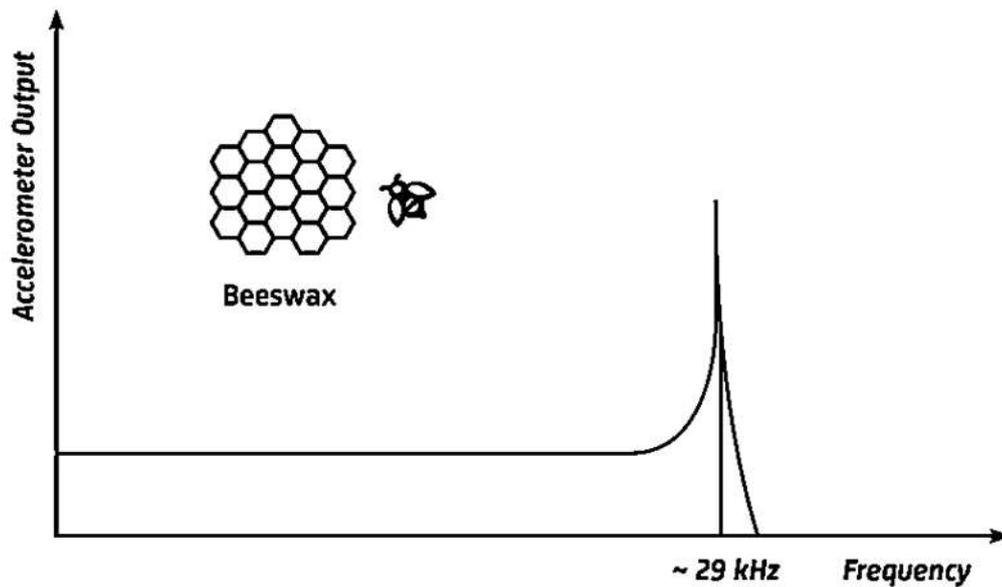


Figura 2.3.2.2 Resonancia del acelerómetro montado con cera de abeja. [17]

- ACOPLAMIENTO CON IMÁN PERMANENTE

Este método exige de una limpieza total de la superficie de montaje, así como del menor nivel de rugosidad posible. La rapidez del montaje hace de este método una vía ideal para la realización de mediciones en rutinas de mantenimiento predictivo.

Puede medir niveles altos de aceleración, aunque la frecuencia de resonancia resultante será significativamente menor de la lograda con el uso del perno roscado. En consecuencia, no puede utilizarse para mediciones muy por encima de 7-13 kHz. La fuerza de retención del imán es suficiente para niveles de vibración de hasta 1000 m/s^2 (dependiendo del tamaño del acelerómetro). No debe utilizarse este montaje para medir vibraciones impulsivas de choque (ver Figura 2.3.2.3) [9].

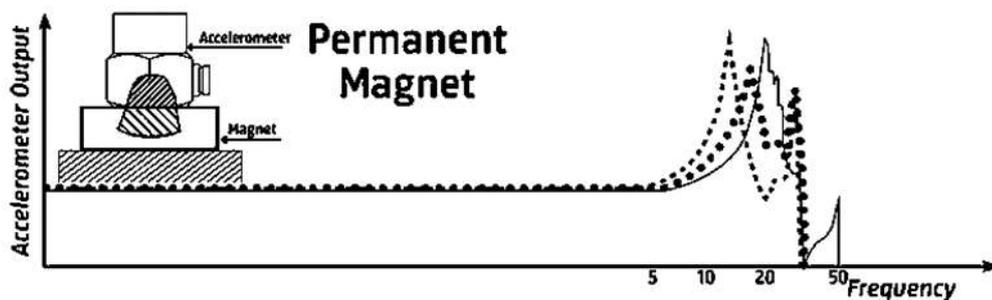


Figura 2.3.2.3 Resonancia del acelerómetro montado con un imán permanente. [17]

- ACOPLADO CON CEMENTO

Cuando se desea crear un punto de medida permanente en una máquina, pero no interesa taladrar orificios en ella, se pueden utilizar pernos de cimentación, que se fijan al punto de medida con un adhesivo rígido. Es recomendable emplear adhesivos epoxi y de cianoacrilato. Los adhesivos más blandos pueden reducir considerablemente el rango de frecuencia utilizable del acelerómetro (ver Figura 2.3.2.4) [17].

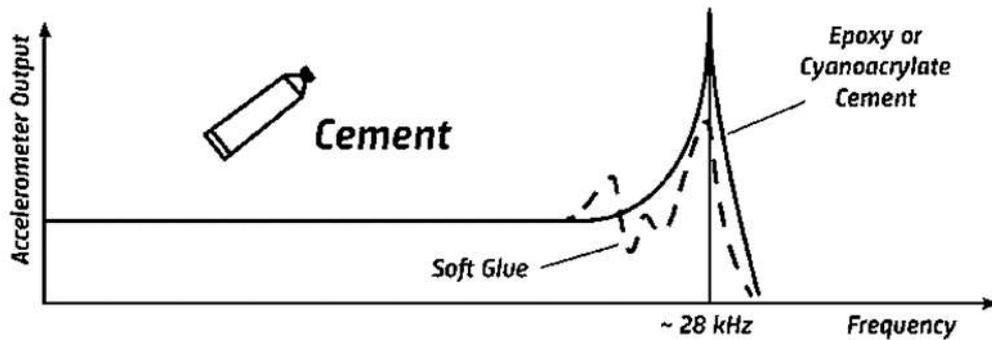


Figura 2.3.2.4 Resonancia del acelerómetro acoplado con cementos de contacto. [17]

- ATORNILLADO CON TORNILLO Y ARANDELA NO CONDUCTORES ELÉCTRICOS

Si es preciso aislar eléctricamente el cuerpo del acelerómetro del objeto de medida, se puede emplear una arandela de mica y un perno aislado. Este montaje se utiliza para evitar bucles de masa (corrientes en el apantallamiento del cable, ocurren cuando el acelerómetro y el equipo de medida tienen conexiones a masa diferentes). Se suministra una arandela de mica gruesa, de la que es preciso cortar una lámina delgada (ver Figura 2.3.2.5).

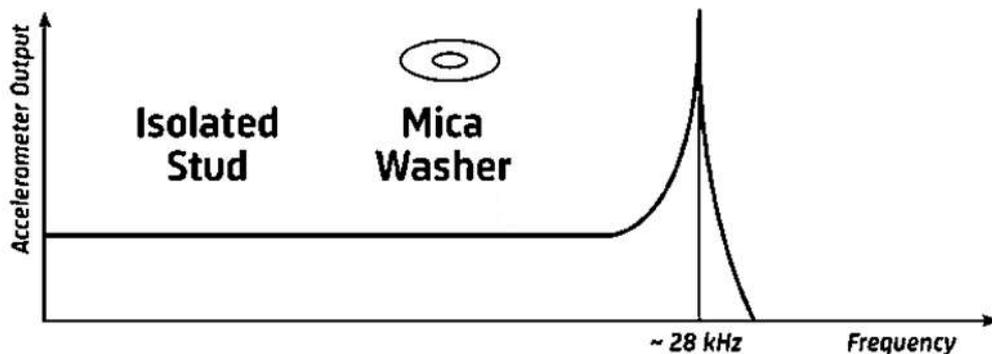


Figura 2.3.2.5 Resonancia del acelerómetro atornillado con perno aislado y arandela de mica. [17]

- APOYADO CON LA MANO

Para medidas rápidas de reconocimiento o para llegar a lugares inaccesibles, resulta muy cómodo utilizar una sonda de mano con un acelerómetro montado en el extremo superior. No obstante, este montaje tiene una rigidez general muy baja y puede dar lugar a grandes errores de medida.

Este último método no da resultados repetibles. Se debe utilizar un filtro de paso bajo para limitar el rango de medida a 1 kHz (ver Figura 2.3.2.6).

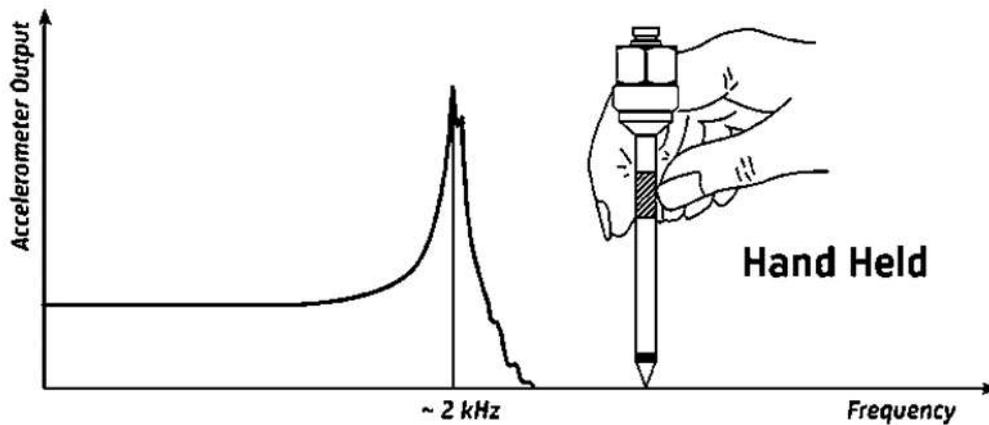


Figura 2.3.2.6 Resonancia del acelerómetro con punta de prueba apoyado con la mano. [17]

En general es deseable colocar el transductor de prueba lo más cerca posible del rodamiento, con metal sólido entre el rodamiento y el sensor. Si es posible habrá que seleccionar los lugares de ubicación de tal manera que no haya juntas entre metal y metal, entre el rodamiento y el sensor.

Para ayudar en la determinación de problemas de máquinas es muy útil obtener datos de vibración de cada punto de medición en tres direcciones. Esas direcciones se llaman Axial, Radial, y Tangencial. Axial es la dirección paralela al eje. Radial y tangencial se encuentran en el plano radial del rodamiento. La Radial y Tangencial deben ubicarse a 90° entre ellas.

2.3.2.5. CONSIDERACIONES GENERALES

Cuando se lleva a cabo una inspección de vibración de un grupo de máquinas se tendrá que tomar en cuenta los puntos siguientes con el propósito de asegurar la consistencia de los datos desde una medición a la siguiente.

- FRECUENCIA MÁXIMA

Denominamos así al punto máximo que alcanza el eje de frecuencias de un espectro, este punto se fija en función de la variable que se va a medir y del equipo y las posibles fallas que éste pudiera presentar.

El rango de frecuencias debe reflejar apropiadamente las muestras con una adecuada selección del transductor, debemos verificar que el rango de respuesta del sensor se adecúe a las frecuencias esperadas de vibración.

La Tabla 2.3.2.5.1 contiene rangos de frecuencias recomendados para espectros tomados en máquinas rotativas para monitoreo y análisis. [12]

Componente	Frecuencia máxima
Eje	10xRPM
Cajas de engranajes	3xGM (frecuencia de engrane)
Elementos de rodamientos	3xBPFI (frecuencia de falla de pista interna)
Bombas	3xBP (frecuencia de paso de álabe)

Motores y generadores	3x2FL (frecuencia de línea)
Ventiladores	3xBP (frecuencia de paso de palas)
Cojinetes de deslizamiento	10xRPM

Tabla 2.3.2.5.1 Rangos de frecuencias máximas recomendados por ISO

- TIEMPO DE ADQUISICIÓN

Los analizadores F.F.T. recogen un trozo de señal temporal. Este depende de la frecuencia superior que se va a analizar; supongamos que vamos a analizar desde 0 Hz a 20 kHz con un analizador F.F.T. de 400 líneas, entonces cada filtro tendrá un ancho B de:

$$B = \frac{20000}{400} = 50 \text{ Hz} \quad (2.3.2.1)$$

El tiempo de medición será entonces:

$$B.T = 1 \rightarrow T = \frac{1}{50 \text{ Hz}} = 20 \text{ ms} \quad (2.3.2.2)$$

Otro ejemplo sería: Análisis entre 0 y 200 Hz analizando en 3200 líneas.

$$B = \frac{200 \text{ Hz}}{3200} = 0,0625 \text{ Hz de ancho de banda} \quad (2.3.2.3)$$

Y el tiempo de medición:

$$T = \frac{1}{0,0625 \text{ Hz}} = 16 \text{ s} \quad (2.3.2.4)$$

- CONDICIONES DE PRUEBAS

La firma de vibración (espectro característico) de una máquina depende en gran parte de sus parámetros de operación y de su estado físico. Los parámetros de operación incluyen factores como velocidad de operación, carga, presión de descarga de la bomba, y presión de entrega del compresor entre otros.

La máquina debe estar en condiciones de operación normal, cuando se recopilan datos de vibración. Si eso no fuera el caso, la firma de vibración no sería igual a las firmas de vibración recopiladas anteriormente, y ya no sería posible establecer una tendencia en el tiempo.

El nivel de vibración agregado por fuentes extrañas como máquinas cercanas, también deberá ser lo mismo cada vez que se recopilen datos.

Es imperativo, que cuando se recopilan datos, las RPM de la prueba estén muy cerca de las RPM que se usaron en pruebas anteriores. [12]

- PRUEBAS DE ARRANQUE/PARADA

Este tipo de prueba se realiza cuando se trata de comprobar si un equipo en el proceso de arranque desde 0 hasta llegar a su velocidad de funcionamiento pasa por alguna velocidad crítica o si la estructura soporte presenta una frecuencia natural en dicho intervalo de frecuencias, la prueba es bastante simple y se trata de registrar el comportamiento de la amplitud durante el arranque del equipo (Run Up) o su detención desde el instante de cortar la energía (coast down), estos ensayos suelen acompañarse de la medición de la fase de la vibración (diagrama de Bode) por lo que un instante de aumento de amplitud coincidente con un cambio de fase de 180° indicaría la presencia de una velocidad crítica o una frecuencia natural presente en la estructura.

Es importante tener en cuenta que, si se trata de una frecuencia natural del equipo respecto de su fundación, ésta puede manifestarse en una o varias direcciones, por lo que el ensayo se debiera repetir para las tres direcciones normales de control. [12]

- CALENTAMIENTO

Todas las máquinas deben ser probadas totalmente calentadas. La temperatura de la máquina afectará la alineación y los juegos en operación debido a la expansión termal.

Una máquina fría tendrá una firma de vibración diferente de una máquina caliente y esas pueden a veces ser totalmente diferentes. [12]

- INSPECCIÓN VISUAL

Es importante la inspección visual de una máquina en operación mientras que se está probando la vibración, ya que se pueden descubrir indicaciones evaluables acerca del estado de la máquina. [12]

Parte de la inspección visual incluye observar los valores que indiquen los instrumentos (presión, RPM, etc.) y examinar el entorno de la máquina en busca de anomalías (pérdidas de fluidos, partes calientes, vibración perceptible al tacto, ruidos, etc.). A su vez, es común consultar al operario, técnico o a la persona que más contacto tiene con la máquina si observó algo de lo mencionado o cualquier otra anomalía. La persona que comparte mucho tiempo con una máquina es más sensible a detectar cualquier irregularidad.

- RECONOCIMIENTO DE DATOS POBRES

Si aceptamos que la base de un buen diagnóstico es una buena medición, entonces queda claro que es fundamental que quien realice la medición sepa reconocer cuando el espectro capturado en la pantalla del colector de datos es fiel reflejo de la vibración generada por la máquina.

La saturación de los niveles de amplitud del transductor, un mal apoyo del sensor sobre la superficie del punto de control o simplemente un desperfecto en los cables de conexión, pueden generar lecturas pobres que es necesario identificar para descartarlas (ver Figura 2.3.2.7 y Figura 2.3.2.8) [12].

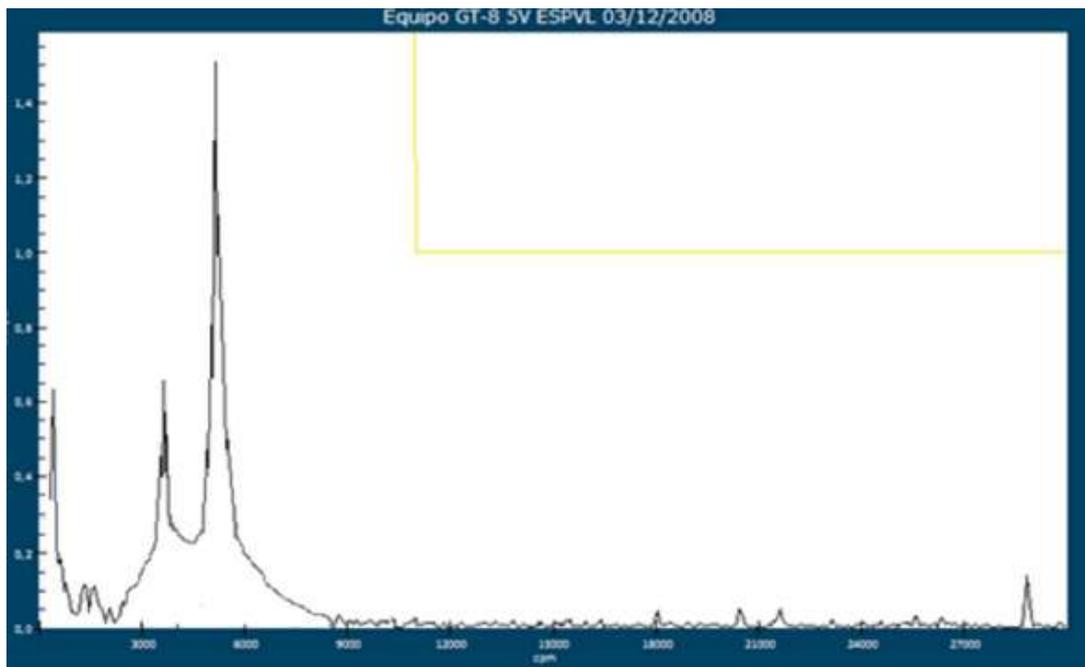


Figura 2.3.2.7 Componentes espectrales de base muy ancha indican un mal apoyo. [12]

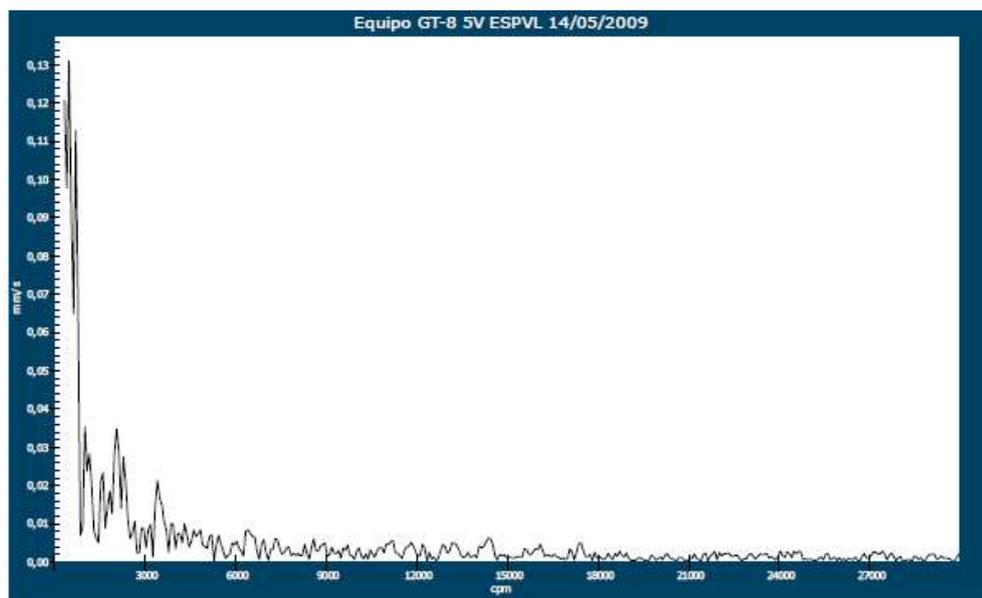


Figura 2.3.2.8 La concentración de los datos en origen de frecuencias indica saturación del transductor o un defecto del conexionado. [12]

2.3.3. TRATAMIENTO DE DATOS

2.3.3.1. MODULACIÓN DE AMPLITUD

La modulación consiste en hacer que un parámetro de la onda portadora cambie de valor de acuerdo con las variaciones de la señal moduladora, que es la información que queremos transmitir. En este caso, el parámetro a modular es la amplitud. La señal que obtenemos después de esta modulación recibe el nombre de señal modulada en amplitud (AM). La frecuencia de las oscilaciones de la onda portadora debe ser más elevada que la frecuencia de las oscilaciones de la moduladora. Para obtener una señal modulada son necesarias dos ondas senoidales: una de baja frecuencia, que nos va a proporcionar la onda moduladora, otra de alta frecuencia para producir la portadora (ver Figura 2.3.3.1) [12]

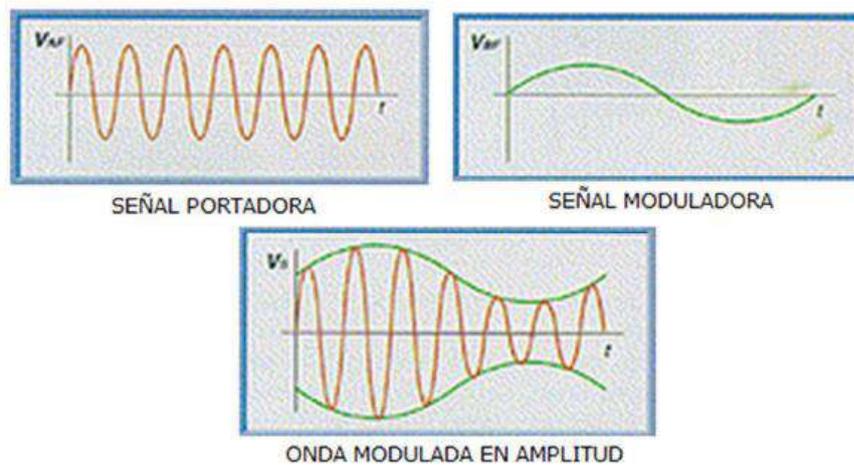


Figura 2.3.3.1 Modulación en amplitud. [12]

El espectro de una oscilación modulada en amplitud, AM, consta de la oscilación portadora f_p , de la oscilación moduladora f_m y de las dos bandas laterales, f_{p-fm} y f_{p+fm} (ver Figura 2.3.3.2).

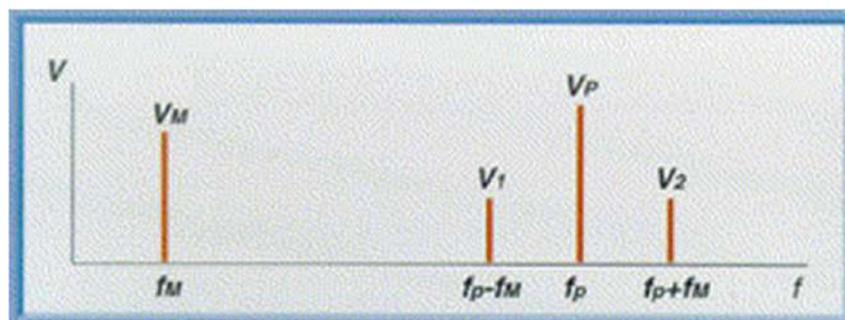


Figura 2.3.3.2 Espectro de frecuencia de una señal modulada [12]

2.3.3.2. CONVERSIÓN ANALÓGICO/DIGITAL

Una señal analógica es aquella cuya amplitud (típicamente voltaje de una señal que proviene de un transductor y amplificador) puede tomar en principio cualquier valor, esto es, su nivel en cualquier muestra no está limitado a un conjunto finito de niveles predefinidos como es el caso de las señales cuantificadas.

En cambio, una señal digital es aquella cuyas dimensiones (tiempo y amplitud) no son continuas sino discretas, lo que significa que la señal necesariamente ha de tomar unos determinados valores fijos predeterminados en momentos también discretos (ver Figura 2.3.3.3).

El primer paso en la realización de un análisis FFT es el procedimiento de muestreo.

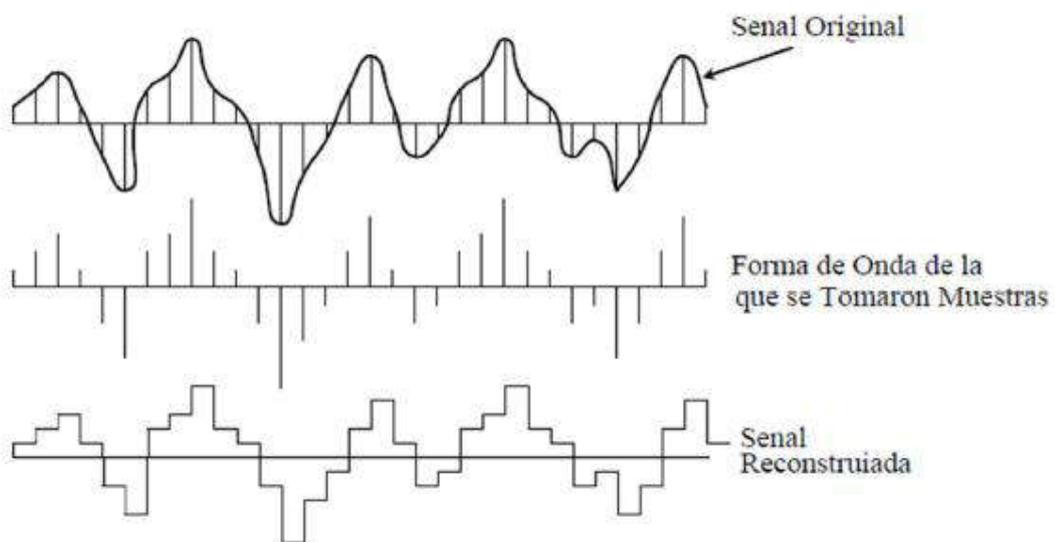


Figura 2.3.3.3 Transformación de una señal analógica en una digital. [12]

El muestreo es un procedimiento analógico y se realiza con un circuito "Tomar muestras y detener". La salida de este circuito es una secuencia de niveles de voltaje, que se mandan a un convertidor de análogo a digital (CAD). Aquí los niveles de voltaje se convierten en datos digitales que representan cada nivel de toma de muestras. La precisión de toma de muestras depende en parte de la cantidad de bits en los datos digitales. Más grande la cantidad de bits, más bajo el nivel de ruido y más grande será el rango dinámico. La mayoría de los analizadores FFT usan datos de 12 bits y eso produce un rango dinámico de alrededor de 70 dB. Datos de 14 bits pueden realizar un rango dinámico de 80 dB.

Para codificar toda la información contenida en las muestras de una señal, la frecuencia de muestreo debe ser por lo menos el doble de la frecuencia más alta presente en la señal. Este hecho a veces es llamado el criterio Nyquist.

El teorema demuestra que la reconstrucción exacta de una señal periódica continua en banda base a partir de sus muestras, es matemáticamente posible si la señal está limitada en banda y la tasa de muestreo es superior al doble de su ancho de banda.

En la Figura 2.3.3.4 se muestra el proceso A/D en diagrama de bloques, debe quedar claro que la señal digital de salida puede ser tan precisa como se requiera, pero eso requiere una cuantificación muy alta (mayor tiempo de muestreo). [12]

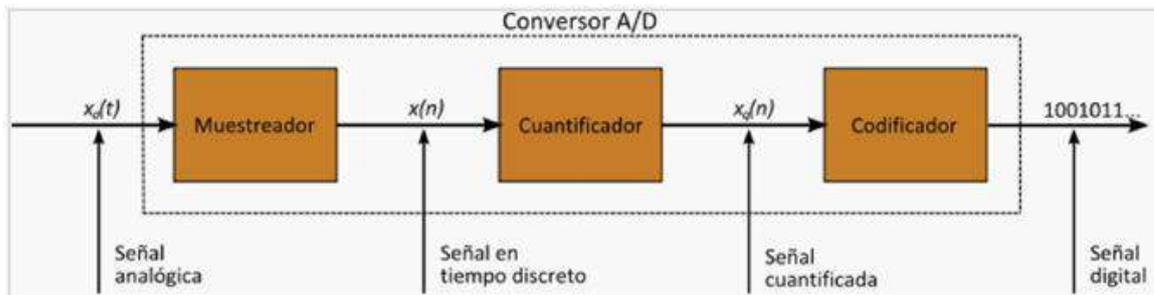


Figura 2.3.3.4 Proceso de conversión Analógica/Digital. [12]

2.3.3.3. INTEGRACIÓN

Es la operación matemática que es contraria de la derivación. En el análisis de vibración, la integración convierte una señal de aceleración (A) en una señal de velocidad (V), o una señal de velocidad en una señal de desplazamiento (D). Se puede hacer la integración con un integrador análogo en el dominio del tiempo o se puede hacer de manera digital en el dominio de la frecuencia. Por esta razón, el acelerómetro es la mejor elección de un transductor de vibraciones, ya que se pueden obtener fácilmente la velocidad y el desplazamiento de su señal de salida. Un integrador análogo es un filtro pasa-bajo con una atenuación de 6 dB/octava.

Cuando se convierte unidades de aceleración a unidades de velocidad, o unidades de velocidad a unidades de desplazamiento, esto se llama integración simple, cuando se convierte unidades de aceleración a unidades de desplazamiento se llama integración doble.

En una integración simple (A/V o V/D), la relación entre las dos unidades es proporcional a la inversa de la frecuencia expresada en Hz. Cuando se hace una doble integración (A/D), la relación entre las dos unidades es proporcional a $1/f^2$ como se grafica en la Figura 2.3.3.5.

Circuitos amplificadores integradores después del ingreso de la señal (A o V) usan estas relaciones proporcionales para entregar una nueva señal (V o D) en las unidades deseadas de medición. [12]

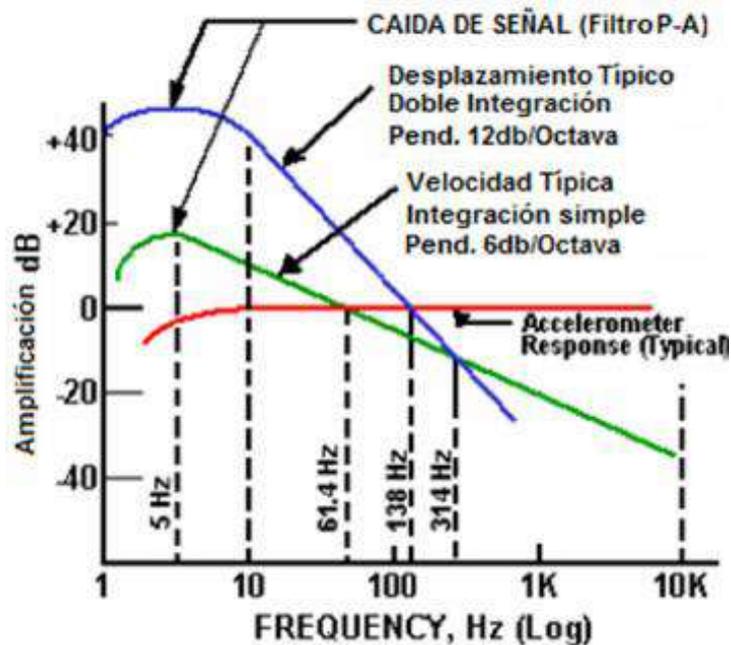


Figura 2.3.3.5 Amplificación/atenuación de circuitos integradores. [12]

2.3.3.4. AMPLIFICACIÓN/ATENUACIÓN

El uso de la amplificación y la atenuación de una señal para la configuración del sistema de medición y análisis de vibraciones se ejemplifican con el uso de los integradores como se observa en la Figura 2.3.3.5.

Teniendo en cuenta la escala logarítmica, +20 db indica una amplificación de la señal de 10X (10 veces) y + 40 db indica una amplificación de la señal de 100X. Análogamente, -20 db es igual a una atenuación de 0,1X, y -40 db equivale a una atenuación de 0,01X).

Se puede observar que para lograr una respuesta real de la vibración de baja frecuencia (menos de 5 Hz) cuando se realiza una simple o doble integración, suele ser necesario recurrir a la amplificación de la señal, mientras que para altas frecuencias (mayores a 1Khz) puede ser necesario recurrir a alguna atenuación, esta amplificación/atenuación dependerá de la calidad de los circuitos integradores y de que tan baja o alta en frecuencia sea la señal que se busca.

Al amplificar una señal real, con ruido y señales de baja frecuencia, ésta se vuelve inestable en la medida en que se la trabaje sin un acondicionamiento adecuado que evite la baja relación señal/ruido. Para evitar esto, se utiliza un filtro pasa-alto para reducir los niveles de señal en la región de baja frecuencia (de 0 a 10 Hz).

La atenuación da como resultado señales estables, pero hace que la señal integrada sea inexacta a baja frecuencia. Todos los circuitos electrónicos usados para integrar señales de vibración tienen una atenuación en baja frecuencia mediante un filtro pasa-alto, por lo tanto los instrumentos con circuitos integradores deben tener una adecuación apropiada de la señal en la región de las bajas frecuencias. [12]

2.3.3.5. INDICE SEÑAL-RUIDO

Cuando se analizan señales afectadas por ruido, es útil definir una medida del mismo que sea relativa a la propia señal.

Se define la relación señal-ruido, SNR (del inglés: signal to noise ratio), como el cociente entre el valor de la señal y el ruido. De ese modo, una SNR = 100 indica que la señal es 100 veces más relevante que el ruido que la afecta.

Los casos de SNR < 1 son muy difíciles de tratar.

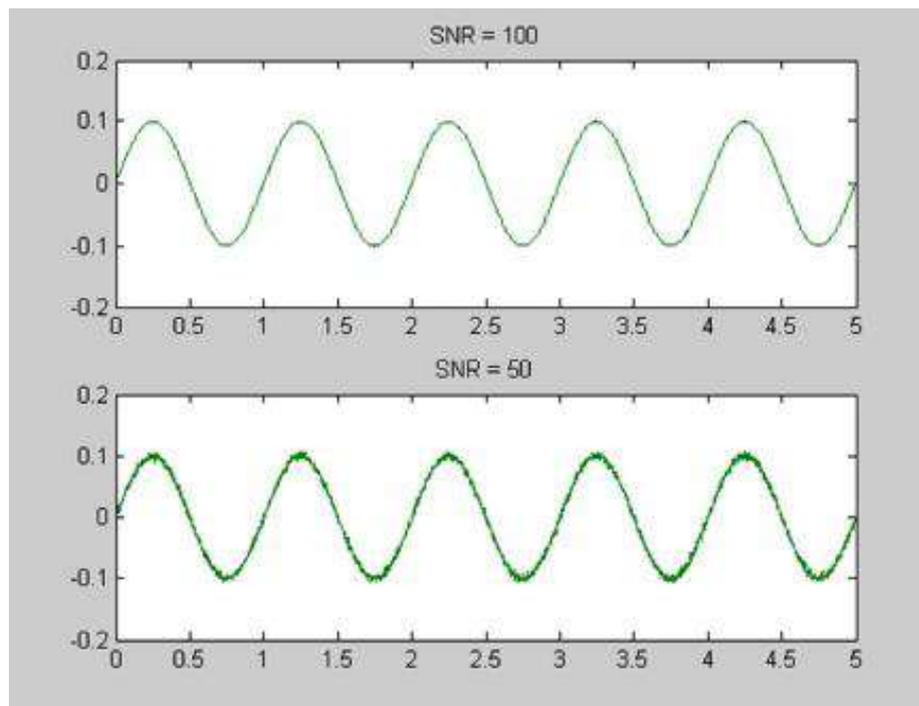


Figura 2.3.3.6 Oscilación con distintos valores de SRN. Parte 1. [12]

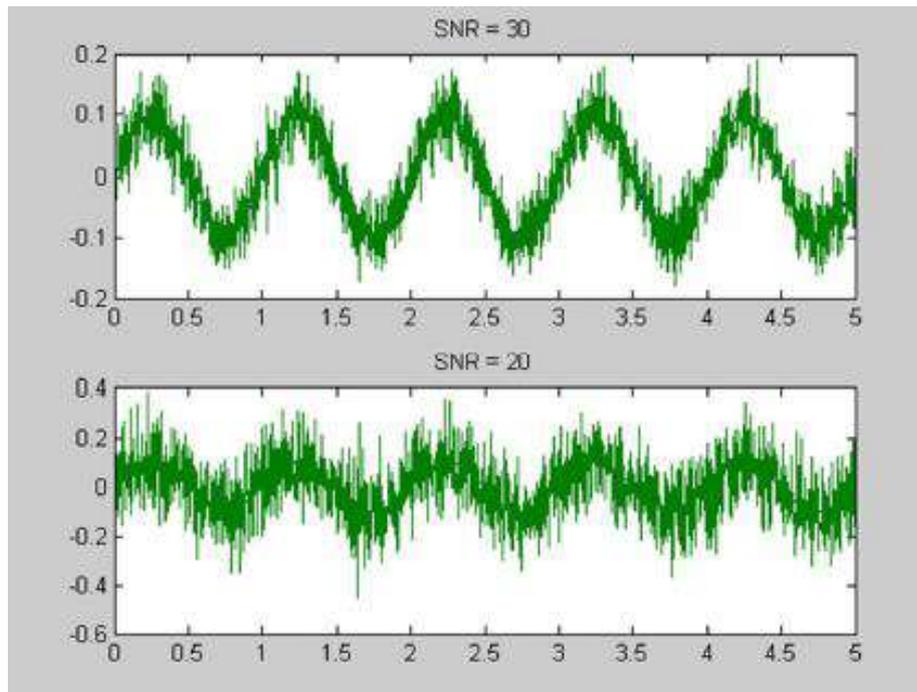


Figura 2.3.3.7 Oscilación con distintos valores de SNR. Parte 2. [12]

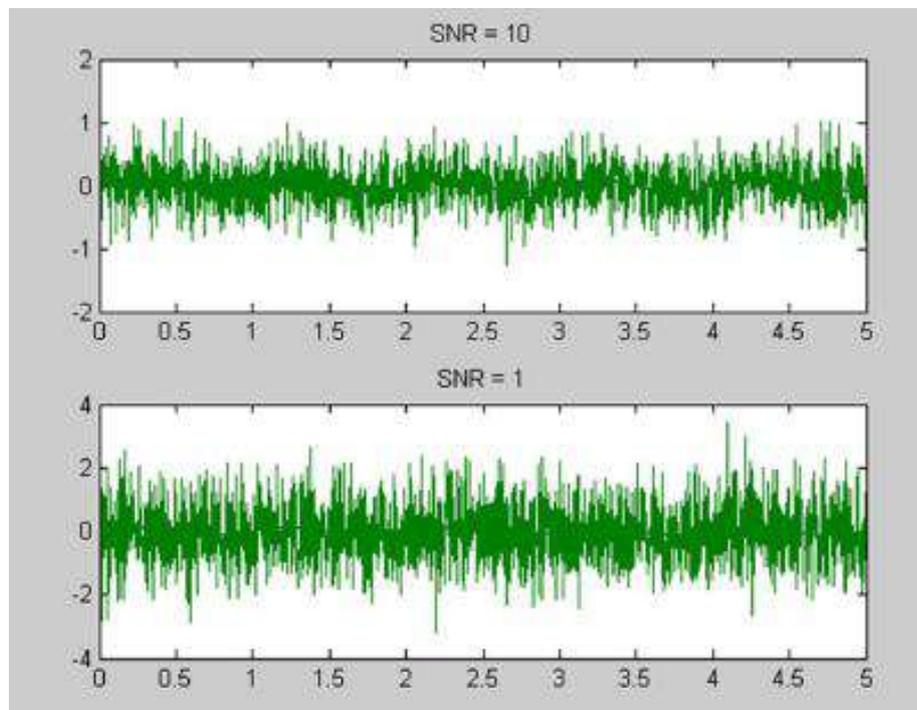


Figura 2.3.3.8 Oscilación con distintos valores de SNR. Parte 3. [12]

En la Figura 2.3.3.6 hasta la Figura 2.3.3.8 se observa la gran diferencia entre las mismas señales, pero con una relación SNR=100db decayendo por último a SNR=1db.

Por ruido entenderemos toda fluctuación aleatoria de una magnitud (sea cual sea) que tienda a enmascarar la señal de interés para nosotros. Estas fluctuaciones tienen como causa última la naturaleza discreta de la carga eléctrica y el movimiento errático de las partículas cargadas en el seno de la materia. En un sentido menos estricto, podría admitirse también como ruido cualquier señal indeseada que perturbase la señal de interés. Sin embargo, en casos como ese, se habla de interferencias y de señales interferentes, y no de ruido.

La presencia del ruido en un sistema electrónico es inevitable y puede provocar falsas respuestas en él, degradar su comportamiento, o hacerlo ineficaz para llevar a cabo las tareas para las que ha sido diseñado. Una característica típica de la mayoría de los tipos de ruido es su naturaleza no determinista, o sea la imposibilidad de predecir su forma de onda de modo exacto: se puede medir el valor de pico, el valor eficaz, etc., de cada clase de ruido, pero no es posible determinar con exactitud su valor instantáneo, es decir su forma de onda. También puede caracterizarse el ruido en el dominio de la frecuencia, gracias a su correspondiente densidad espectral.

De acuerdo con la evolución de dicha densidad espectral en función de la frecuencia, se habla de ruido blanco (nivel constante en la banda de frecuencias considerada), rosa (nivel decreciente con la frecuencia) o azul (nivel creciente con la frecuencia).

Subrayemos, sin embargo, que un mismo ruido puede ser de un tipo en una banda de frecuencias y cambiar en otra, u otras.

Obviamente, el diseño de los equipos electrónicos para analizar vibraciones debe garantizar valores elevados de la relación señal/ruido (del cociente de potencias de señal y de ruido), de modo que en todo momento (y para no importa qué punto del recorrido de la señal) sea posible discriminar a ésta de aquél sin dificultad.

Algunos instrumentos permiten seleccionar distintos tipos de amplificadores de señal, de esta forma, al amplificar la señal de entrada manteniendo el ruido electrónico relativamente constante se logra un muy buen SNR, debe mencionarse que estos amplificadores deben usarse de manera racional, ya que ante la presencia de niveles muy altos de vibración el uso de amplificadores puede generar una saturación del sistema e invalidar la lectura. [12]

Una amplificación de señal muy alta solo debería usarse cuando esperamos medir vibraciones de muy bajo nivel.

2.3.3.6. FILTROS

La señal proveniente del integrador o directamente del acelerómetro según el caso, está compuesta en general por numerosas armónicas, siendo de sumo interés para el especialista la separación de estas armónicas con vistas a la identificación de problemas en la maquinaria industrial. Esta operación constituye generalmente una responsabilidad de los filtros, que atendiendo a los objetivos de su empleo podrán tener diferentes características dinámicas.

El filtro es un dispositivo para la descomposición de las oscilaciones en base a sus frecuencias componentes. Este introduce una atenuación relativamente baja para las oscilaciones contenidas en una o más bandas de frecuencias e introduce una atenuación relativamente alta sobre oscilaciones contenidas en otras bandas de frecuencias. [12]

- **FILTRO PASA-BAJO**

Es un sistema que sólo deja pasar a través de él, armónicas de baja frecuencia, atenuando las de alta frecuencia. En la Figura 2.3.3.9 se muestra la respuesta dinámica de este tipo de filtro, el cual sólo deja pasar componentes cuyas frecuencias son inferiores a la frecuencia de corte f_c .

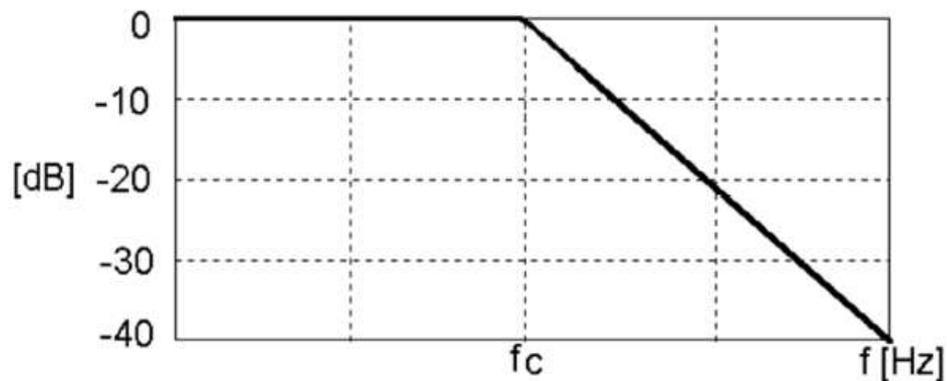


Figura 2.3.3.9 Filtro pasa-bajo. [12]

- FILTRO PASA-ALTO

Es un sistema que sólo deja pasar armónicas de alta frecuencia, atenuando las de baja frecuencia. En la Figura 2.3.3.10 se muestra la respuesta dinámica de este tipo de filtro que sólo deja pasar componentes cuyas frecuencias son superiores a la frecuencia de corte f_c .

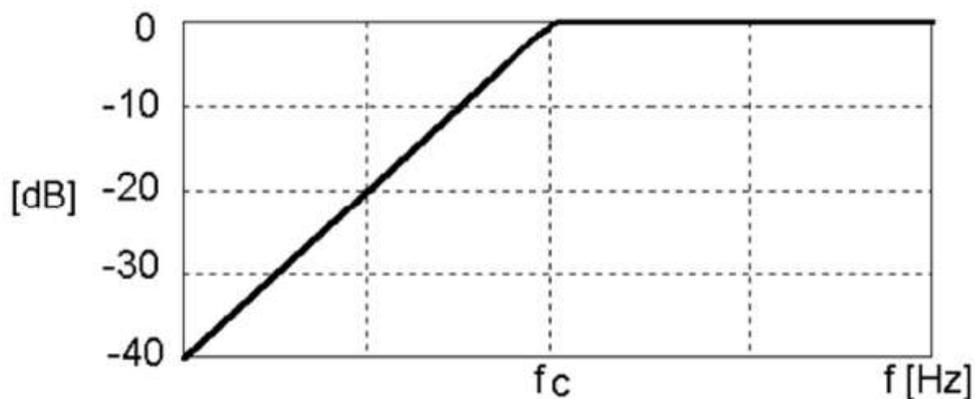


Figura 2.3.3.10 Filtro pasa-alto. [12]

- FILTRO PASA-BANDA

El filtro pasa-banda es un dispositivo que permite atenuar las oscilaciones por encima y por debajo de una banda determinada gracias a la combinación adecuada de un filtro pasa-alto y uno pasa-bajo.

- FILTRO SELECTIVO

Idealmente, este tipo de filtro sólo deja pasar armónicas de una frecuencia determinada, pero ese efecto es prácticamente imposible de lograr. Por eso este filtro es en realidad un filtro pasa-banda cuyo ancho de banda sea muy estrecho y la pendiente de sus faltas sea más abrupta.

El ancho de banda se mide a 3dB de atenuación relativa a la amplitud de frecuencia sintonizada; esto corresponde a un valor de $1/\sqrt{2}$ de la amplitud máxima. Esto es lo mismo a decir que el ancho de banda se mide en el valor eficaz de una onda senoidal pura.

Los filtros pasa-banda (el filtro selectivo incluido) pueden clasificarse en dos tipos, los de ancho de banda % constante y los de constante ancho de banda.

Los de % constante tienen anchos de banda dados en función de la frecuencia central y se expresan en la Tabla 2.3.3.6.1.

Denominación del ancho de banda	% de la frecuencia del centro de banda	Relación entre las frecuencias inicial y final de la banda
Octava	71	2,00
1/3 octava	23	1,26
1/10 octava	7	1,07
Banda angosta	1 a 7	<1,07

Tabla 2.3.3.6.1 Filtros de anchos de banda de % constante y sus valores relativos de frecuencia.

En la medida que un filtro dado se acerca al de banda angosta es más selectivo y permite observar componentes que si no quedarían enmascaradas. La magnitud de las vibraciones medidas sin filtrar, o sea ponderando todas las componentes presentes, se denomina banda ancha.

El término “octava” se toma de la escala musical. Donde dos frecuencias separadas por una octava representan una relación 1:2. Por lo tanto cada octava se puede ver como una proporción de frecuencias de dos. La octava se puede dividir a su vez 1/3 de octava o 1/10 de octava.

La escala de octavas se utiliza principalmente en el análisis de vibraciones sonoras mientras que el de 1/3 de octavas se utiliza en vibraciones que afectan el cuerpo humano.

Los analizadores con filtros de ancho de banda constante, independiente de la frecuencia del centro de banda, son por lo general más exactos a la vez que complejos. [9]

2.3.3.7. PRESENTACIÓN DE DATOS

Todos los procesos de adecuación de la señal que se mencionaron en secciones anteriores, tienen consecuencias en los datos que deben identificarse para desestimar información errónea.

- DISTORSIÓN POR INTERMODULACIÓN (IMD)

Sucede cuando en presencia de dos o más tonos senoidales en la entrada se obtienen a la salida los originales más otros que resultan de la suma y la diferencia de sus frecuencias. Este efecto ocurre cuando las señales originales están en diferentes partes de la curva de transferencia del elemento amplificador, generalmente por ser de diferentes amplitudes. Un tono cae en una parte más lineal y el otro en una parte no lineal de la curva de transferencia.

Las frecuencias resultantes de la intermodulación siempre aparecen en torno a la frecuencia más alta y separada de ella por múltiplos de la frecuencia más baja. De la siguiente manera:

$$f_i = f_{alta} \pm n \cdot f_{baja} \quad (2.3.3.1)$$

Donde n toma valores 1, 2, 3...

La distorsión de intermodulación se mide en porcentaje (%), y se calcula midiendo la amplitud de las frecuencias de intermodulación y aplicando la siguiente fórmula:

$$IMD\% = 100 * \frac{\sum V_i}{\sqrt{V_0^2}} \quad (2.3.3.2)$$

Donde V_i es la amplitud de las distintas frecuencias de intermodulación y V_0 la amplitud del tono de frecuencia mayor. [12]

- FUGAS LATERALES

Si pensamos en una señal armónica, con amplitud A, frecuencia f y longitud infinita, tendremos como resultado un espectro de una sola línea a la frecuencia f, ahora bien, la FFT considera una señal finita de tiempo, por lo que la señal a transformar se ve truncada. Como consecuencia de esto, la energía no se verá concentrada en una línea, sino que se esparcirá en lóbulos laterales. Este efecto es conocido como "Fugas Laterales".

- EFECTO RENDIJA

Al igual que en el caso anterior, la muestra de la señal, tiene un período finito y el algoritmo de cálculo repite el registro que se consideró varias veces.

Se observa que cuando en el registro de tiempo T hay un número entero de ciclos de la componente, se obtiene la amplitud A y la frecuencia f reales. Si el registro de tiempo no tiene un número entero de ciclos de la componente, no se obtienen los valores reales de amplitud y frecuencia. [12]

- VENTANAS DE MUESTREO

El analizador FFT es un aparato que procesa lotes, eso es que toma muestras de la señal de entrada durante un tiempo específico recopilando las muestras en un buffer (espacio de memoria).

Después de eso, el aparato lleva a cabo el cálculo en este lote y enseña el espectro resultante. Si una forma de onda senoidal está pasando a través del nivel cero, al principio y al final de la grabación de tiempo, eso es si la grabación de tiempo abarca exactamente un número entero de ciclos de la forma de onda, el espectro FFT resultante consistirá de una sola línea con la amplitud y la frecuencia correcta, como se aprecia en la parte superior de la Figura 2.3.3.11. Si por otra parte, el nivel de la señal no está en cero, en ambas partes de la grabación de tiempo, la forma de onda será truncada y eso provocará una discontinuidad en la señal de la que se tomó muestras.

Esta discontinuidad no está bien manejada por el proceso FFT y el resultado es que el espectro está ungido desde una sola línea en las líneas vecinas, como en la parte inferior de la Figura 2.3.3.11. [12]

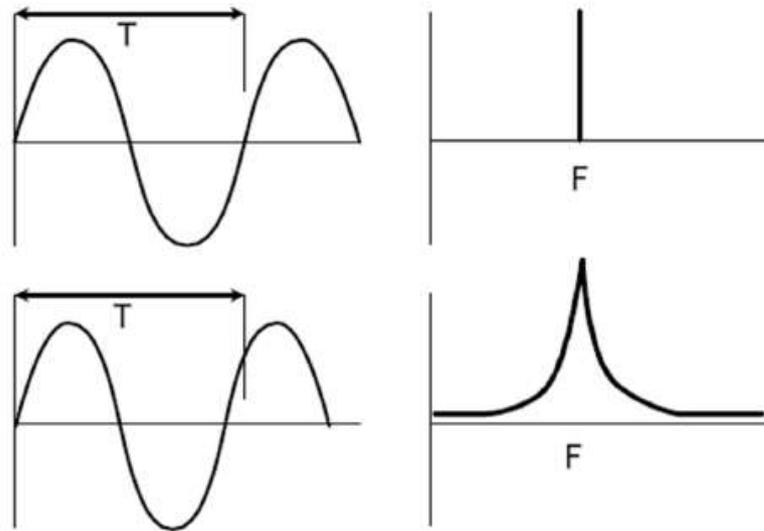


Figura 2.3.3.11 Error de análisis del FFT con una ventana incorrecta. [12]

A este fenómeno se le dio el nombre de fugas.

Para reducir el efecto de las fugas, es necesario vigilar que el nivel de la señal este en cero al principio y al final de la grabación de tiempo. Esto se hace multiplicando los datos recopilados por una función llamada ventana que puede tener varias formas.

Las formas más comunes de ventanas y sus usos son:

- VENTANA PLANA

Si no se usa una función de ventana esto se llama ventanas rectangulares o planas o uniformes.

Los espectros serán “sucios” y con ligeras variaciones en ensayos consecutivos.

En el caso que la señal de entrada es un transitorio, empezará y terminará por definición en el nivel cero. Mientras que se encuentre totalmente en la grabación de tiempo, no habrá truncado y el análisis será correcto, ya que la FFT ve la señal entera (ver Figura 2.3.3.12).



Figura 2.3.3.12 Ventana plana de un ensayo de resonancia. [12]

- VENTANA HANNING

La ventana Hanning llamada por su inventor Von Hann, tiene la forma de un ciclo de una onda cosenoidal, al que se agrega 1 para que así siempre sea positivo. Los valores de la señal muestreada se multiplican por la función Hanning.

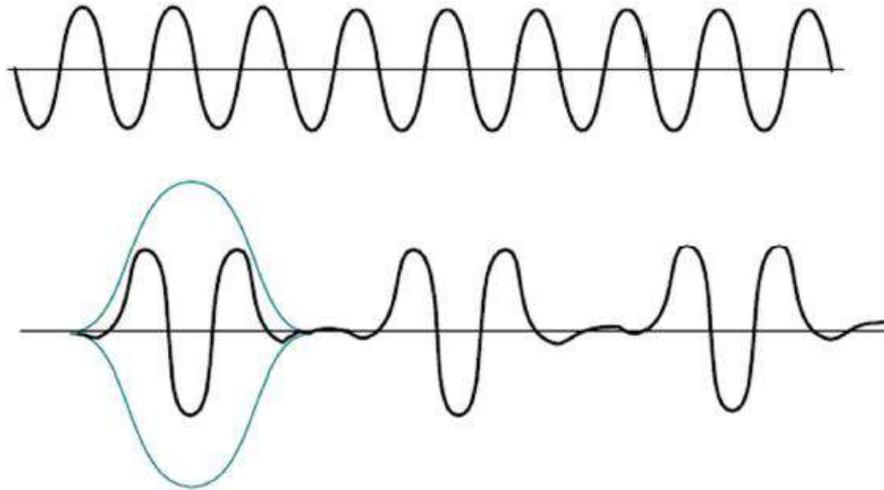


Figura 2.3.3.13 Onda senoidal antes y después de multiplicar por la función Hanning. [12]

La ventana Hanning fuerza las extremidades hacia cero (ver Figura 2.3.3.13), pero también agrega distorsión a la forma de onda que se analiza, específicamente la variación en amplitud de la señal sobre la grabación de tiempo.

Cada línea del analizador tiene la forma de esta curva. Si un componente de una señal está a la frecuencia exacta de una línea FFT, será leído en su amplitud correcta, pero si está en una frecuencia que es la mitad de ΔF (la mitad de la distancia entre las líneas) será leída en una amplitud inferior de 1.4 dB.

La ventana Hanning siempre se debe usar con señales continuas y nunca se debe usar con transitorias. La razón es que la forma del transitorio será distorsionada por la forma de la ventana y tanto la frecuencia como el contenido de un transitorio están íntimamente conectados con su forma.

Una señal ponderada Hanning esta solamente presente por la mitad. La otra mitad fue removida por el proceso de la ventana. Esta no presenta problemas con una señal perfectamente suave, y continua como una onda senoidal, pero la mayoría de las señales que queremos analizar, como firmas de vibraciones de máquinas no son perfectamente suaves. Si ocurre un pequeño cambio en la señal cerca del inicio o del final de la grabación en tiempo, o bien se analizará a un nivel mucho más bajo que su nivel verdadero, o se puede pasar totalmente desapercibido. [12]

- VENTANA FLATTOP

La ventana Flattop es utilizada para solucionar el problema de la amplitud en el espectro generada por la ventana Hanning. Esto se genera dando una forma más plana en el filtro pasa-bajo.

Pese que aumenta la precisión de la medición de la amplitud, pierde definición en frecuencia. Esto hace que pierda resolución cuando existen pequeñas componentes próximas a una grande (ver Figura 2.3.3.14) [12]

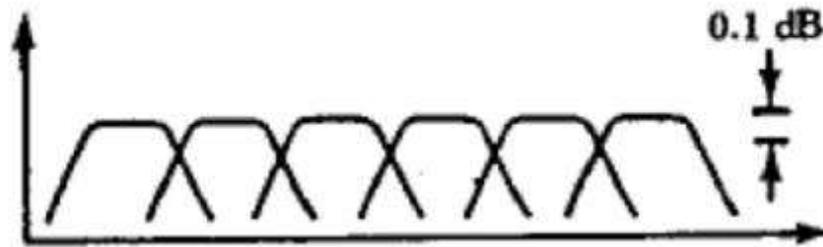


Figura 2.3.3.14 Señal aplanada para la ventana Flattop. [12]

- ALIASING

En la sección 2.3.3.2, se mencionó que, de acuerdo al teorema de Nyquist, la frecuencia de muestreo debía ser mayor a 2 veces la frecuencia máxima.

Cuando la velocidad de muestreo es inferior a la velocidad de Nyquist, aparecen componentes de frecuencia indeseable. Este fenómeno se conoce como aliasing.

Cuando se obtienen muestras periódicas de una señal sinusoidal, puede ocurrir que se obtengan las mismas muestras que se obtendrían de una señal sinusoidal igualmente pero con frecuencia más baja. Específicamente, si una senoide de frecuencia f es muestreada s veces por segundo, y $s \leq 2 \cdot f$, entonces las muestras resultantes también serán compatibles con una senoide de frecuencia $f_m - f$, donde f_m es la frecuencia de muestreo (ver Figura 2.3.3.15).

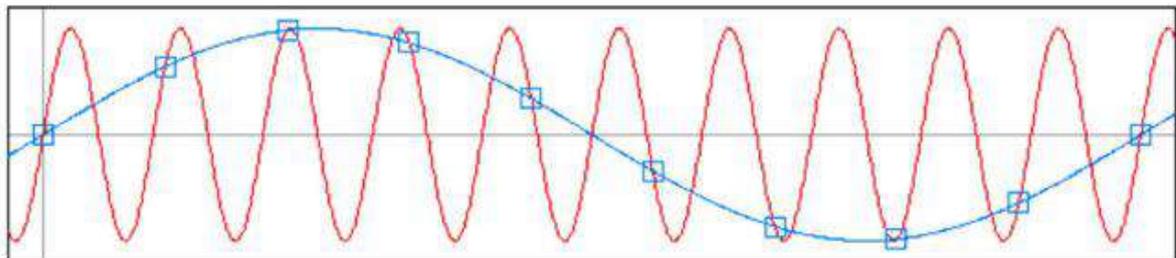


Figura 2.3.3.15 La onda azul es el "alias" de la onda roja real. [12]

Para prevenir el aliasing en los analizadores FFT, se deben cumplir dos condiciones:

- a) La señal debe estar limitada en banda, es decir, debe haber un f_{max} por encima de la cual, ninguna otra frecuencia está presente. Esto se lleva a cabo mediante un filtro antialiasing que es básicamente un filtro pasa-bajo muy abrupto.
- b) La señal de entrada debe ser muestreada a una velocidad que cumple el teorema del muestreo. [12]

2.3.4. TÉCNICAS DE ANÁLISIS

2.3.4.1. AMPLITUD VS FRECUENCIA

La forma más básica de análisis de vibraciones se llama Medida Global de Vibración. Esta lectura nos suministra un valor escalar, que describe la cantidad de energía vibratoria total contenida en una onda emitida por máquina. La idea que transmite este análisis, es que un

mayor nivel de vibración nos puede indicar un serio problema, el cual debería ser examinado y/o monitorizado. Es decir, a mayor vibración mayor severidad del problema.

Los valores globales de vibración fueron y son usados hoy simplemente porque son elementos simples, los equipos que se emplean para recoger esta información son baratos y en un tiempo fueron los únicos disponibles en el mercado.

Cuando los ordenadores llegaron a ser un instrumento ampliamente usado, se consiguió la capacidad para recoger datos de vibración de banda estrecha, o espectros de vibración. [12]

El espectro de frecuencia es la base de este tipo de análisis ya que permite identificar qué amplitud presentan las frecuencias más importantes. Esto teniendo en cuenta las RPM de una máquina que, como ya se mencionó anteriormente, generalmente será la frecuencia natural. De esta manera se ubican las amplitudes de las armónicas, de las oscilaciones asincrónicas (múltiplos no enteros de la frecuencia natural), y de las subarmónicas que se encontrarán a menores frecuencias que la fundamental. De este análisis surge la detección de un problema de forma directa como por ejemplo un problema relacionado a un armónico específico o de forma indirecta como será un problema basado en relaciones entre magnitudes de distintos armónicos.

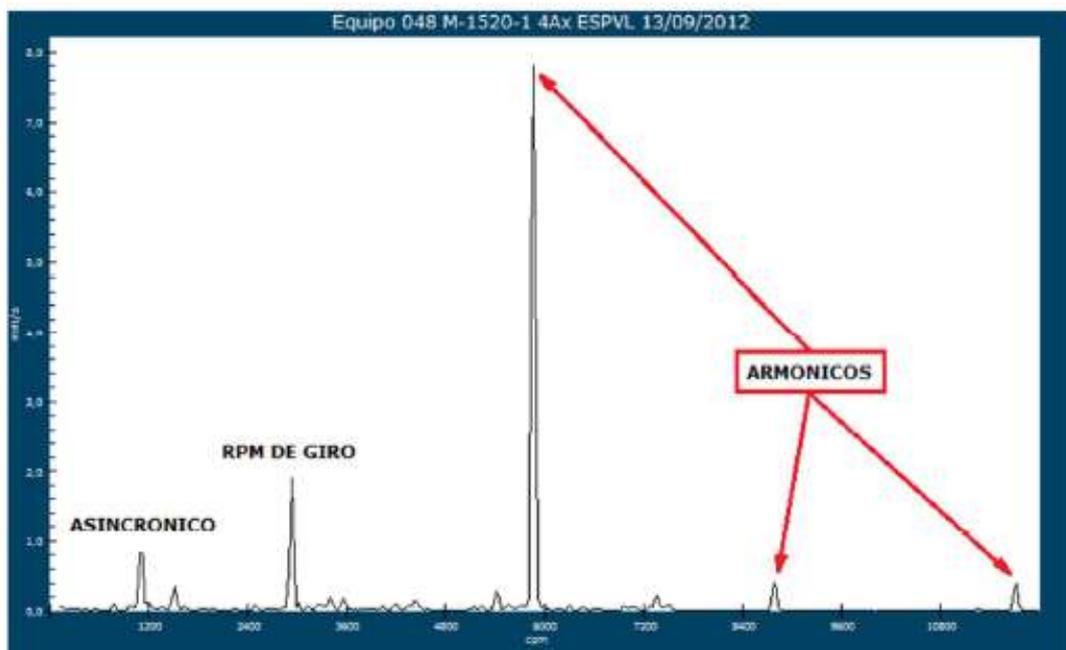


Figura 2.3.4.1. Ejemplo del espectro de frecuencias de oscilaciones subarmónicas y armónicas. [12]

Una vez identificadas la frecuencia natural, las armónicas, las subarmónicas y las frecuencias asincrónicas (ver Figura 2.3.4.1), se debe analizar de manera diferenciada la magnitud de cada una. Una amplitud alta en una frecuencia dada no significa que sea la más comprometida y una amplitud pequeña en una frecuencia crítica puede estar alertando de una falla importante.

Esta mención a ponderar de diferente manera cada componente armónico viene de la mano de la comparación con un espectro de referencia. Dicho espectro puede tomarse de las mediciones de un conjunto de máquinas de similares características y obtener una media o

puede compararse con el historial de la misma máquina y comparar las mediciones actuales con las anteriores.

Para comparar con mediciones de la máquina funcionando correctamente, el criterio de ponderación puede ser complicado de establecer. La máscara de un espectro puede establecerse en distintos valores de dB cada armónico. A su vez, deben establecerse niveles de alarma y de falla inminente para alertar al analista de la peligrosidad.

Cuando se explicó el fenómeno oscilatorio se habló de vibraciones forzadas cuyas fuerzas perturbadoras marcaban la frecuencia a la que oscila el sistema. En una máquina, la fuerza perturbadora principal es el eje girando a las RPM establecidas de fábrica, nuestra frecuencia fundamental. Pero esta no es la única fuerza perturbadora a la que se somete el sistema, originando que entre los armónicos de la fundamental se ubiquen las frecuencias de estas fuerzas.

Las fuentes de fuerzas perturbadoras extras vienen dadas generalmente por acoples tales como aspas, engranajes, ventiladores de enfriamiento, rodamientos. Cuyas frecuencias vienen dadas por la cantidad de elementos multiplicadas por las RPM del eje. En el caso de las aspas, se multiplican la cantidad de aspas por los RPM. Para los engranajes es similar, pero con el número de dientes impactando entre sí. Cuando se reduzcan las RPM, por ejemplo por una caja reductora, deben reducirse los RPM de la vibración a partir de ese punto. Cada componente tendrá una frecuencia característica que debe tenerse en cuenta en el análisis y la amplitud deberá ponderarse según su criticidad.

El eje de las frecuencias puede representarse distintas unidades que según el caso puedan optarse para utilizar. La primera de ellas es en Hz, cuyos valores es más difícil relacionar con el movimiento de la máquina, pero puede dar una idea comparativa con otro tipo de oscilaciones. Otra opción es utilizar RPM como unidad que visibiliza más fácilmente la frecuencia fundamental. Lo que puede considerarse como engorroso de la utilización de esta unidad son los grandes valores que se observarán en el eje ya que generalmente son del orden de los miles o decenas de miles en el caso de armónicos altos. La tercera opción es la de adimensionalizar la unidad y que en el eje se representen múltiplos de las RPM del motor. Teniendo en 1 a la frecuencia fundamental, 3 al tercer armónico, etc. Esta última opción facilita la comparación entre máquinas similares que funcionen a velocidades diferentes.

Se debe tener en cuenta al analizar estos espectros a lo largo del tiempo que a medida que se desgastan los componentes van sumándose pequeñas bandas paralelas y armónicos complejizando la identificación.

2.3.4.2. AMPLITUD VS FRECUENCIA VS TIEMPO

Cuando se quiere comparar la Medida Global de Vibración a lo largo del tiempo se utiliza la Cascada Espectral. Es un gráfico en 3 dimensiones donde se ubican los distintos espectros medidos a lo largo del tiempo. Es sumamente útil ya que nos permite observar cualquier desvío o aparición de una nueva señal que tal vez pasara desapercibida viendo solamente un espectro (ver Figura 2.3.4.2).

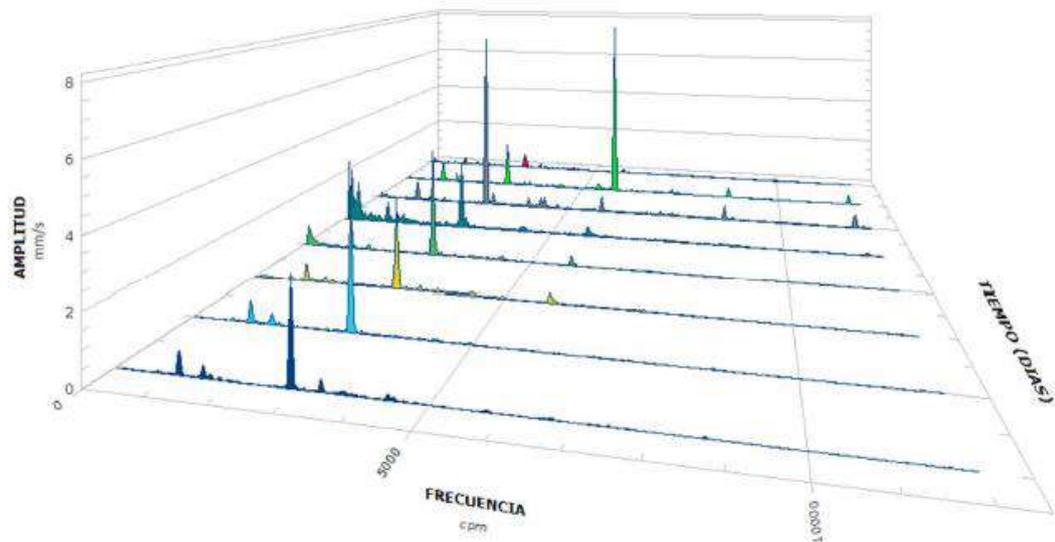


Figura 2.3.4.2 Cascada espectral. [12]

2.3.5. ANÁLISIS DE FORMA DE ONDA EN EL TIEMPO

El análisis de las formas de ondas de tiempo es el proceso de estudiar los datos de forma de ondas para buscar pautas que puedan indicar una condición de defecto. Las formas de ondas de tiempo muestran precisamente cómo la vibración cambia de una fracción de segundo a otra.

Asumiendo que la configuración de medida es correcta, la forma de onda de tiempo proporcionará indicaciones claras de impactos, de los transitorios, de la modulación, de golpeteo, y de las ráfagas de energía.

Las formas de ondas de tiempo pueden ayudar a diagnosticar una gran variedad de condiciones de defecto incluyendo daño en cojinetes, holgura, daño de engranaje, cavitación, y la razón para errores de medida. Es útil para analizar máquinas de muy baja velocidad (ver Figura 2.3.5.1).

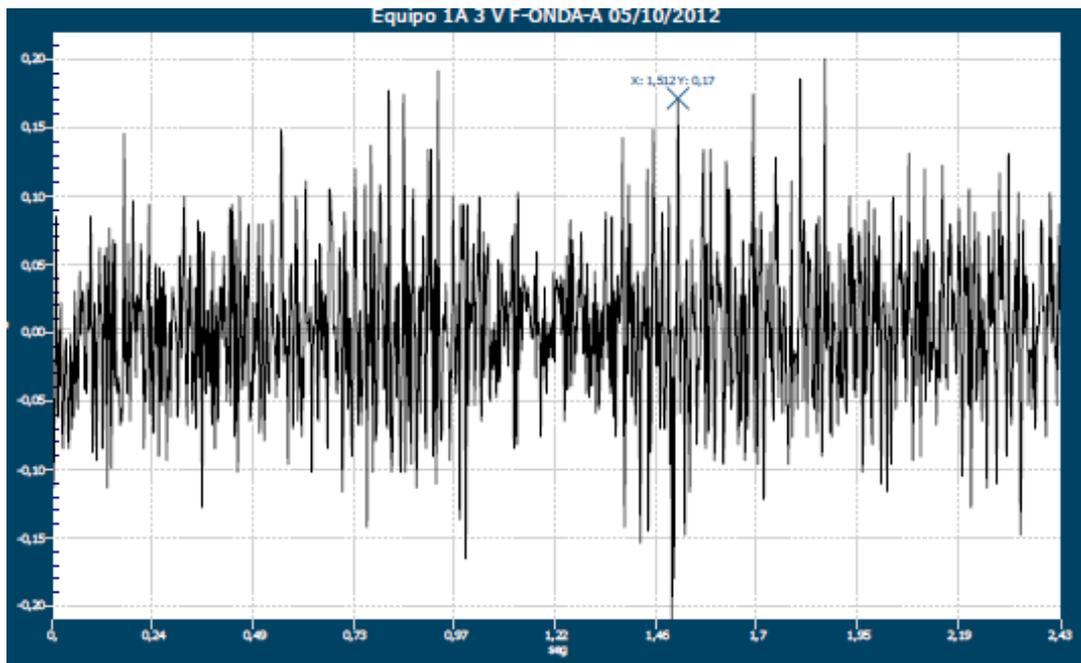


Figura 2.3.5.1 Forma de onda en el tiempo. [12]

2.3.6. NORMAS DE REFERENCIA

A continuación, se irán mencionando brevemente las normas que regulaban las vibraciones a lo largo de la historia hasta llegar a la normativa actual.

2.3.6.1. TABLA RATHBONE

La tabla Rathbone (ver Figura 2.3.6.1), inventada por T.C.Rathbone en 1939 compara la velocidad general de vibración con varios grados de suavidad de la máquina.

Este sistema tiene muchas limitaciones:

- No tiene en cuenta el tipo de máquina, sus anclajes ni su potencia.
- Es aplicable sólo a equipos rotativos.
- Fue diseñada para máquinas de bajas RPM por lo que no respondía correctamente a fallas características de las altas RPM

Por estos motivos es considerada obsoleta.

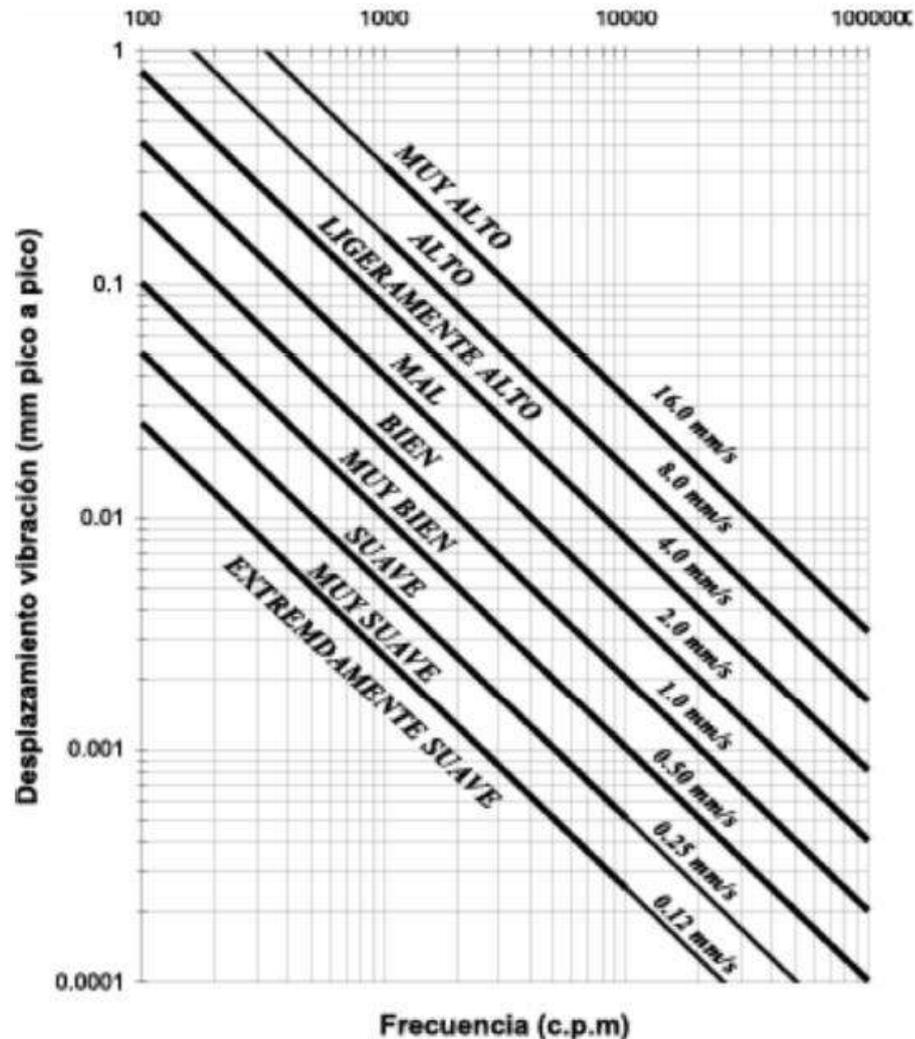


Figura 2.3.6.1 Tabla Rathbone de criterios de vibración. [12]

2.3.6.2. NORMA ISO 2372

La norma ISO número 2372 (BS 4675, VDI 2056) proporciona guías para aceptación de la amplitud de vibración, para maquinaria rotativa.

Especifica niveles de velocidad general de vibración en lugar de niveles espectrales, y puede ser engañosa.

ISO 2372 especifica los límites de la velocidad de vibración basándose en los caballos vapor de la máquina y cubre un rango de frecuencias desde 10 Hz hasta 1000 Hz (ver Figura 2.3.6.2).

Debido al rango limitado de alta frecuencia, se puede fácilmente dejar pasar problemas de rodamientos con elementos rodantes. Esta norma fue el primer intento de ISO por generar estándares de vibración y luego fue reformulada. [18]

Velocidad (mm/s, rms)	Tipos de máquinas			
	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV
0,18 a 0,28	A			
0,28 a 0,45				
0,45 a 0,71				
0,71 a 1,12				
1,12 a 1,8	B		D	
1,8 a 2,8				
2,8 a 4,5	C			
4,5 a 7,1				
7,1 a 11,2	D			
11,2 a 18				
18 a 28	D			

A	Buena	C	Inatisfactoria
B	Satisfactoria	D	Inaceptable

Figura 2.3.6.2 Tabla de severidad en la vibración según Norma ISO 2372. [18]

2.3.6.3. ISO 3945

La norma ISO 3945 data del año 1985 y establecía los criterios de medición y evaluación de vibraciones y choques en máquinas con velocidades entre 600 y 12000 RPM. Reemplazó a la norma homónima de 1977 y tuvo validez hasta 1995.

2.3.6.4. ISO 10816

Esta norma reemplaza a las ISO 2372 e ISO 3945 y establece las condiciones y procedimientos generales para la medición y evaluación de la vibración, utilizando mediciones realizadas sobre partes no rotativas de las máquinas. El criterio general de evaluación se basa tanto en la monitorización operacional como en pruebas de validación que han sido establecidas fundamentalmente con objeto de garantizar un funcionamiento fiable de la máquina a largo plazo.

Estos datos deben ser obtenidos de manera fiable, segura, luego de una larga duración de funcionamiento de la máquina, minimizando los efectos provocados por equipos vecinos. Deben tenerse presente las pautas para establecer los límites operacionales.

Los criterios de evaluación sólo se refieren a la vibración producida por la máquina en sí y no a las vibraciones transmitidas a ella desde el exterior.

En muchas máquinas, las mediciones realizadas en las piezas no rotatorias, son suficientes para caracterizar adecuadamente sus condiciones de funcionamiento con respecto a una operación sin problemas.

Sin embargo, hay algunas máquinas, tales como las que contienen rotores flexibles, donde las mediciones de piezas no giratorias pueden no ser totalmente adecuada.

En tales casos, puede ser necesaria para controlar la máquina usar mediciones tanto en la partes giratorias y no giratorias, o en las piezas giratorias independientes. Para este tipo de máquinas, las directrices que se presentan en esta parte de la Norma ISO 10816 se complementan con las dadas por la vibración del eje en la norma ISO 7919-1. Si los procedimientos de ambas normas son aplicables, se aplica generalmente la que sea más restrictiva.

En las ISO10816 se definen los siguientes conceptos:

- NIVELES DE ALARMA

Proporcionan un aviso de que se está llegando a un nivel excesivo de vibración o que un cambio significativo ha ocurrido, la cual cosa sugiere una intervención. En general, si se da un cambio de alarma, la máquina puede seguir funcionando por un periodo de tiempo, durante el cual las investigaciones identifiquen la razón del cambio de vibración y se defina la acción a seguir. Los niveles de alarma pueden variar considerablemente según el tipo de máquina. Los valores escogidos normalmente están relacionados a un valor promedio obtenido con el tiempo, y por lo tanto, con la experiencia de medir la máquina en unas determinadas posiciones y direcciones.

- NIVELES DE PARO

Este límite surge de la necesidad de definir la magnitud de la vibración por encima de la cual la máquina podría causar daños si esta siguiera funcionando. Si se supera este valor, se debe actuar inmediatamente para reducir la vibración, en caso contrario, el daño podría tener consecuencias graves. Estos valores generalmente son los mismos para todas las máquinas de diseño similar y no están relacionados con el valor promedio utilizado para definir el nivel de alarma.

Los niveles de cada punto de la máquina se establecen mediante cálculos estadísticos.

Considerando que las medidas realizadas forman parte de una muestra representativa de una población de valores que se distribuyen según una ley normal (ver Figura 2.3.6.3), el análisis consiste en calcular la media y la desviación estándar de la muestra a partir de todos los niveles globales (medidos en RMS) de los que se disponen.

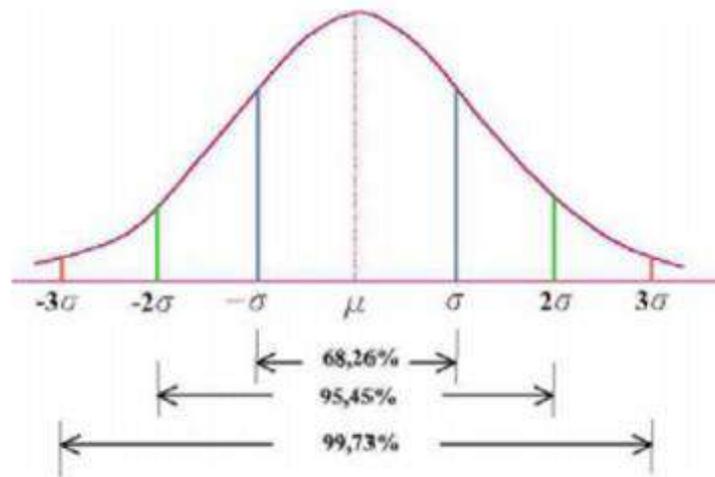


Figura 2.3.6.3 Distribución normal o campana de Gauss. [12]

Una primera estimación de todos los valores dará un promedio o valor medio (\bar{x}) y una desviación estándar (s). Si se eliminan los puntos que estén fuera de los límites, inferior y superior, del promedio ± 2 veces la desviación estándar, quedarán dentro de una campana aproximadamente el 95,45% de los valores considerados normales. Los datos anómalos (medidas incorrectas, ya sea por tener una vibración excesivamente baja o bien demasiado alta) o los puntos que ya presentan una vibración excesiva por ser síntomas de una avería, estarán fuera de la campana y serán eliminados. A continuación, se volverá a calcular el promedio y la desviación estándar y se establecerá el siguiente nivel de alarma.

$$\text{Nivel de alarma} = \text{promedio} + 2 \cdot \text{desviación estándar} \quad (2.3.6.1)$$

Debe dejarse constancia que, a mayor tiempo de observación de la máquina, más valores se tendrán y la estimación del promedio y de la desviación estándar podrá ser más acertada.

Los niveles de paro son más difíciles de definir, ya que, en función del diseño de los componentes de la máquina y de cómo estos soporten las fuerzas dinámicas normales que provocan las averías. Generalmente, para determinar un nivel de paro, hay que tener un histórico de datos sobre paros lo más acertados posibles, de todas las máquinas. Se calculará, como antes, la media y la desviación estándar, pero en este caso se multiplicará por 4 esta última, de tal manera que el 99,994 % de las medidas quedarán dentro de la campana.

$$\text{Nivel de paro} = \text{Promedio} + 4 \cdot \text{desviación estándar} \quad (2.3.6.2)$$

2.3.6.5. ISO 10816-3

Esta norma ha tomado los criterios y valores de la ISO 2372, y ha duplicado los grupos de equipos. Los valores son similares, aunque esta versión es algo más permisiva en equipos pequeños. En general, se aprecia que el factor de cambio de estado es 2,0 en lugar de 2,5 de la 2372 (ver Figura 2.3.6.4).

Es importante aclarar que las normas de severidad de máquinas, son una orientación no una palabra definitiva.

En el caso de detectar una soltura mecánica, por ejemplo, el valor que agrega esta anomalía (muy grave), al valor global es mínimo. Este será un motivo de parada, independientemente del encuadre de la norma.

También para su aplicación, debe considerarse si el equipo está en servicio o se lo está recibiendo nuevo o reparado. En este último caso se las deben aplicar con mayor exigencia.

Las máquinas que quedan excluidas de esta norma son:

- Máquinas acopladas a máquinas alternativas.
- Compresores alternativos.
- Compresores rotatorios de desplazamiento positivo.
- Bombas recíprocas o alternativas.
- Motobombas sumergidas.
- Turbinas de viento.

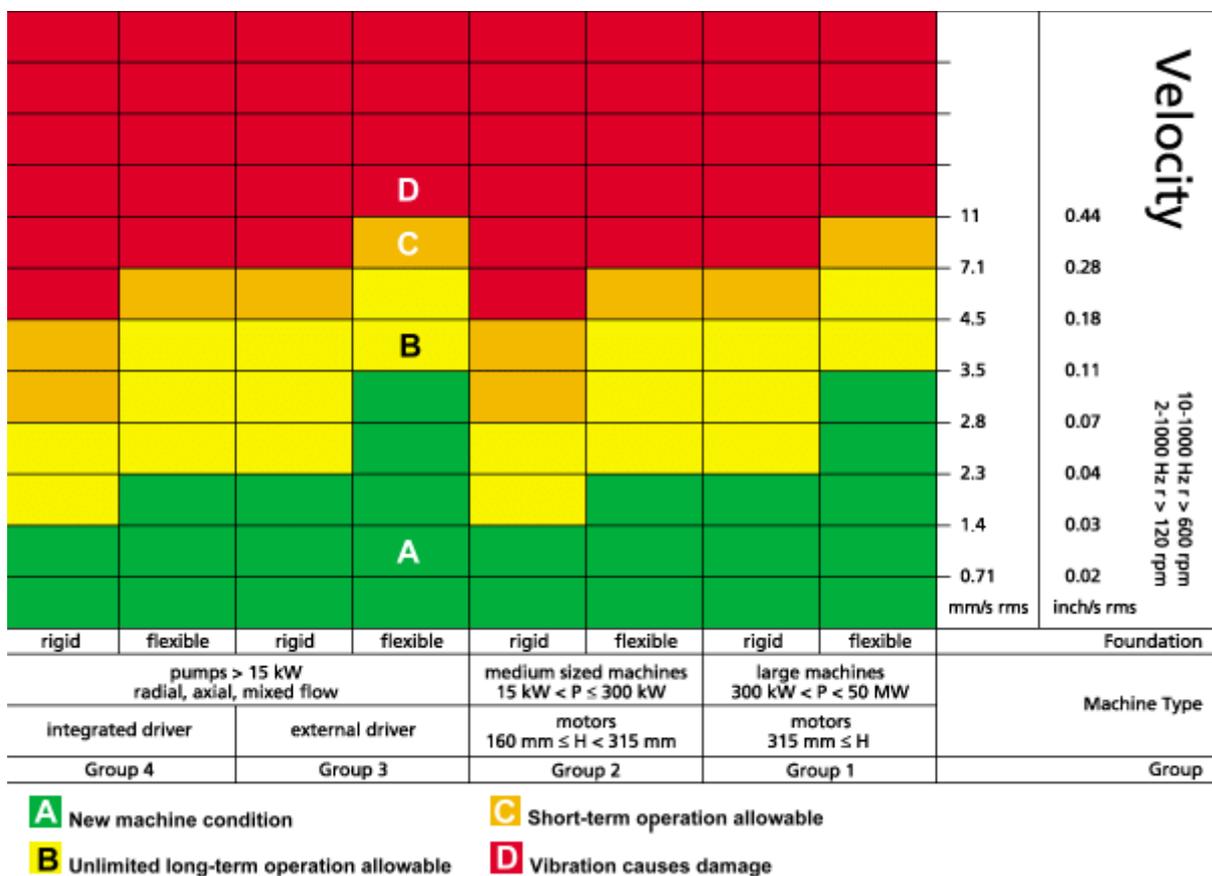


Figura 2.3.6.4 Tabla de severidad de vibraciones según Norma ISO 10816-3. [12]

Esta parte de la norma aplica para la gran mayoría de los rotantes industriales, sin embargo necesariamente hay equipos que por funcionamiento, potencia o condiciones de operación quedan fuera de los alcances de la misma.

Lo primero que debemos tener en cuenta es si el equipo es nuevo o reparado, en la primer condición las mediciones efectuadas deben entrar en la categoría “A” es decir condición de equipo nuevo y valores óptimos, si el equipo fuese reparado podemos admitir una desviación que entre en la categoría “B” condición de operación sin límites y apegarnos a ese límite.

Las mediciones efectuadas deben estar en un todo de acuerdo con los lineamientos especificados en la norma, por ejemplo, si se trata de una bomba acoplada a un motor realizar la medición en velocidad RMS entre 10 y 1000 Hz, dejar la máquina operar hasta que alcance la temperatura de trabajo normal, ver que funcione en condiciones operativas de acuerdo a las recomendadas por el fabricante y realizar las mediciones en los puntos y direcciones especificados en norma.

Se debe seleccionar correctamente el grupo de la norma al cual corresponde el equipo a evaluar, tanto por su potencia como por su fundación (rígida o flexible), un equipo instalado en el lugar no debe superar nunca la zona B.

Si se tratara de un motor probado en taller y desacoplado debemos tomar siempre el nivel óptimo como zona límite ya que las frecuencias forzadas son muy pocas y de baja energía. [12]

2.4. TERMOGRAFÍA INFRARROJA

La termografía infrarroja es una técnica de detección de temperatura superficial a través de la emisión de radiación infrarroja que emiten los cuerpos. El instrumento utilizado para esta técnica es la cámara termográfica.

Su aplicación en mantenimiento es muy variada y su uso está muy extendido dentro de las técnicas predictivas gracias a que es una medición no intrusiva; es decir, que no se requiere contacto físico entre el objeto analizado y el equipo de medición, por lo que no afectará a las condiciones de funcionamiento y operación de los objetos, equipos o elementos observados. Esta cualidad la hace especialmente apropiada en el control y mantenimiento de elementos energizados sin poner en riesgo al personal que realiza las mediciones [8].

Como se mencionó, las aplicaciones son muy variadas y sería muy extenso mencionar todas. Por eso se mencionarán las más importantes relacionadas al mantenimiento industrial:

- Detección de fugas en cañerías.
- Sobrecalentamiento de líneas e instalaciones eléctricas. Fugas a tierra y cortocircuitos. Estado de instrumentos y equipos en tableros eléctricos. Falsos contactos o conexiones incorrectas en bornes.
- Diagnóstico en transformadores eléctricos. Detección de sobrecargas.
- Detección de puntos calientes en motores y máquinas en general.

Al igual que con el marco teórico del análisis de vibraciones, queda a consideración del lector proseguir con la lectura de la sección, donde se profundiza sobre los fundamentos y características técnicas de la termografía infrarroja. La lectura continúa en la sección 3. METODOLOGÍA Y RESULTADOS en la página 71.

2.4.1. FUNDAMENTOS DE LA RADIACIÓN TÉRMICA

La medición de temperatura a distancia es posible gracias a la radiación. Es un fenómeno de transporte de energía que no requiere de un medio físico para su transmisión, dado que la energía radiante es transportada por ondas electromagnéticas.

Este fenómeno cuenta entre sus características el ser de naturaleza espectral, direccional y ser volumétrico (a pesar de que generalmente se lo considera superficial).

La radiación térmica se extiende por todo el espectro, sin embargo, en la práctica, se toma que se extiende desde las longitud de onda $0,1 < \lambda < 100 \mu\text{m}$. Dentro de este rango se encuentra una gran parte dentro de la banda infrarroja, el rango de luz visible y una pequeña franja ultravioleta. [19]

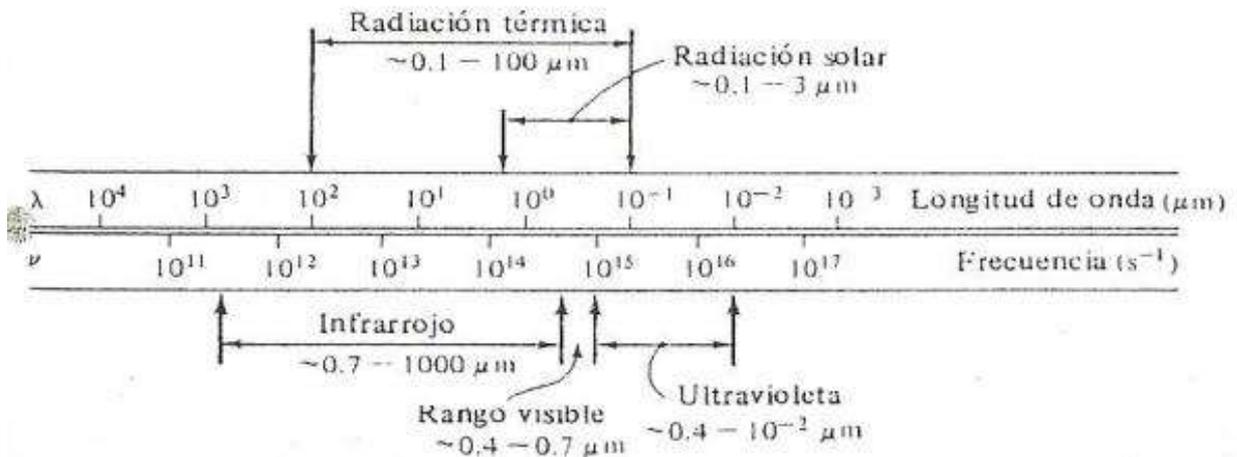


Figura 2.4.1.1 Espectro electromagnético y sus bandas características. [19]

En la Figura 2.4.1.1 se observan las bandas infrarroja, ultravioleta y el rango visible en la parte inferior mientras que en la parte superior se observa el intervalo de la radiación térmica y de la radiación solar que se incluye como referencia.

El origen de la radiación térmica emitida por un cuerpo es, como indica su nombre, la temperatura. Todo cuerpo por encima del cero absoluto (-273°C o 0°K) emite radiación térmica.

A temperaturas de trabajo cotidianas, la radiación se encuentra en la banda infrarroja por lo tanto no es visible. Si bien a muy altas temperaturas la radiación emitida llegue al rango visible, el 90% de la radiación seguirá estando dentro del rango infrarrojo.

La banda de radiación infrarroja, en su mayoría, no es útil para sensores ya que su energía es absorbida por el agua y el dióxido de carbono en la atmósfera. No obstante, existen tres franjas de longitudes de onda con buena transmisión:

- La banda infrarroja de longitudes de onda cortas (SWIR) que cubre el rango de 0,7 a 2 $[\mu\text{m}]$.
- La banda infrarroja de longitudes de onda medias (MWIR) que cubre el rango de 2 a 6 $[\mu\text{m}]$. y ofrece también una transmisión cercana al 100 por ciento, con el beneficio adicional de un ruido de fondo bajo.
- La banda infrarroja de longitudes de onda largas (LWIR) que cubre la región de 8 a 15 $[\mu\text{m}]$, con aproximadamente un 100 por ciento de transmisión en la banda de 9 a 12 $[\mu\text{m}]$. La banda LWIR ofrece excelente visibilidad para la mayoría de los objetos terrestres.

En el área de la termografía infrarroja se hace énfasis en la franja de 2 a 15 $[\mu\text{m}]$. Con un bache en la región entre 6 y 8 $[\mu\text{m}]$, donde la radiación es absorbida por el vapor de agua y dificulta su medición. [8]

Los fabricantes de equipos recomiendan utilizar la banda MWIR para temperaturas altas y la banda LWIR para temperaturas de trabajo de máquinas en general.

Se utiliza el rango de 2 a 15 [μm] por dos razones. Primera, la mayor parte de la energía emitida por un objeto a temperaturas terrestres es emitida dentro de esta banda espectral de longitudes de onda. Segunda, existen ventanas atmosféricas transmisoras en esta banda que permiten la detección de señales sobre rangos de distancia comparativamente grandes.

Los radiadores térmicos son caracterizados por sus eficiencias de emisión de radiación usando tres categorías: cuerpos negros, cuerpos grises y radiadores selectivos. Cada una de estas categorías permitirá analizar a un cuerpo dentro de un cierto margen de exactitud con respecto a sus características reales, al mismo tiempo que presentará diferentes grados de complejidad en el análisis del espectro de radiación. [20]

2.4.1.1. LEYES DE RADIACIÓN TÉRMICA

Las propiedades más generales de la radiación electromagnética, que interactúan con la materia, están sintetizadas en un conjunto simple de reglas llamadas leyes de radiación. Estas leyes se aplican cuando el cuerpo que emite la radiación es lo que los físicos llaman cuerpo negro, el cual se define como un objeto que absorbe toda la radiación que incide sobre él con cualquier longitud de onda.

- LEY DE KIRCHHOFF

Esta ley fue llamada así en honor a Gustav Robert Kirchhoff, y establece que un cuerpo capaz de absorber toda la radiación en cualquier longitud de onda es igualmente capaz de emitirla.

- LEY DE LA RADIACIÓN DE PLANCK

La distribución espectral de la radiación de un cuerpo se especifica por la cantidad $R(\nu)$, llamada radiancia espectral, definida de tal manera que $R(\nu)d\nu$, es igual a la energía emitida en forma de radiación térmica con frecuencias en el intervalo de ν y $\nu+d\nu$ de una área unitaria de superficie, a una temperatura T y por unidad de tiempo.

La integral de la radiación espectral $R(\nu)$, sobre toda ν , es la energía total emitida de un cuerpo a temperatura T , por unidad de tiempo y por unidad de área, y se llama radiancia, R .

$$R = \int_0^{\infty} R_V(\nu) d\nu \quad (2.4.1.1)$$

La expresión para la distribución espectral de la radiación de un cuerpo fue obtenida primeramente por Rayleigh-Jeans, bajo un punto de vista clásico. Sin embargo, ésta ecuación no concordaba con los resultados experimentales en todo el rango de frecuencias. En el límite de frecuencias bajas, el espectro clásico se aproxima a los resultados experimentales, pero a medida que la frecuencia crece, la predicción teórica de Rayleigh-Jeans tiende a infinito. Los experimentos demuestran que la densidad de energía siempre permanece finita, como obviamente debe ser, y de hecho, la densidad de energía tiende a cero para frecuencias muy altas. [21]

Tratando de resolver esta discrepancia, Max Planck consideró la posibilidad de que en el análisis clásico se violara la Ley de equipartición de energía en la que se basaba esta teoría. La gran contribución de Planck surgió cuando se dio cuenta que podría lograr el corte requerido si modificaba el cálculo de la energía promedio de las partículas proveniente de la teoría clásica, tratando a la energía como si esta fuera una variable discreta en lugar de una variable continua. Planck pensó que, dadas las circunstancias que prevalecen en el caso de

la radiación de un cuerpo negro, la energía promedio de una onda estacionaria es función de la frecuencia

Después de un gran trabajo numérico y estadístico, Planck llegó a la expresión para la energía promedio de las partículas en función de la frecuencia, y la expresó de la siguiente manera:

$$E(\nu, T) = \frac{h\nu}{e^{\lambda h/kT} - 1} \quad (2.4.1.2)$$

Del mismo modo, la fórmula que obtuvo Max Planck para la distribución espectral de la radiación de un cuerpo negro en función de la longitud de onda viene dada por:

$$E(\lambda, T) = \frac{2hc^2 \cdot 10^{-6}}{\lambda^5 \cdot (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \cdot \left[\frac{W}{m^2 \cdot \mu m} \right] \quad (2.4.1.3)$$

Siendo:

c: velocidad de la luz = 3×10^8 [m/s]

h: constante de Plack = $6,63 \times 10^{-34}$ [J.s]

k: constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ [J/°K]

T: temperatura del cuerpo en [°K]

ν : frecuencia de las ondas electromagnéticas radiadas en [Hz]

λ : longitud de onda en [μ m]

Al graficar la ecuación (2.4.1.3) para diversas temperaturas, la fórmula de Planck produce una familia de curvas observables en la Figura 2.4.1.2. Dicha ecuación se multiplicó por el factor 10^{-6} debido a que la emitancia espectral en las curvas se expresa en [$W/cm^2 \cdot 10^3 \mu m$]. Siguiendo cualquier curva concreta de Planck, la emitancia espectral es cero cuando $\lambda=0$; posteriormente aumenta rápidamente hasta un máximo cuando la longitud de onda es λ_{max} . Luego de ser superado este punto, se aproxima al cero de nuevo con longitudes de onda muy largas. Cuanto más elevada es la temperatura, más corta es la longitud de onda a la que se establece el punto máximo. [20]

Debe recordarse que Planck no alteró la función de distribución de Boltzmann, todo lo que hizo fue considerar a la energía de las ondas electromagnéticas estacionarias, oscilando senoidalmente en el tiempo, como una cantidad discreta en lugar de una cantidad continua

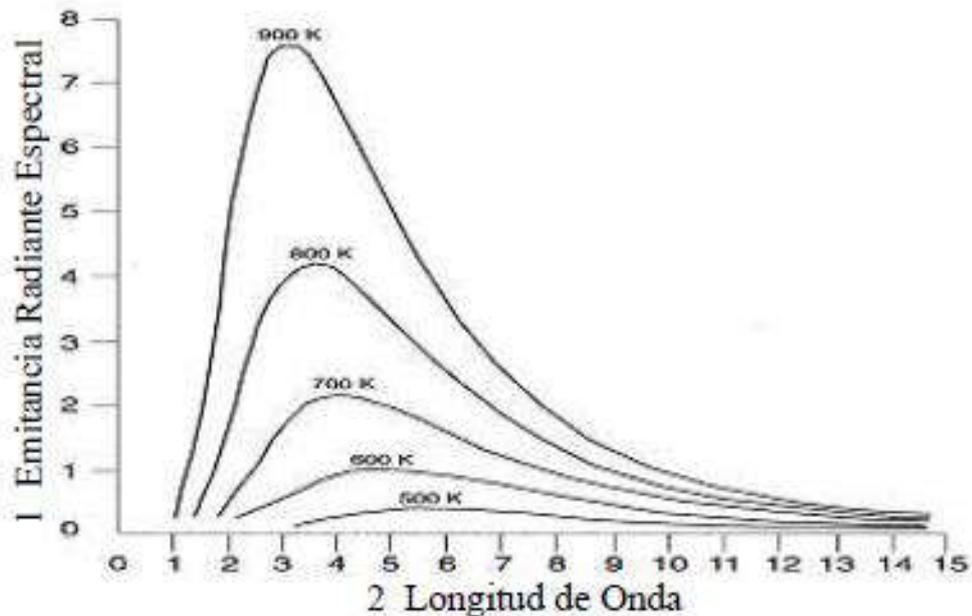


Figura 2.4.1.2 Emitancia radiante espectral de un cuerpo negro. [8]

La radiación emitida por un cuerpo puede utilizarse para medir su temperatura. Teóricamente, el ancho de banda de la radiación térmica de un cuerpo es infinitamente amplio. Sin embargo, cuando se trata de detectar esa radiación, se debe tomar en consideración el ancho de banda finito de los sensores reales. Los sensores son sólo capaces de medir la radiación en un rango limitado de frecuencias. Para determinar la potencia total radiada en un ancho de banda particular, se integra sobre los límites de esa banda particular como se indica a continuación:

$$E(T) = 2 \cdot h \cdot c^2 \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{1}{\lambda^5 \cdot (e^{hc/\lambda kT} - 1)} d\lambda \cdot \left[\frac{W}{m^2 \cdot \mu m} \right] \quad (2.4.1.4)$$

- LEY DE DESPLAZAMIENTO DE WIEN

La temperatura de un cuerpo es el resultado de las energías cinéticas promediadas de un número extremadamente grande de partículas vibrantes. Sin embargo, no todas las partículas vibran con la misma frecuencia o magnitud. Las diferentes frecuencias permitidas (o bien longitudes de onda) están espaciadas una muy cercana a la otra, lo cual hace que un cuerpo sea capaz de radiar energía en un número infinito de frecuencias, extendiéndose desde longitudes de onda muy grandes hasta longitudes de onda extremadamente cortas.

Ya que la temperatura es una representación estadística de una energía cinética promedio, ésta determina la probabilidad más alta para que las partículas vibren con una determinada frecuencia y tengan una longitud de onda específica. Esta longitud de onda más probable se determina por la ley de Wien, la cual puede obtenerse a través de una igualación a cero de la primera derivada de la Ley de Planck. El resultado del cálculo es la longitud de onda λ_{max} en la cual se concentra la mayoría de la potencia radiada. [8]

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} [\mu m] \quad (2.4.1.5)$$

La ley de Wien establece que entre mayor sea la temperatura de un cuerpo más corta será la longitud de onda de radiación, así como también que la frecuencia más probable de todo el espectro de radiación es inversamente proporcional a la temperatura absoluta del cuerpo. [19]

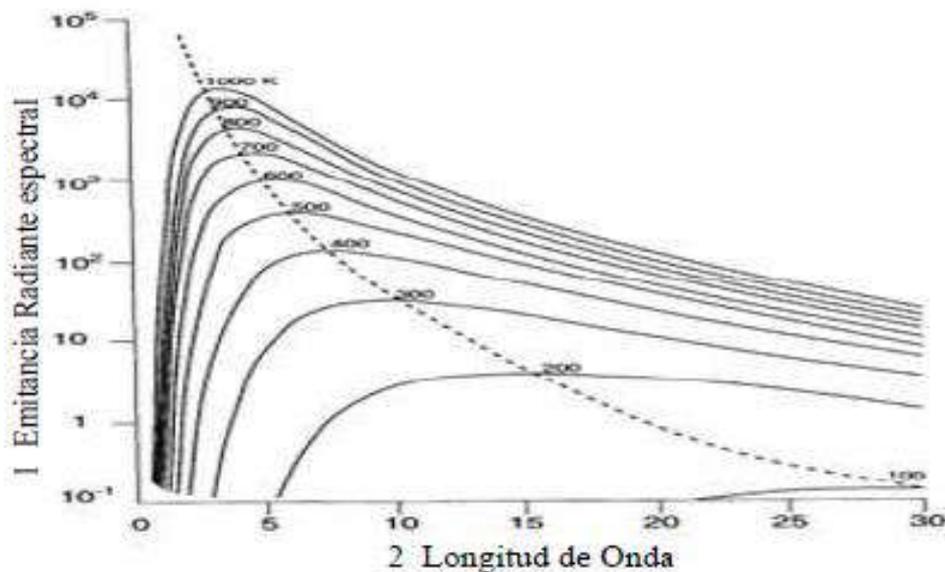


Figura 2.4.1.3 Curvas de Planck trazadas sobre escalas marcadas desde 100°K a 1000°K. [8]

A temperatura ambiente (300 °K), el pico de emitancia radiante se sitúa en 9,7 [μm], en el infrarrojo lejano, mientras que a la temperatura del nitrógeno líquido (77 °K), el máximo de una cantidad casi insignificante de emitancia de radiación se produce a 38 [μm], en las longitudes de onda del infrarrojo extremo (ver Figura 2.4.1.3) [8].

- LEY DE STEFAN-BOLTZMANN

Al integrar la fórmula de Max Planck, desde $\lambda=0$ a $\lambda=\infty$ se obtiene la emitancia radiante total $E(T)$ de un cuerpo negro. Simplificando la ecuación se llega a la Ley de Stefan-Boltzmann:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (2.4.1.6)$$

Donde $\sigma=0,566 \times 10^{-7}$ [W/m²K⁴] es la constante de Stefan-Boltzmann

La ley de Stefan-Boltzmann, llamada así en honor a Josef Stefan y Ludwig Boltzmann, establece que: La radiancia intrínseca de un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Gráficamente $W_{\lambda b}$, representa el área por debajo de la curva de Max Planck. [19]

2.4.1.2. EMITANCIA Y EMISIVIDAD EN CUERPOS NO NEGROS

Un cuerpo negro tiene una emitancia de 1, porque el absorbe o emite la radiación térmica sin reflexión o transmisión. Los cuerpos reales tienen emitancias menores que la unidad, puesto que la emitancia depende de la forma, superficie, rugosidad, y oxidación u otros efectos de superficie. Así, se necesita definir a la emisividad en una forma más precisa e introducir el concepto de emitancia.

Existen tres procesos térmicos que pueden producirse en la transferencia de calor de un cuerpo y que evitan que un objeto real se comporte como un cuerpo negro. Una fracción de la radiación incidente (α) puede absorberse, otra fracción (ρ) puede reflejarse y una última fracción (τ) puede transmitirse (ver Figura 2.4.1.4) [19].

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.4.1.7)$$

Donde α es la absorptividad: % de energía absorbida

ρ es la reflectividad: % de la energía reflejada

τ es la transmisividad: % de la energía transmitida

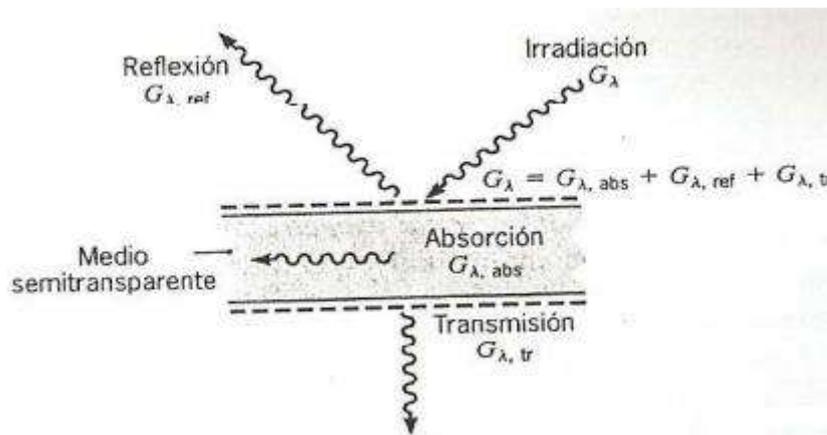


Figura 2.4.1.4 Energía incidente sobre un cuerpo y los 3 procesos térmicos posibles que ocurren. [19]

La emisividad espectral de un cuerpo (ϵ) es la proporción de la energía radiante espectral respecto a la de un cuerpo negro a la misma temperatura y longitud de onda.

$$\epsilon = \frac{W_0}{W_b} \quad (2.4.1.8)$$

En un cuerpo negro $\epsilon=1$, mientras que en un cuerpo gris $\epsilon<1$.

De acuerdo a la Ley de Kirchhoff, para cualquier cuerpo en equilibrio térmico, la emisividad espectral y la absorptividad espectral son iguales a cualquier temperatura y longitud de onda.

$$\alpha = \epsilon \quad (2.4.1.9)$$

Para un material opaco (no transmite nada) se tendrá que:

$$\alpha + \rho = 1 \quad (2.4.1.10)$$

Para materiales muy pulidos o espejados ϵ tiende a 0. Por lo tanto para un espejo perfecto:

$$\rho = 1 \quad (2.4.1.11)$$

Por estos conceptos, se puede escribir la ley de Stefan-Boltzmann para cuerpos grises de la siguiente manera:

$$W_\lambda = \epsilon \sigma T^4 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (2.4.1.12)$$

Debido a que la emitancia debe ser conocida para convertir mediciones de transferencia de calor radiante, en temperatura; es esencial que la emitancia se determine adecuadamente para el material real bajo consideración y de esta manera obtener mediciones exactas de temperatura. [19]

Existen dos métodos experimentales para la determinación de la emitancia de un material, los cuales son:

- Se determina la temperatura real del material con un termómetro de contacto calibrado. Luego se mide la temperatura con un equipo de infrarrojo y se ajusta el valor de la emitancia hasta que la lectura de la temperatura concuerde con la lectura calibrada. De esta manera se encuentra el valor de la emitancia del material.
- Se aplica una pintura de emitancia conocida en una pequeña área del material que será analizado. Luego se obtiene la temperatura del área pintada, con una cámara termográfica o termómetro infrarrojo, calibrando los equipos térmicos mencionados hasta obtener la emitancia de la pintura. Posteriormente se obtiene la temperatura de un área no cubierta por pintura, y finalmente se ajusta la emitancia hasta que las dos temperaturas concuerden. [8]

2.4.1.3. MATERIALES SEMITRANSSPARENTES AL INFRARROJO

Consideremos un cuerpo no metálico semitransparente, como una placa plana y gruesa de material plástico. Cuando la placa se calienta, la radiación generada dentro de su volumen debe buscar salida hacia las superficies a través del material en el cual queda absorbida parcialmente. Es más, al llegar a la superficie, parte es reflejada al interior de nuevo. La radiación de fondo reflejada de nuevo se absorbe parcialmente, pero parte alcanza la otra superficie a través de la cual escapa la mayor parte, si bien parte de ella se refleja de nuevo. Aunque las reflexiones progresivas son cada vez más débiles, al calcular la emitancia total de la plancha deben sumarse todas. Cuando se suman las series geométricas resultantes, la emisividad efectiva de una placa semitransparente, se obtiene de la forma siguiente:

$$\epsilon = \frac{(1 - \rho)(1 - \tau)}{1 - \rho\tau} \quad (2.4.1.13)$$

Cuando la placa es opaca, la fórmula anterior se reduce a:

$$\epsilon = 1 - \rho \quad (2.4.1.14)$$

Esta última ecuación es particularmente útil, ya que a menudo es más fácil medir la reflectancia que medir la emisividad directamente. [8]

2.4.2. LOS SISTEMAS TERMOGRÁFICOS

Una vez mencionada una introducción a los fenómenos térmicos de la termografía infrarroja, ahora se puede hablar de la técnica específica de la termografía infrarroja.

2.4.2.1. ELEMENTOS DE UN SISTEMA TERMOGRÁFICO

Los elementos básicos de un sistema termográfico son: una fuente de radiación u objeto, una trayectoria de transmisión, un sensor y un subsistema de procesamiento, almacenamiento y despliegue. Cada uno de estos elementos desempeña un papel primordial en el proceso de censado, ya sea en el control o limitación de la información adquirida.

El objeto lo integran el cuerpo primordial de nuestra observación y otros objetos que se encuentren en el campo de visión del sensor. La termografía se basa en la interpretación de las variaciones cuantificables en las características espectrales, temporales y espaciales del objeto.

La trayectoria de transmisión es el medio a través del cual se propagan las ondas electromagnéticas y ésta tiene un impacto significativo en las bandas del espectro que pueden utilizarse como bandas de transmisión.

El sensor y el subsistema de procesamiento son probablemente los elementos esenciales en un sistema termográfico, puesto que es en éstos donde realmente se tiene un control. Una selección del sensor y el subsistema de procesamiento de acuerdo al problema, es determinante para asegurar que los resultados del estudio serán útiles y fácilmente cuantificables. El sensor más comúnmente empleado en un sistema termográfico es la cámara infrarroja, ya que ésta ofrece ventajas de adquisición de datos termográficos en aplicaciones de mantenimiento predictivo. [8]

Una cámara infrarroja tiene un aspecto semejante a una cámara de vídeo convencional, a diferencia de que ésta opera en el rango infrarrojo, es decir lo que se observa a través de ella es radiación térmica de un cuerpo. Con una cámara de infrarrojos es posible observar patrones térmicos en cualquier parte de una escena, además de que el censado de áreas espaciales grandes es muy simple.

La señal básica producida por una cámara de infrarrojos es una imagen en blanco y negro, en donde las partes con una temperatura mayor aparecen más claras que las partes con menor temperatura. Muchas cámaras proporcionan una imagen en color, pero éstas usan procesos de colorización de una imagen por medio de un software interno en la cámara, a través del cual se asignan diferentes paletas de color a las temperaturas medidas.

Se debe destacar que la función de un sistema de termográfico es la adquisición de datos físicos sin contacto; es decir, una forma de censar remotamente ciertas características de un cuerpo o sistema relacionadas a la radiación. Los datos obtenidos por los sensores infrarrojos son procesados generalmente por una computadora con la finalidad de extraer la información de interés. Diferentes sensores pueden proporcionar información única acerca de las propiedades del cuerpo o sistema bajo observación. [8] [20]

2.4.2.2. OBTENCIÓN DE LA IMÁGEN

Las cámaras de infrarrojo miden la radiación térmica emitida por un cuerpo u objeto. El hecho de que la radiación sea una función de la temperatura en la superficie de un cuerpo hace posible la medición y visualización de esta temperatura a través de una imagen. Sin embargo, la radiación medida por la cámara no sólo depende de la temperatura del objeto sino que también es función de la emitancia o emisividad del cuerpo, de la radiación producida por el medio que rodea al cuerpo de interés y por la atenuación o absorción debido a la atmósfera.

Para medir la temperatura de un cuerpo con exactitud, es necesario compensar los efectos provocados por las diferentes fuentes de radiación alrededor del cuerpo. Muchas de las veces éste proceso se realiza de manera automática dentro de la cámara; sin embargo, al analizar la imagen es necesario tener conocimiento de cómo se lleva a cabo esta compensación.

Como primer paso en el análisis de la imagen, se debe estimar la temperatura superficial del equipo a partir de los niveles de gris de la imagen; debe tenerse en cuenta que la radiación infrarroja ocurre en longitudes de onda correspondientes al color gris; por lo tanto, no se distinguen otros colores. En vista de esto, se hace uso de la información proporcionada en la escala conformada por el nivel de gris de una imagen y la temperatura correspondiente a dicho nivel y asociada a la imagen en cuestión. [8]

De acuerdo a lo expresado en el párrafo anterior, se tiene que dado un nivel de gris de la imagen $I[i][j]$, el correspondiente valor de temperatura T , se obtiene de la siguiente fórmula:

$$T = \left(\frac{T_{MAX} - T_{MIN}}{I_{MAX} - I_{MIN}} \right) \cdot I[i] \cdot [j] + T_{MIN} \quad (2.4.2.1)$$

Asumiendo una relación lineal entre los niveles de gris de la escala y los valores de temperatura en la imagen infrarroja. T_{MAX} y T_{MIN} , son los valores máximo y mínimo de temperatura indicados en la escala (nivel de gris-temperatura), asociada a la imagen. Del mismo modo, se tiene que: $I_{MAX} - I_{MIN}$, es el número de niveles de gris presentes en la imagen.

Una vez obtenidos los valores de temperatura de la imagen se realizan correcciones, en caso de ser necesarias, debido a condiciones ambientales y a la emitancia del cuerpo como se explica a continuación.

El parámetro más importante del objeto, involucrado en la medición de la temperatura, es la emisividad. Al adquirir una imagen térmica generalmente se asume que el valor de la emisividad del cuerpo bajo observación es unitario. Este valor se utiliza para convertir la radiación térmica medida a un valor correspondiente de temperatura. La compensación por efectos de emisividad, esto es, la conversión de un valor de temperatura medida con un valor de emisividad (ε_1), a un nuevo valor de temperatura con valor de emisividad (ε_2), es un proceso que involucra la ecuación de Stefan-Boltzmann para cuerpos grises.

Al mismo tiempo que el objeto está radiando energía debido a su temperatura superficial T_1 , también está absorbiendo radiación de su alrededor. Si el medio que rodea al cuerpo está a una temperatura efectiva promedio (T_{Amb}), la radiación incidente sobre él se puede calcular también de la Ecuación de Stefan-Boltzmann.

En general la potencia térmica total del cuerpo, está dada por:

$$Pot\ total = Pot\ emitida + Pot\ reflejada - Pot\ incidente \quad (2.4.2.2)$$

Expresado matemáticamente:

$$W_T = \sigma[\varepsilon_1 T_1^4 + (1 - \varepsilon_1) T_{amb}^4 - T_{amb}^4] = \sigma \varepsilon_1 (T_1^4 - T_{amb}^4) \quad (2.4.2.3)$$

A partir de esta expresión se puede calcular la temperatura del cuerpo de emisividad ε_2 que produciría la misma potencia térmica:

$$\sigma \varepsilon_2 (T_2^4 - T_{amb}^4) = W_T = \sigma \varepsilon_1 (T_1^4 - T_{amb}^4) \quad (2.4.2.4)$$

Y de allí despejar T_2 . [20]

Cabe recordad que esta es una simplificación y correspondería utilizar la integral de la Ecuación de Planck.

2.4.2.3. LA FÓRMULA DE MEDICIÓN

Al visualizar un objeto con una cámara termográfica, la cámara no sólo recibe radiación del propio objeto. También recibe radiación del entorno, ya que ésta se refleja en la superficie del objeto. Ambas se ven atenuadas en cierta medida por la atmósfera que se encuentra en el entorno de la medición. Debido a ello, se puede considerar que de la propia atmósfera proviene una tercera radiación.

Esta descripción de la situación de medición se aproxima a las condiciones reales. Los elementos omitidos podrían ser por ejemplo rayos de luz solar distribuidos en la atmósfera o radiación perdida, procedente de alguna fuente intensa de radiación situada fuera del campo visual. Las interferencias de este tipo son difíciles de cuantificar aunque, afortunadamente, en la mayoría de los casos son pequeñas y se pueden omitir.

En caso de que sea imposible omitirlas, la configuración de las mediciones hará que el riesgo de interferencias sea obvio, al menos para un usuario experimentado. En ese caso es responsabilidad del usuario modificar la ubicación desde donde se tomarán las mediciones para evitar interferencias, por ejemplo cambiando la dirección de visualización, bloqueando las fuentes de radiación intensas, etc. [20]

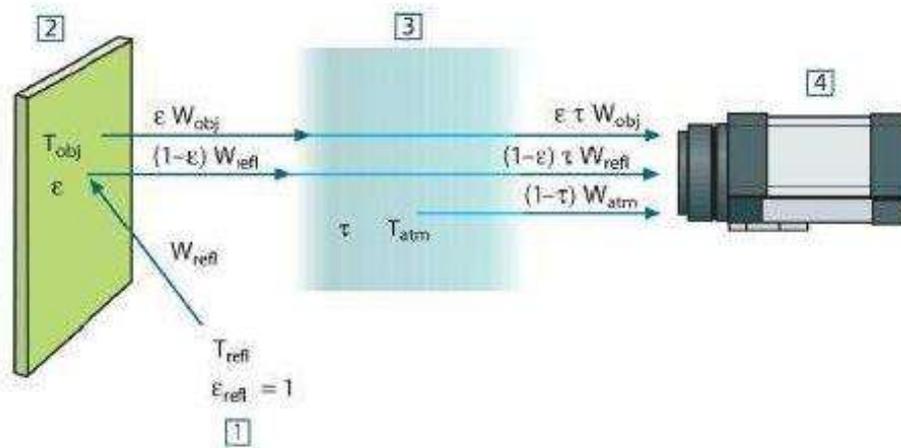


Figura 2.4.2.1 Representación esquemática de los parámetros y elementos en la medición termográfica. Siendo 1: entorno, 2: objeto, 3: atmósfera y 4: sensor. [8]

Según la Figura 2.4.2.1 y asumiendo que la energía de radiación recibida W de una fuente de temperatura de cuerpo negro T_{fuente} , en una distancia corta genere una señal de salida de la cámara U_{fuente} proporcional a la potencia de entrada (cámara de potencia lineal), se puede formular la ecuación:

$$U_{fuente} = CW(T_{fuente}) \quad (2.4.2.5)$$

En forma simplificada:

$$U_{fuente} = CW_{fuente} \quad (2.4.2.6)$$

Donde C es una constante.

Si la fuente es un cuerpo gris con una emitancia (ϵ), la radiación recibida sería $(\epsilon) \cdot (W_{fuente})$. De esta manera, está todo listo para escribir los tres términos de la potencia de radiación definidos como:

- Emisión del objeto: $\epsilon \cdot \tau \cdot W_{obj}$

Siendo ϵ la emitancia del objeto y τ la transmisividad de la atmósfera y T_{obj} la temperatura del objeto.

- Emisión reflejada desde fuentes del entorno: $(1-\epsilon) \cdot \tau \cdot W_{ent}$

Asumiendo que la temperatura de las fuentes del entorno (T_{ent}), es la misma para todas las superficies emisoras dentro de una semiesfera vista desde un punto de la superficie del objeto. Por supuesto, en algunos casos esto puede ser una simplificación de la situación real. No obstante, es una simplificación necesaria para obtener una fórmula que funcione y además, a T_{ent} se le puede dar un valor, al menos en teoría, que represente una temperatura eficaz en un entorno complejo.

Por otro lado, hay que destacar que se asumió la emitancia del entorno igual a uno. Esto es correcto según la ley de Kirchhoff, que establece que toda radiación que incida en las superficies del entorno irá siendo absorbida por las propias superficies. Por lo tanto, la emitancia es uno. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la última afirmación requiere para cumplirse que se considere una esfera completa alrededor del objeto.

- Emisión desde la atmósfera: $(1-\tau) \cdot (\tau W_{atm})$

Siendo $(1-\tau_{atm})$ la emitancia de la atmósfera y tomando una temperatura T_{atm} .

Uniendo estos tres términos en la ecuación de la potencia total:

$$W_{Total} = \epsilon \tau W_{obj} + (1 - \epsilon) \tau W_{ent} + (1 - \tau) W_{atm} \quad (2.4.2.7)$$

Si se multiplican todos los términos por C y se reemplazan los CW por sus respectivos U la ecuación de las fuentes queda como:

$$U_{total} = \epsilon \tau U_{obj} + (1 - \epsilon) \tau U_{ent} + (1 - \tau) U_{atm} \quad (2.4.2.8)$$

Despejando para obtener la U_{obj} :

$$U_{obj} = \left(\frac{1}{\epsilon \tau}\right) U_{total} - \left(\frac{1 - \epsilon}{\epsilon}\right) U_{ent} - \left(\frac{1 - \tau}{\epsilon \tau}\right) U_{atm} \quad (2.4.2.9)$$

Esta expresión representa la fórmula de medición general utilizada por algunas marcas de equipos termográficos. [8]

Dependiendo del equipo que se utilice para la medición, es probable que para obtener una medición correcta, el usuario debe proporcionar los valores de algunos parámetros que son necesarios para realizar los cálculos:

- La emitancia del objeto: ϵ
- La humedad relativa: HumRel.
- La temperatura ambiente: T_{amb} .
- La distancia al objeto: D_{obj} .

- La temperatura real en el entorno del objeto: T_{ent}
- La temperatura de la atmósfera: T_{atm}

2.4.3. NORMATIVAS RESPECTO A TERMOGRAFÍA

Existen distintas normativas respecto a los criterios a tener en cuenta a la hora de utilizar la termografía infrarroja para mantenimiento industrial. Se mencionarán brevemente las más importantes.

2.4.3.1. ASTM E1862-97

Esta norma norteamericana estandariza un método para medir y compensar las temperaturas reflejadas en objetos. Fue creada en 1997 por la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales para luego ser reprobada en 2002 y nuevamente en 2010.

Su principal función es la de obtener el valor de T_{ent} , valor que como se mencionó anteriormente ayuda a eliminar fuentes de error en el cálculo. Para esto provee dos métodos para medir y compensar las fuentes de error llamados Método Directo y Método Reflector. Dichos métodos se pueden realizar tanto en laboratorio como en pruebas de campo con elementos comunes.

Los métodos utilizados por esta norma pueden requerir la interacción de personal con objetos a temperaturas peligrosas o con equipos energizados. Por esa razón la misma norma recomienda complementarla con normas de seguridad e higiene. [22]

2.4.3.2. ISO 18434

La familia de normas ISO 18434 establecen los criterios para la utilización de la termografía infrarroja en el mantenimiento de máquinas. Fue creada en el 2008 por la Organización Internacional de Normalización y revisada por última vez en los años 2017 estando vigente en el momento de la realización del presente proyecto.

La 18434-1 establece los procedimientos generales de la termografía infrarroja, introduce la terminología a utilizar pertinente al monitoreo y diagnóstico de máquinas, provee guía para establecer los criterios con los que se asignará la severidad de los fallos detectables en máquinas con esta tecnología.

La 18434-2 es la segunda parte de la familia de normas, en ésta se desarrolla el análisis de las imágenes obtenidas y la caracterización de los fallos detectados. [23]

2.4.3.3. ISO 18251

Esta norma internacional creada en el 2017 por la Organización Internacional de Normalización establece los conceptos básicos de un sistema termográfico y de los equipos utilizados en los ensayos no destructivos con termografía infrarroja.

3. METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Con el fin de cumplir con los objetivos del presente proyecto, la metodología propuesta consta de tres etapas: auditoría e identificación de activos, plan de mantenimiento y plan de mejoras. En las siguientes secciones, se desarrollará cada una de estas etapas.

Se tomó como caso de estudio una planta maderera de la ciudad de Mar del Plata con más de 50 años de antigüedad. La empresa se dedica a la producción de aberturas en madera y de carpintería interior, especializándose en marcos de madera maciza y puertas placa. Trabajan principalmente con edificios, donde se destacan edificios de la ciudad, siendo la obra más reciente todo el mobiliario y aberturas de las torres Maral Explanada. Es una empresa familiar en la que participaron tres generaciones. Se encuentra ubicada la zona del puerto de la ciudad y en ella trabajan 12 personas en planta permanente. Para los proyectos de obra en edificios se contrata personal extra por períodos temporales. Cuenta con equipos adquiridos durante la primera generación de los dueños (de la década de 1950-1960) y equipos actuales con tecnología CNC.

Los aspectos clave sobre los que se enfoca el plan de mantenimiento y mejora son los siguientes:

- Identificación detallada de activos
 - Infraestructura
 - Nivel de criticidad
- Plan de mantenimiento
 - Análisis de fallos
 - Repuestos
- Plan de mejoras
 - Estructura Organizacional
 - Indicadores
 - Formación
 - Actualización de equipos y procedimientos

A continuación, se explicará brevemente cada uno de ellos.

- **IDENTIFICACIÓN DETALLADA DE ACTIVOS**

Se refiere al inventario de los activos donde se detalla toda la información relevante sobre el equipo, máquina o instalación. Dicha información difiere según la clasificación que se haga de cada equipo. El listado se ordena por distintos criterios: Ubicación, características técnicas y orden en la cadena productiva.

- Infraestructura

La infraestructura hace referencia al entorno del centro productivo. Incluye la línea de producción, el área de proceso y los accesorios necesarios para el proceso productivo. El orden, la limpieza, las herramientas e instrumentos y el estado en el que se encuentren son parte del día a día. Pueden ser el causal de un accidente laboral, de un daño a los equipos o una pérdida de tiempo y calidad. Por estas razones es menester la aplicación de un sistema de orden, limpieza, responsabilidad y cuidado de la infraestructura de cualquier planta.

- Nivel de criticidad

Se debe clasificar los activos según el impacto que genera en el sistema productivo al acontecer un fallo. Esta clasificación se realiza con un criterio de doble entrada, teniendo como el primer parámetro al impacto que produzca dicho fallo y como el segundo parámetro a la probabilidad de ocurrencia. Sabiendo los niveles de criticidad de cada activo se pueden priorizar los de riesgo alto para la planificación de rutinas de mantenimiento y el acopio de repuestos para dichos activos. Es decir, se asignarán más recursos para minimizar los casos críticos.

- **PLAN DE MANTENIMIENTO**

Un plan de mantenimiento se encarga de responder qué trabajo debe hacerse, en qué activo, con qué elementos se realiza, cómo se hace y la razón por la que se realiza dicha intervención.

Para desarrollar un plan de mantenimiento de un activo se deben tener en cuenta distintos criterios: el manual del fabricante, la experiencia propia, los recursos disponibles y la importancia dentro de la línea de producción.

Entre la información que se incluye dentro del plan de mantenimiento está un resumen de las características del activo, el historial de intervenciones que tiene el activo, el tipo de intervención/inspección que se realiza con su procedimiento, la frecuencia de la inspección/intervención y un registro donde se asiente el trabajo realizado.

Un documento que acompaña el plan de mantenimiento es el instructivo de las tareas a realizar en las intervenciones rutinarias.

El plan de mantenimiento de la planta se acompaña con un sistema de retroalimentación en donde se trate el análisis de las fallas y junto con los historiales de intervención de cada equipo se mejore de manera continua el plan de mantenimiento.

- **Análisis de fallos**

La falla es la imperfección en un equipo que le impide cumplir con la tarea para la cual fue diseñado. Predecir cuándo ocurren y prevenirlo es función del plan de mantenimiento, pero descubrir por qué ocurrieron es tarea del análisis de fallos. Una correcta gestión del mantenimiento incluye las herramientas para identificar las causas de los errores.

- **Repuestos**

El almacén técnico administra el inventario de repuestos y los consumibles necesarios para las operaciones. A su vez también se encarga de los pedidos y las compras técnicas de los mismos.

El objetivo en la gestión del almacén técnico se encuentra en encontrar el equilibrio entre contar con los repuestos necesarios para las operaciones en el menor tiempo posible y entre mantener un stock eficiente ocupando el menor espacio posible.

Las herramientas para lograr este objetivo están ligadas al estudio de criticidad de activos, a las recomendaciones del fabricante del equipo, al historial de fallos y a la disponibilidad del repuesto en sí.

Se establece una política de stock de acuerdo a las necesidades de la planta. La política que se tome establece los niveles de stock máximo, mínimo y de pedido. Siendo el límite máximo el que permite el espacio físico, el límite mínimo el que permite esperar a que llegue la compra y el pedido es la cantidad (superior a la mínima) en la cual se debe realizar el pedido de reposición.

- PLAN DE MEJORAS

La mejora continua o “kaizen” plantea que si se realizan pequeños progresos de manera continuada se logran importantes cambios a largo plazo. Si bien esta filosofía de trabajo se aplica en todos los ámbitos de una organización, en el rubro del mantenimiento se desprenden usos y facetas de sumo interés.

Un plan de mejoras siguiendo este concepto debería plantearse a largo plazo y de manera progresiva en un entorno resistente al cambio.

- Indicadores

Los indicadores claves de desempeño (KPI, Key Performance Indicator) son mediciones cuantificables que se utilizan para expresar el desempeño y comportamiento de un proceso. Se las compara con niveles de referencia (o de base) con el fin de determinar distintos factores tales como, desviaciones de la norma, disponibilidad de repuestos, planificación, financieros, etc.

Ya que existen KPI para todos los ámbitos de una empresa, en el presente plan de mejoras se hace énfasis en indicadores de gestión del mantenimiento.

- Estructura organizacional

La estructura en la gestión cobra importancia en pymes como el caso de estudio donde una misma persona cumple diferentes roles y no existen límites claros en las tareas que corresponden a cada trabajador.

Se deben especificar los roles y responsabilidades respecto al mantenimiento en el organigrama. Cada puesto debe ir acompañado de algún documento que describa las tareas y funciones. El rol de cada trabajador en la gestión del mantenimiento debe ser claro y conocido por la persona. En caso de una falla cada persona debe saber a quién recurrir y cómo reportar el fallo.

- Formación

La formación ocupa un lugar estratégico en las organizaciones, están relacionados con los objetivos actuales y con los futuros. Formar a una persona es darle mayor aptitud para poder desempeñarse con éxito en su puesto, es hacer que su perfil se adecue al perfil de conocimientos y competencias requeridos para el puesto [24].

- Actualización de equipos y procedimientos

Actualizar equipos es parte de la mejora continua. Los equipos que llevan muchos años en uso o que hayan quedado obsoletos deben tener un plan de actualización. Ya sea por ser potenciales causales de accidentes, por ser reemplazables por otra tecnología más productiva o segura, o por un cambio en el proceso.

Similar es el caso de los procesos, la mejora continua indica que periódicamente se revisen los procesos en búsqueda de modificaciones que lo acerquen más a los objetivos de la organización.

3.1. AUDITORÍA Y RELEVAMIENTO

El primer paso en cualquier proyecto de mantenimiento debe comenzar entendiendo el panorama general en el que se trabajará. No se puede planificar si no se conoce sobre los equipos y las instalaciones. Muchas veces se desvaloriza la etapa de comprensión de la situación y se intentan aplicar recetas de mantenimiento pre armadas con la creencia que todas las fábricas son iguales, lo que funciona en una máquina específica funciona de igual manera en todas las demás. De ahí que el primer paso en el desarrollo de un plan de mantenimiento sea una auditoría.

3.1.1. AUDITORÍA

Ya teniendo en cuenta los elementos clave sobre los que se trabajará en el plan de mantenimiento y mejora, la auditoría debe comprobar el estado de la empresa en todos esos puntos. Es de suma importancia un diagnóstico profundo antes de pensar medidas.

Si bien la auditoría es para recabar información sobre el problema en sí, es el punto de partida para la implementación. Representa el primer paso en el cambio de una situación que se considera problemática.

El objetivo de la auditoría es corroborar el estado actual de la empresa respecto a los elementos clave a tratar en el plan de mantenimiento y mejoras. No se trata de una auditoría técnica donde se evalúa al personal por su rendimiento. Es una evaluación profunda para identificar puntos de mejora. Los cuales son tanto para la gestión del mantenimiento como a los equipos y procedimientos.

En la auditoría se incluyen preguntas específicas sobre los puntos clave principalmente para obtener información sobre la existencia de dichas tareas/sectores y su desempeño.

Por otro lado, se incluyen preguntas de carácter general que no son sobre cuestiones particulares sobre las que se trabajará en los planes de mantenimiento y mejora. Estas preguntas tienen como objetivo reflejar un panorama de trabajo en general. Sirven como complemento a las preguntas particulares y facilitan a tener una idea de cómo se desarrolla la rutina diaria de trabajo.

Tanto las preguntas como el formato de la planilla de auditoría fueron basados en las utilizadas por el Ing. Pedro Cousseau y adecuados al caso de estudio por el autor. [25]

La planilla de la auditoría utilizada en el presente proyecto y las respuestas se muestran en el Apéndice al final del proyecto.

3.1.1.1. FORMATO

Primeramente, se pide completar la empresa a la que se le realiza la auditoría, luego la planta a la que se hace referencia y tercero la fecha. Se considera importante tener registro de la fecha en la que se realizan las auditorías para cumplir su función de examen del estado de una planta, una gestión o una empresa en un momento determinado.

AUDITORIA GESTION DE MANTENIMIENTO	
EMPRESA:	PLANTA:
FECHA:	

Figura 3.1.1.1 Cuadro de encabezado de la auditoría.

El cuerpo consistirá en una serie de preguntas que evalúan 10 dimensiones de la empresa. Cada una tendrá 4 posibles respuestas valoradas como 0-1-2-3. Estos valores se asignan dependiendo la pregunta y el criterio de análisis. Al final de cada sección se sumarán los

valores individuales de cada respuesta para obtener un puntaje específico por elemento clave. El resultado global surge de la sumatoria de todas las secciones. Asimismo, se puede calcular el resultado porcentual respecto del estado ideal que se corresponde con todas las respuestas en 3.

	0	1	2	3	RESULTADO	
1.1						OBSERVACIONES
1.1.1						
1.1.2						
1.1.3						
1.1.4						
1.1.5						
1.1.6						
1.1.7						
					0%	0

Figura 3.1.1.2 Cuadro base de auditoría. De izquierda a derecha: Numeración, pregunta, respuestas y observaciones. Debajo puntaje total y porcentual.

Cada sección y cada pregunta se encuentran numeradas para poder hacer referencia a las mismas más adelante. A su vez, se agregó una casilla de observaciones a la derecha de cada pregunta en caso que hiciese falta realizar aclaraciones pertinentes sobre el tema. Como otro accesorio de la auditoría se dejan libres algunos renglones de preguntas para completar en el momento de la realización si se considera necesaria una pregunta extra o hasta una sección extra.

El resultado total dividido sobre el resultado total ideal en porcentaje, se lo suele llamar índice de conformidad. El índice de conformidad es un indicador de qué tan completa es la gestión de la planta a evaluar. De realizarse la auditoría periódicamente daría un parámetro del avance respecto a los objetivos del plan de mantenimiento y mejoras.

PUNTAJE TOTAL	
PUNTAJE MAXIMO	

PUNTAJE TOTAL	
INDICE DE CONFORMIDAD	

Figura 3.1.1.3 Cuadros finales de la auditoría. Puntajes totales y máximos e índice de conformidad.

3.1.1.2. CONTENIDO

		0	1	2	3
1.1	IDENTIFICACIÓN DE ACTIVOS				
1.1.1	¿Existe un inventario actualizado de las instalaciones?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo
1.1.2	¿Son conocidas las características técnicas de los activos? (piezas y repuestos, características de funcionamiento, mantenimiento)	No	Si pero no hay registro	Sólo de los activos importantes	Registro completo
1.1.3	¿Existe un plano de planta con la ubicación de los activos?	No y no se planeó	No pero se planeó	Si, pero incompleto	Si
1.1.4	¿Hay registros del historial de fallas de los activos?	Nada	Algunos equipos	Muchos	Todos
1.1.5	¿Se encuentran identificados correctamente en campo? (etiquetado)	No	Si, sin etiquetado	Si, pero incompleto	Totalmente Completo
1.1.6	¿Hay un responsable de los activos?	No	En pocos activos	En casi todos los activos	Para todos los activos
1.1.7	¿El personal tiene conocimiento y acceso a las características técnicas de los activos?	No	En pocos activos	En casi todos los activos	Para todos los activos

Figura 3.1.1.4 Preguntas y respuestas de la auditoría sobre la identificación de activos.

En esta sección se encuentran preguntas sobre la existencia de un registro, tales como la 1.1.1, la 1.1.3 y la 1.1.4. Dichas preguntas tendrían como respuesta Sí o No, teniendo la inexistencia un valor 0 y la existencia un valor 3. Pero se consideró como niveles intermedios que se encuentre en planeamiento o que existieran de manera parcial. Lo esperado en esas preguntas es contar con si debe trabajarse desde cero en esos documentos, si hay que completar el trabajo de otro o si ya se encuentra hecho. En los casos que sean positivo se pide permiso para acceder a esos documentos.

Las preguntas 1.1.2 y 1.1.5 tratan sobre el conocimiento y reconocimiento respecto a los equipos. Las respuestas correspondientes al valor 0 son del desconocimiento total. El caso 1 es para cuando se tiene conocimiento, pero no hay ningún registro ni documentación al respecto, depende de la experiencia del operario y sus conocimientos particulares. En el 2 y 3 se dejaron respuestas que den cuenta de un trabajo parcial o completo de gestión del conocimiento de dichos activos. Particularmente en estas preguntas se deja un componente subjetivo, el conocimiento sobre algo no necesariamente debe ser en forma de documentación o etiquetado. Ese es el objetivo ideal, pero es común que se trabaje en base a la experiencia de los operarios. En los casos de respuestas 0 o 1 se trabaja sobre un sistema de etiquetado e identificación de activos y de una búsqueda o producción de documentos técnicos de activos. En el caso 2 se ampliará la documentación existente tomando como base el sistema actual.

La pregunta 1.1.6 es sobre si hay un responsable para cada equipo nombrado por la empresa. Esta información, de existir, se suma directamente a las características de los activos. En caso que no se aplique a todos, se asignará al supervisor del sector como persona responsable.

Por último, la pregunta 1.1.7 es complementaria al proyecto. De existir los documentos sobre los activos, es recomendable que los operarios tengan acceso a la información técnica del equipo sobre el cual trabajan, así como a la información respecto a la seguridad e higiene y de cómo actuar en casos de accidentes entre otros.

		0	1	2	3
1.2	INFRAESTRUCTURA FISICA INTERNA				
1.2.1	¿Hay un lugar apropiado para guardar las herramientas de trabajo?	No	Para algunas	Para casi todo	Óptimo
1.2.2	¿Está limpia y ordenada la planta?	No, muy desordenado	Mal aspecto	Aceptable	Excelente
1.2.3	¿Están delimitadas las áreas de proceso y de circulación?	No	Algunas	La mayoría	Si
1.2.4	¿Las herramientas se corresponden con lo que se necesita?	No	Carencia importante	Falta algo	Si
1.2.5	¿Las máquinas herramientas del Taller se corresponden con lo que se necesita?	No	Carencia importante	Falta algo	Si
1.2.6	¿Se cuenta con medios de comunicación interna y externa, medios de elevación, y medios de transporte necesarios?	No	Carencia importante	Problemas menores	Si, todos
1.2.7	¿Existe sistema de seguridad en la planta?	No	Carencia importante	Problemas menores	Si

Figura 3.1.1.5 Preguntas y respuestas de la auditoría sobre la infraestructura física interna.

El foco de estas preguntas es sobre el orden, la limpieza y el estado de herramientas. Son temas subjetivos parcialmente ya que depende de la percepción de cada individuo. El enfoque que se busca en esta dimensión de preguntas es si existe una filosofía de trabajo en base al orden, la limpieza y el cuidado, y si se está conforme con este sistema actual. Se contrastan los resultados de la auditoría con los del relevamiento de planta ya que se podrá observar si realmente se cumple con un orden y limpieza mínimos. Con ambas cosas se alcanzará un nivel de conocimiento respecto a la situación actual en la que se puede recomendar o no la aplicación de una filosofía de trabajo como puede ser las 5S.

Acorde a lo mencionado anteriormente se observan las preguntas 1.2.1, 1.2.2 y 1.2.3. Estas preguntas son de carácter general y cumplen con lo dicho sobre corroborar la existencia de una filosofía de trabajo en base al orden y la conformidad con el sistema actual. El valor 0 se reserva para casos extremos tales como un desorden y suciedad generalizados que representen un peligro alarmante para los operarios. Los casos 1 y 2 serán tomados como un sistema ineficiente o una desconformidad.

Las preguntas 1.2.4, 1.2.5 y 1.2.6 son sobre necesidades de infraestructura que tiene la planta. Si bien no se puede trabajar sobre este tema ya que depende del presupuesto de la empresa para cubrir los requerimientos que surjan, dan una idea general de cuánto cambiará el número de equipos, herramientas o vehículos en la planta. Si se plantea un orden en una planta que se encuentra en crecimiento y no cuenta aún con los elementos completos, se deberá modificar para cada equipo a medida que se añada. Los casos 0 y 1 serán tomados en cuenta a la hora de plantear un sistema de ordenamiento.

En el caso de la 1.2.7 se espera analizar la posibilidad de robos en la fábrica. Siendo un parámetro importante a tener en cuenta a la hora de plantear una filosofía de orden. Si faltara una herramienta no se sabría si fue robada o se perdió en el desorden. Nuevamente, se trata de una pregunta complementaria que da noción del entorno de la planta.

		0	1	2	3
1.3	ANÁLISIS DE CRITICIDAD				
1.3.1	¿Existe un análisis de las líneas en función de riesgo / impacto de fallas?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo
1.3.2	¿Existe un análisis de los equipos/instalaciones en función de riesgo / impacto de fallas?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo
1.3.3	¿Se actualiza periódicamente esta información?	Nunca	A veces	Casi siempre	Siempre
1.3.4	¿El personal tiene conocimientos de este concepto y lo tiene en cuenta en su accionar?	No	Algo	En forma Frecuente	Siempre

Figura 3.1.1.6 Preguntas y respuestas de la auditoría sobre la criticidad de activos.

El objetivo de esta serie de preguntas es simplemente inquirir sobre la existencia de un análisis de criticidad en líneas y activos. Al igual que en las preguntas de la sección 1.1, se evalúa el conocimiento con y sin documentación de respaldo.

En las 1.3.1 y 1.3.2 se toma el criterio mencionado. Para las respuestas 0 y 1 se plantea un análisis completo y en el caso 2 se complementará la documentación y el análisis existente. Tanto para el caso 2 como para el 3 se evaluará igualmente el análisis realizado. Existe la posibilidad que se hayan utilizado criterios erróneos o desactualizados en los análisis de criticidad existentes. De la mano de este último comentario se encuentra la pregunta 1.3.3. Si no se actualiza la información puede llegar a ser igual o más peligroso que no tenerla.

La 1.3.4 nuevamente complementa las preguntas anteriores con el acceso y distribución de la información a los operarios. Si un operario es consciente de lo crítico que es el equipo o la línea sobre la que trabaja será más cuidadoso y concentrado en evitar fallas. La pregunta en sí colabora con generar conciencia al encuestado. Propicia que considere mejorar las vías de comunicación y el acceso a la información de todos los niveles de la empresa.

		0	1	2	3
1.4	PLAN DE MANTENIMIENTO				
1.4.1	¿Existe un plan de mantenimiento que afecte a todas las instalaciones y equipos significativos de la planta?	No	Carencia importante	Problemas menores	Si
1.4.2	¿Hay una programación de las tareas incluidas en el plan de mantenimiento (quien y cuando se realizará cada tarea)?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo
1.4.3	¿El Plan de mantenimiento respeta las instrucciones de los fabricantes?	No	Algo	Casi siempre	Siempre
1.4.4	¿El plan de mantenimiento se realiza y se cumple?	Nunca	A veces	Casi siempre	Siempre
1.4.5	¿El plan de mantenimiento tiene en cuenta el concepto de criticidad de líneas y equipos?	No	En general, no	Casi siempre	Siempre
1.4.6	¿Existe plan de mantenimiento preventivo/predictivo para equipos Importancia Alta?	No	Informal / intuitivo	Formal pero incompleto	Si
1.4.7	¿Se cuenta con algún sistema administrativo para gestionar el Plan de Mantenimiento?	No	Si, pero se usa poco	Problemas menores	Si. Se usa a diario
1.4.8	¿Están establecidos los límites de las alertas de avería / falla para los equipos con Mantenimiento Predictivo?	No	En general, no	Casi siempre	Siempre
1.4.9	¿Todos los trabajos de mantenimiento que se realizan se reflejan en una orden de trabajo?	No	En general, no	Casi siempre	Siempre
1.4.10	¿Actualmente hay personal con conocimientos en mantenimiento eléctrico?	Nadie	Algunos	Muchos	Todos
1.4.11	¿Actualmente hay personal con conocimientos en mantenimiento mecánico?	Nadie	Algunos	Muchos	Todos

Figura 3.1.1.7 Preguntas y respuestas de la auditoría sobre el plan de mantenimiento.

La sección 1.4 difiere de las anteriores en que, si la primera pregunta resulta negativa, muchas otras inmediatamente lo serán también. Esto se debe a que el objetivo de este inciso no sólo es indagar sobre la existencia de un plan de mantenimiento sino también comprobar su

eficiencia y eficacia. Se profundiza más en este tema por ser la pieza central del presente proyecto.

La 1.4.1 apunta directamente a la existencia de la planificación. Los extremos 0 y 3 son la existencia o inexistencia de un plan de mantenimiento. Los estados intermedios son mantenimiento sin planificación o de forma incompleta.

Para profundizar en el plan de mantenimiento, si es que se realiza uno, se cuenta con las preguntas de la 1.4.2 a la 1.4.9. El índice de conformidad de esta sección en particular será una referencia directa al funcionamiento del plan de mantenimiento. Las respuestas 0 y 1 indican los puntos endebles del plan o de la gestión del mantenimiento. A los puntos con puntaje 2 o 3 se los tiene en cuenta a la hora de diseñar el plan.

Finalmente, las preguntas 1.4.10 y 1.4.11 complementan la información sobre el mantenimiento respecto a si se cuenta con los operarios en las tareas de control del estado de los equipos de manera segura. Si nadie en planta cuenta con conocimientos de mecánica o electricidad (respuesta 0) es peligroso que manipule o abra un equipo más allá de la operación cotidiana y segura que suele realizar. En este caso sólo se contaría con la inspección profesional de terceros. Para las respuestas 1, 2 y 3 se puede contar con utilizar al personal de planta como personal de mantenimiento.

		0	1	2	3
1.5	ALMACEN DE REPUESTOS				
1.5.1	¿Existe una instalación apropiada para almacenar los repuestos?	No	Carencia importante	Problemas menores	Si
1.5.2	¿Existe un inventario actualizado de los repuestos almacenados?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo
1.5.3	¿Se pueden encontrar relativamente rápido los repuestos que se necesitan cuando se van a buscar?	Nunca	A veces	Casi siempre	Siempre
1.5.4	¿Se administra el stock conociendo niveles mínimos, máximos y de pedido?	No	Algunos casos	Casi siempre	Si
1.5.5	¿Se comprueba periódicamente que se dispone de ese stock?	No	Algunos casos	Casi siempre	Si
1.5.6	¿Los movimientos del almacén se registran de alguna forma (sistema informático, hoja de cálculo, etc.)?	Nunca	A veces	Casi siempre	Siempre
1.5.7	¿Coincide lo que se cree que se tiene (según los inventarios y el sistema informático) con lo que se tiene realmente?	Nunca	A veces	Bastante seguido	Siempre
1.5.8	¿Están las estanterías y cajones identificados claramente?	No	Algo	Problemas menores	Si

Figura 3.1.1.8 Preguntas y respuestas de la auditoría sobre los repuestos.

El quinto grupo de preguntas se focaliza en el almacenamiento de repuestos y materiales. La finalidad de este paquete de preguntas es evaluar la gestión del almacén y el desempeño de dicha gestión. Se espera obtener datos para facilitar el sistema de inventario y administración de repuestos.

La primera pregunta y la última, las 1.5.1 y 1.5.8, son sobre el estado físico del almacén. La contestación de estas preguntas en caso de ser 2 o 3 no requerirá más acciones que pedir las identificaciones de las estanterías y cajones para hacer referencia a ellos al organizar el almacén. Por el contrario, si son 0 o 1 se deberá tomar medidas sobre cómo organizar el espacio de almacenamiento.

El resto de las preguntas indagan sobre la gestión y el cumplimiento de las tareas de pañol. La 1.5.2, 1.5.5, 1.5.6 y 1.5.7 son sobre el control del stock y manejo del inventario. Respuestas en 0 y 1 en al menos una significa un deficiente control. Todas estas preguntas van de la mano de una correcta gestión. No tener inventario, no comprobar el stock, no comparar el stock

esperado con el real o no registrar los movimientos trae de la mano pérdida de materiales y de confianza en las personas o en la gestión.

Por su parte, la pregunta 1.5.3 abarca los tiempos de entrega de materiales. Puede referirse al tiempo que se tarda en buscar un material en el pañol o en los pedidos de elementos que se encargan por fuera de la empresa. En ambos casos incide en el ámbito de la gestión del almacén de repuestos. Respuestas de valor 0 o 1 requerirán un estudio del stock necesario de los elementos que más retraso de entrega tiene aparejado.

Por último, la 1.5.4 evalúa si se tiene un criterio de control en base a los valores mínimos, máximos y de pedido. Se espera una respuesta de sí (3) o no (0), siendo cualquier valor intermedio cuantificado como un progreso, pero en lo que respecta al proyecto de gestión del almacén se tomará como un no.

		0	1	2	3
1.6	ANÁLISIS DE FALLAS				
1.6.1	¿Se realiza un análisis de las fallas que generan paradas?	Nunca	A veces	Bastante seguido	Siempre
1.6.2	¿Se llevan a la práctica las conclusiones de estos análisis?	No	Algo	Bastante seguido	Siempre
1.6.3	¿Está el personal capacitado en herramientas de análisis de fallas?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo
1.6.4	¿Hay proyectos de mejoras en base a datos de fallas repetitivas?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo
1.6.5	¿El tiempo medio de resolución de una avería es bajo?	No	Bastante lento	Bastante rápido	Si
1.6.6	¿El número de averías repetitivas es bajo?	No	Poco	Bastante	Si
1.6.7	¿El número de averías con el máximo nivel de prioridad (o averías urgentes) es bajo?	No	Poco	Bastante	Si
1.6.8	¿El número de averías pendientes de reparación es bajo?	No	Poco	Bastante	Si
1.6.9	¿La razón por la que las averías están pendientes está justificada?	No	En general, no	Casi siempre	Siempre

Figura 3.1.1.9 Preguntas y respuestas de la auditoría sobre el análisis de fallas.

El objetivo de estas preguntas es caracterizar los tipos de fallas de los equipos y corroborar el nivel de respuesta que se lleva a cabo en dichas situaciones.

La primera pregunta consulta sobre la existencia de un análisis de fallas. Una respuesta en 0 o 1 significa que no se suelen investigar las causas de las paradas de equipos. Que no se analicen los fallos repercute en las preguntas 1.6.2 y 1.6.4 ya que se refieren a las acciones basadas en dicho análisis. La falta de análisis a su vez tiene incidencia en la caracterización de las fallas por su correlación con la caracterización, aunque no de manera tan marcada ya que puede identificarse mas no estudiar su causa. Las respuestas positivas en este punto (2 y 3) no reflejan más que la existencia de preocupación. Será en el resto de preguntas donde se estudiará el criterio de análisis y las acciones consiguientes sobre las causas.

La 1.6.3 difiere del resto ya que se enfoca en si es posible asignar personal de planta a la tarea de analizar las fallas.

Las 1.6.5, 1.6.8 y 1.6.9 dan información de los tiempos de respuesta y la gestión del mantenimiento, particularmente referido a fallas. Puntos bajos requieren planteamiento de medidas correctivas en este ámbito. Corregir tiempos de respuesta irá de la mano del plan de mantenimiento, del plan de formación de personal o de la contratación de un servicio de mantenimiento correctivo de emergencia. Puntos altos traerán un análisis del trabajo realizado y la implementación de indicadores de eficiencia de mantenimiento.

Las preguntas 1.6.6 y 1.6.7 caracterizan los fallos. Si bien ante un puntaje bajo de la 1.6.1 se espera poco conocimiento sobre los tipos de fallas, igualmente tienen valor por sí mismas. Por el contrario, si fue positiva la 1.6.1 cobra mayor valor el resultado de estas preguntas. Dependiendo la caracterización de los fallos, alta incidencia de uno, de ambos o de ninguno, se trabaja con diferentes herramientas de mantenimiento en su conjunto.

		0	1	2	3
1.7	INDICADORES				
1.7.1	¿Existen indicadores o KPIs para medir el funcionamiento de la planta?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo
1.7.2	¿Existen indicadores para medir la utilidad del Almacén Técnico?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo
1.7.3	¿Existen indicadores o KPIs para medir el impacto de Seguridad y Medio Ambiente?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo
1.7.4	¿Existen indicadores o KPIs para medir la eficiencia del Mantenimiento?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo
1.7.5	¿Existen indicadores para medir el avance de los planes de capacitación?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo
1.7.6	¿Se han definido dichos indicadores en base a la contribución a la mejora de la organización?	No	Algo	Bastante	Totalmente
1.7.7	¿Tienen conocimiento los integrantes del equipo sobre la contribución de los KPIs al logro de los Objetivos?	No	En general no	Casi siempre	Siempre

Figura 3.1.1.10 Preguntas y respuestas de la auditoría sobre los KPI.

Ya fuera del plan de mantenimiento y dentro del plan de mejoras, esta serie de preguntas tiene como fin identificar el uso de indicadores de gestión del mantenimiento. Conocer la existencia de KPI ayuda a desarrollar nuevos indicadores para complementar la información que se obtiene de los actuales o, en caso de no haberlos, crearlos desde cero.

Las preguntas desde la 1.7.1 hasta la 1.7.5 abarcan los ámbitos sobre los que interesa obtener información de los KPI. Excepto por los casos donde sea 0 la respuesta, se consulta sobre los indicadores y su uso.

Para consultar sobre si se pensaron los indicadores en base a la filosofía de mejora continua está la 1.7.6. Es una pregunta de contexto en la que se espera que, junto con otras que apuntan a esta línea de pensamiento, se identifiquen criterios de mejora continua más allá de que sean adrede o no.

Al igual que en otras secciones, la 1.7.7 ayuda a comprender si los canales de comunicación de la empresa informan a todos los niveles de los objetivos. Muchos indicadores son medidos e informados por los operarios de los equipos y su conocimiento sobre la importancia de mediciones correctas es clave a la hora de tener KPI.

		0	1	2	3
1.8	ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL				
1.8.1	¿Esta definido el Organigrama?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo
1.8.2	¿Existe descripción de funciones para los puestos?	No	Para algunos	En casi todos los puestos	Para todos los puestos
1.8.3	¿Se ha definido un presupuesto general de mantenimiento?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo
1.8.4	¿Están discriminados los conceptos principales de dicho presupuesto?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo
1.8.5	¿Esta definidos los roles y responsabilidades de la gestión del mantenimiento?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo
1.8.6	¿Se puede considerar que la estructura está acorde a las necesidades de la operación?	No	Algo	A veces	Si
1.8.7	¿Existen reuniones periódicas a nivel operación y administración para analizar el avance de la gestión?	No	Algo	A veces	Si
1.8.8	¿El sistema informático resulta adecuado?	No	Algo	Bastante	Si
1.8.9	¿El sistema informático supone una carga burocrática baja?	No	Algo	Bastante	Si
1.8.10	¿Los mandos consultan la información contenida en el sistema informático?	No	En general, no	Casi siempre	Siempre
1.8.11	¿El personal de producción consulta la información contenida en el sistema informático?	No	En general, no	Casi siempre	Siempre

Figura 3.1.1.11 Preguntas y respuestas de la auditoría sobre la gestión del mantenimiento.

La estructura organizacional del mantenimiento es un rubro amplio que puede abarcar desde los recursos humanos, el sistema de gestión o el presupuesto del sector. El objetivo de estas preguntas es comprender si el mantenimiento es un área separada de producción, si el sector de operaciones abarca ambos o si ante la ausencia de responsables de gestionar el mantenimiento la gerencia se ocupa en casos de urgencia. La finalidad secundaria es interpretar cómo se gestiona. Con la información obtenida de estas preguntas se busca un origen a problemas de mantenimiento de todas las demás dimensiones.

Las 1.8.1, 1.8.2 y 1.8.5 consultan sobre la organización de recursos humanos. Respuestas en 0 o 1 dan idea de poca organización y mucha multifunción. En esta condición se dificulta la efectividad en la gestión del mantenimiento. No se sabe a quién recurrir en casos de falla ni a quién reportar las reparaciones u los informes de mantenimiento. La pregunta 1.8.6 complementa estas tres en el sentido de la opinión de la gerencia respecto a la situación. Puntaje alto en las 4 preguntas facilitará el trabajo del mantenimiento al tener claras las asignaciones de personal para realizar tareas y su supervisión.

Las 1.8.3 y 1.8.4 son sobre el presupuesto en mantenimiento. Con sólo dos preguntas no se puede evaluar si el presupuesto es correcto a no. El objetivo en este caso es corroborar si los gastos de mantenimiento son tenidos en cuenta y si se diferencia entre costos de rutinas predictivas, cambios de partes por mantenimiento preventivo, stock de piezas de repuesto y un fondo para emergencias correctivas.

Como parte de las preguntas para comprender el ambiente de trabajo se encuentra la 1.8.7. La respuesta, positiva o negativa, no influye de manera determinante en los planes a realizar. Sólo colabora con generar la idea de la forma de trabajar y comunicar entre el personal. Así como observar si se utiliza la retroalimentación como herramienta para la mejora continua.

Para finalizar la sección se consulta sobre el sistema informático de gestión del mantenimiento. Desde el sistema se pueden manejar la emisión de órdenes de trabajo (OT), el almacenamiento de la información técnica sobre equipos, la asignación de tareas diarias, el calendario de programación de mantenimientos preventivos y predictivos, etc. En las 1.8.8,

1.8.9, 1.8.10 y 1.8.11 se consultan sobre la eficiencia del sistema y su utilización. Si no existe un sistema de gestión del mantenimiento el puntaje será nulo en todos estos ítems. De existir, se consultará de manera diferenciada si es un sistema comercial o hecho a medida para la empresa, además de su funcionamiento para trabajar sobre los planes de mejora y mantenimiento en dicho sistema. Por este motivo las preguntas se basan en si es eficiente su uso y si es utilizado tanto por los mandos como por los operarios.

		0	1	2	3
1.9	FORMACIÓN				
1.9.1	Hay personal "imprescindible" cuya ausencia afecta el normal funcionamiento de la planta?	Varias personas	Al menos una persona	En Algunos casos	No
1.9.2	¿Se realiza una formación inicial efectiva cuando se incorpora un nuevo trabajador ?	No	No siempre	En casi todos los puestos	Para todos los puestos
1.9.3	¿Hay un plan de formación para el personal?	No	Si, pero sin formato	Aceptable	Para todos los puestos
1.9.4	¿Este plan de formación hace que los conocimientos en el mantenimiento de la planta mejoren?	No	Graves defectos	Aceptable	Si
1.9.5	¿Este plan hace que mejoren otros conocimientos (operaciones, seguridad, medioambiente, administración, etc)?	No	Poca incidencia	Aceptable	Si
1.9.6	¿El nivel de rotación entre el personal es bajo?	Muy alto	Mayor a la media	Normal	Muy bajo

Figura 3.1.1.12 Preguntas y respuestas de la auditoría sobre la formación de personal.

El objetivo de estas preguntas es descubrir si existe un plan de formación formal o informal y está basado en (o se tiene en cuenta) el mantenimiento. Si bien en casos donde el mantenimiento es externo no deba ser tan necesario contar con un plan de formación dentro de la misma empresa, puede adicionarse formación en mantenimiento al entrenamiento informal sobre el funcionamiento de una máquina.

La primera pregunta y la última orientan sobre el contexto laboral. Ayudan a comprender la dinámica de trabajo de planta. Ambas preguntas complementan la pregunta 1.9.3 ya que el personal imprescindible genera la necesidad de formación en el resto del equipo, especialmente si hay mucha rotación de personal.

Las 1.9.2 y 1.9.3 consultan la existencia de un plan de formación. Las respuestas se basan en la existencia de formación y la formalidad del mismo. Se espera que las observaciones en estas preguntas profundicen sobre el plan o la formación inicial.

Por último, las 1.9.4 y 1.9.5 caracterizan si la formación es netamente de mantenimiento o si es orientada a otros ámbitos con pequeña o nula injerencia en mantenimiento.

		0	1	2	3
1.10	PROCEDIMIENTOS Y EQUIPOS				
1.10.1	¿Los procedimientos son claros y perfectamente entendibles?	No	Algo	Bastante completo	Si
1.10.2	¿El personal recibe formación en estos procedimientos, especialmente cuando se producen cambios?	No	Algo	Bastante completo	Si
1.10.3	¿Hay equipos que requieran actualizaciones?	Todos	Muchos	Pocos	Ninguno
1.10.4	¿Cuando el personal realiza una tarea utiliza el procedimiento aprobado?	No	Algo	Bastante completo	Siempre
1.10.5	¿Los procedimientos se actualizan periódicamente?	No	En general, no	Casi siempre	Si

Figura 3.1.1.13 Preguntas y respuestas de la auditoría sobre procedimientos y equipos.

La actualización de procedimientos y equipos del plan de mejoras depende del estado de los mismos. El diagnóstico sobre procedimientos y equipos surge de la combinación de respuestas de la auditoría y del relevamiento de planta. El objetivo es buscar una oportunidad de mejora en los procesos productivos y en los equipos pensando en el mantenimiento y cómo facilitarlo.

La 1.10.1 pregunta sobre la claridad de los procedimientos, aunque el fondo es averiguar si existen dichos procedimientos en forma de documentos o si existen pero de manera oral y se basan en la experiencia o criterio del operario. Si los procedimientos son netamente de operaciones y no de mantenimiento se aclara en las observaciones. Si no se aclara a qué tipo de procedimiento se refiere se tomará como procedimiento de mantenimiento.

Si bien la 1.10.2 es sobre la formación, la pregunta se enfoca en la aplicación de cambios en procedimientos o equipos. Esta información complementa tanto a lo recopilado sobre formación de personal como la de actualización o creación de procedimientos. El puntaje en esta pregunta, al igual que en las otras preguntas de contexto, es referencial.

Al llegar a la 1.10.3 se consulta la opinión de la gerencia sobre actualizaciones en equipos. Se llama actualización a una modificación, automatización o ampliación de un equipo. Esta respuesta se contrasta con el relevamiento de planta.

La 1.10.4 consulta sobre la aplicación efectiva de procedimientos. Nuevamente es una pregunta de contexto, colabora con la creación de un concepto sobre la dinámica de trabajo.

Para finalizar la auditoría se consulta sobre la actualización de procesos dentro de la filosofía de mejora continua. La 1.10.5 no tiene respuestas que miden tiempo sino intención. No importa si un proceso se actualiza mensualmente o anualmente ya que depende del proceso en sí. Un proceso puede actualizarse por una nueva tecnología o nuevas facilidades para acceder a mejoras. Lo importante es la intención y la búsqueda de una mejora.

3.1.1.3. RESULTADO DE LA AUDITORÍA

Se entrevistó a uno de los mandos de la empresa, hijo del dueño con estudios técnicos y universitarios en Diseño Industrial. Dicha persona participa activamente en la producción como supervisor y operario cuando se requiere, en la gestión de la compañía como parte de la gerencia y como encargado de obra en las instalaciones externas que realiza la empresa. Él es el encargado de entrenar en el uso de equipos a los nuevos trabajadores y de brindar las capacitaciones en el uso de nuevos equipos o de modificaciones en procesos. A su vez, como técnico electromecánico, al igual que su hermano, es de los pocos miembros de la empresa con conocimientos de mantenimiento electromecánico. Los hermanos cumplen el rol de responsables de la reparación de equipos o de contratar un servicio de terceros cuando la falla supera sus capacidades.

Al elegir a quién realizar las preguntas de la auditoría se tomó a este representante de la compañía por tener tanto la visión de la gerencia como el contacto con los equipos y la planta a analizar.

Las respuestas completas se encuentran en el apéndice correspondiente al final del trabajo.

A modo de resumen se muestran los índices de conformidad por categoría y el índice total en la Figura 3.1.1.14.

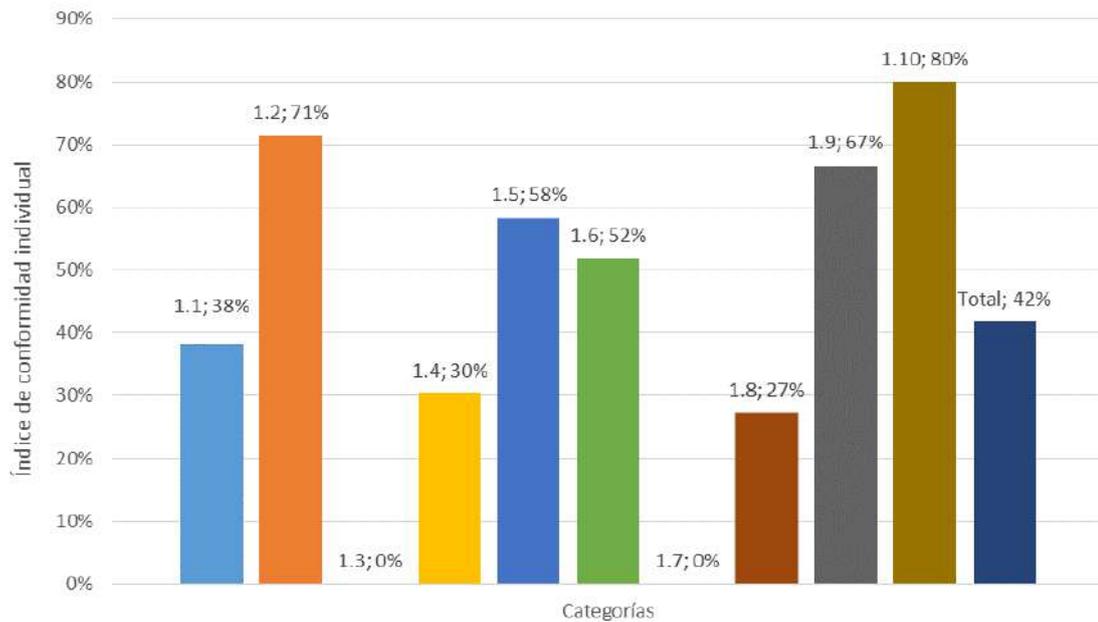


Figura 3.1.1.14 Índice de conformidad por categoría y el general de la auditoría.

3.1.2. RELEVAMIENTO DE PLANTA

El objetivo del relevamiento de planta es identificar los activos y las líneas de producción, verificar las respuestas de la auditoría respecto a la planta y reconocer hallazgos de posibles puntos de mejora.

La recorrida por la planta tiene la doble función de familiarizar con el entorno productivo y ubicar las líneas de producción con el camino que realiza el producto durante todo el proceso.

La fábrica está formada por tres sectores con funciones bien definidas. El principal, donde entra la materia prima y se realizan la mayoría de procesos de carpintería clásica, el secundario donde se realizan procesos específicos de melamina y el depósito de producto terminado.

En el galpón principal, de 1820 m², se encuentran las oficinas, el comedor, los vestuarios, el pañol y la recepción como parte edificada interna con su entrada particular. En esta nave también se encuentran el ingreso de materiales junto con los sectores de la etapa inicial y la de aproximación a medida que son solidarias a ambas líneas de producción. Luego se encuentra el sector con las dos etapas específicas de la línea de carpintería clásica con la etapa de mecanizado y la de terminación. En la Figura 3.1.2.1 se observa dicho galpón desde el área de materia prima mientras que en la Figura 3.1.2.2 el punto de vista es desde el ingreso de personas.



Figura 3.1.2.1 Nave principal desde el sector de depósito de materia prima, a la izquierda el sector de etapa inicial, a la derecha materia prima apilada y las mesas de mecanizado a mano. Al fondo la entrada a la nave de melamina junto a los dos tupíes.

El galpón de melamina, de 910 m², donde se encuentran las etapas específicas de la línea de melamina y puertas placa. Entre esta nave y el galpón de madera se encuentra la cabina de pintura.

Finalmente, la tercera nave es el galpón de producto terminado, donde se realiza el acopio y cuenta con una salida para la expedición.

La producción de la planta se divide en dos líneas: carpintería clásica y melamina. Ambas poseen dos etapas iniciales en común y la cabina de pintura como proceso final cuando es requerido.

Por la entrada de vehículos ingresa la materia prima directamente en la zona de depósito que consiste en apilados de las maderas por tipo.

La primera línea de producción comienza desde el ingreso de materia prima con los equipos de preparación de la madera en bruto. Estos son las dos sierras sin fin donde se trabaja en paralelo cortando en partes más pequeñas a las tablas. La segunda parte de la etapa inicial ocurre en dos garlopas donde se finaliza la etapa inicial o de entrada.

La segunda etapa del proceso en común para ambas líneas de producción es la de aproximación a la medida. En esta etapa se trabaja con dos cepillos y, cuando se requiere, una escuadradora.

Ya en la línea de carpintería clásica se inicia con la etapa de mecanizado donde se inicia con el trabajo en dos tupíes en paralelo, luego la madera pasa por la escopladora, el taladro de banco y el router CNC. A la par de este proceso de mecanizado se realizan trabajos a mano en bancos de trabajo.

Para la etapa de terminación se pasa al producto ya mecanizado por lijadoras de banda y de contacto. En esta etapa se le da el acabado final al producto y se pasa al galpón de producto terminado o se continúa por la cabina de pintura si es necesario.



Figura 3.1.2.2 Nave principal desde la entrada de personas. A la derecha la entrada al galpón de madera, en el centro las dos lijadoras de banda y al fondo a la izquierda los tupíes y la entrada al galpón de melamina.

La empresa cuenta con dos autoelevadores y zorras para movilizar las cargas pesadas, todos en buen estado y con mantenimiento oficial del fabricante. Como vehículo de transporte hasta las obras se cuenta con un pequeño camión con plotter de la empresa aunque se suelen usar los vehículos particulares de los dueños para transporte de materias primas, productos terminados y personal hasta las obras.

La instalación eléctrica fue realizada por un profesional matriculado y durante el recorrido y relevamiento no se observan falencias groseras que puedan originar accidentes o fallas en máquinas por este motivo. La canalización desde el tablero principal hasta los tableros seccionales es por bandeja suspendida a una altura mayor a 2,2 m. Las bajadas desde la bandeja son por caños cerrados y, por las potencias nominales de los equipos, las secciones de los conductores son correctas.

Si bien no se cuenta con un plano de planta oficial con la ubicación de los activos o etiquetas en los mismos, todos los equipos eran identificables debido a sus formas características y su ubicación en la línea de producción. En la Figura 3.1.2.3 se encuentra un esquema de planta para orientar al lector.

Como parte del relevamiento y siendo algo necesario para planificar el mantenimiento, se piden los modelos y manuales de todos los equipos de los que se dispongan. Dado que algunas máquinas datan de más de 40 años no se cuenta con sus manuales ni las recomendaciones del fabricante ya que en muchos casos los fabricantes ya no existen. Todos los manuales e información brindados por la empresa se incluyen en la lista detallada de activos de la 3.2.

Respecto a la infraestructura del mantenimiento de activos se observa que todas las herramientas y máquinas tienen un lugar definido, reconocible y congruente con su función en la línea de producción. Asimismo, se encuentra que muchas maderas sin un cometido claro se apilan en rincones y a los costados de equipos. En todos los equipos, bandejas portacables y en el suelo el aserrín se agrupa en pequeñas montañas. Inclusive al abrir tableros de control de equipos se encontraba aserrín acumulado.

Las herramientas y máquinas herramientas se encuentran en buen estado, tanto las nuevas como las antiguas mostraban estar afiladas o con mantenimiento y cuidado.

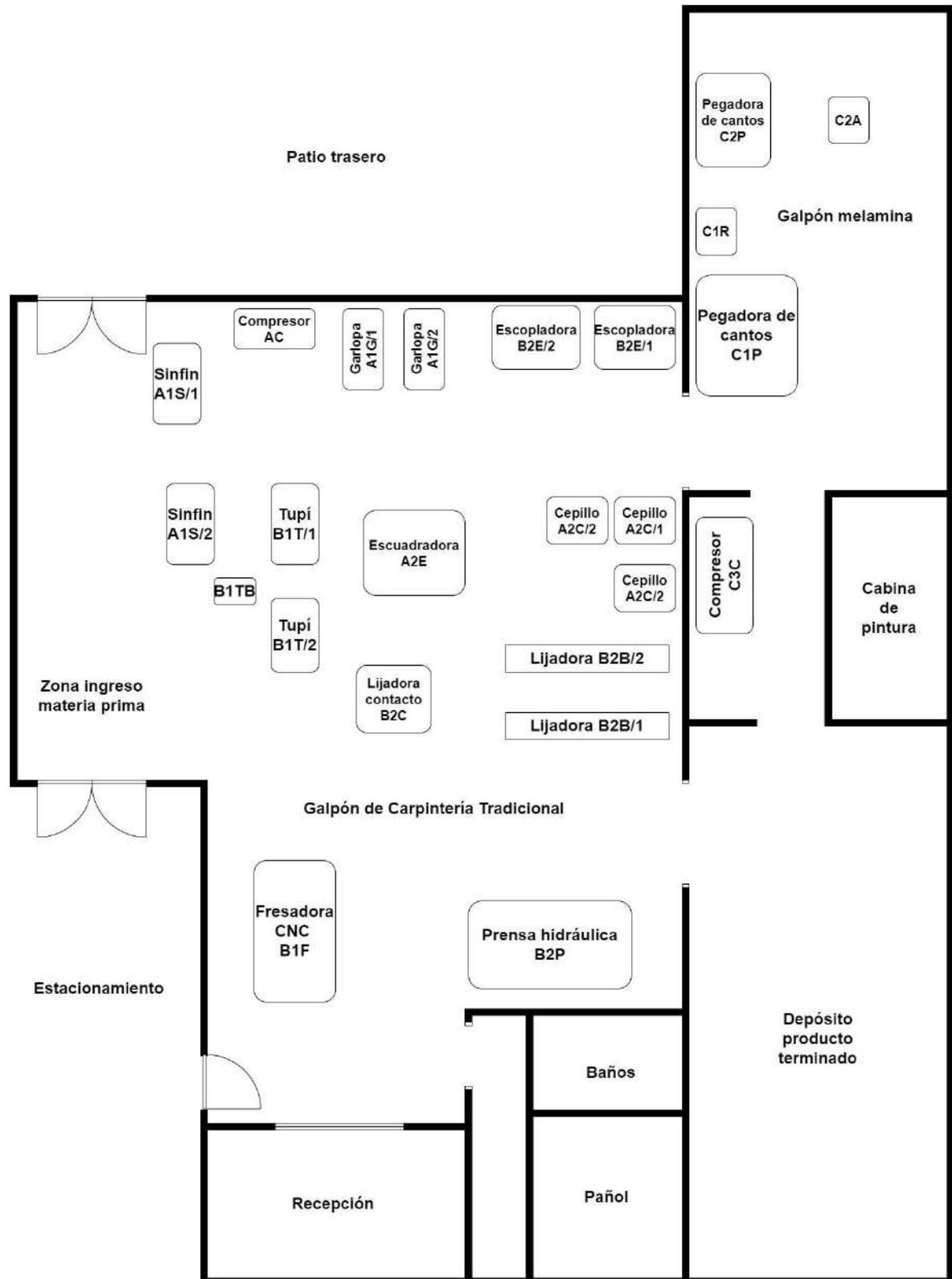


Figura 3.1.2.3 Esquema de planta con la ubicación de los equipos.

3.1.3. CONCLUSIONES SOBRE LA AUDITORÍA Y RELEVAMIENTO

En términos generales, se encuentra que la empresa en estudio posee buenas prácticas de trabajo y mantenimiento de la infraestructura tanto edilicia como de equipos y herramientas. Esto se debe a una arraigada cultura organizacional enfocada en el correcto uso de herramientas y equipos, baja rotación de personal, aprovechamiento de recursos y respeto a los procedimientos y normas establecidos. Resulta evidente que a lo largo de los años la empresa fue progresando en lo que respecta a tecnologías de fabricación. Como puntos a mejorar se encuentra la falta de documentación y organización de los procesos, existen muy pocos registros de las tareas realizadas. Se depende de los conocimientos de cada carpintero, operario o líder de sector para casi todas las tareas. Este punto aplica en distintos ámbitos de la empresa, tales como el almacén de repuestos, la formación del personal o los procedimientos. En el plan de mejoras se debe trabajar sobre estos aspectos.

Desde el punto de vista del mantenimiento, se observa necesaria la implementación de un plan de mantenimiento predictivo ya que la empresa se apoya enteramente en el mantenimiento correctivo. En este aspecto la planta se maneja como originariamente funcionaba, equipos trabajando hasta el fallo con poca confiabilidad y previsibilidad. Por otra parte, una característica intrínseca de la industria maderera es la suciedad y el desorden. Si bien la empresa posee una firme cultura sobre el orden de herramientas y el cuidado de las mismas, no se alcanza a mitigar el desgaste y riesgo que suponen el aserrín y las maderas acumuladas tanto para los equipos como para las personas.

El plan de mantenimiento debe solucionar estas falencias y revertir la falta de confiabilidad, convirtiendo una desventaja en uno de los pilares sobre los que se asiente la empresa a la hora de competir en el mercado. Evitar los retrasos y las mermas de calidad a la hora de entregar los productos.

Las otras oportunidades de mejora que se hallaron en base a la auditoría y el relevamiento son el análisis de fallas, los indicadores y los métodos de mejora continua. En estos casos no es una falta de formalidad o la utilización de métodos obsoletos, sino que la aplicación debe realizarse desde cero. Por eso mismo se abordará de manera completa sobre estos temas y no sólo desde la formalización de documentos o actualización de procesos.

3.2. IDENTIFICACIÓN DETALLADA DE ACTIVOS

Para catalogar todos los activos de la planta se debe establecer un código que identifique inequívocamente a cada activo. Dicho código alfanumérico va en cascada indicando en orden:

1-Etapa del proceso

2-Equipo

3-Pieza

4-Número de equipo

La clasificación por etapa se compone de una letra y un número. La letra hace referencia al lugar físico y el número a la etapa. Tiene 3 posibles letras: A ingreso, B galpón de carpintería tradicional y C galpón de melanina. Los números dependen del lugar y la etapa. Para el sector de ingreso de materia se tiene la etapa 1 inicial y la 2 de aproximación a medida. En el sector B, de la carpintería tradicional se tienen la etapa 1 de mecanizado y la etapa 2 de terminación. En el sector C de melanina se tienen etapas de líneas de producción diferente ya que en este galpón se trabaja sobre puertas placa que poseen sus equipos particulares y la melanina también con sus máquinas y proceso diferenciado. Por dicho motivo es que las etapas se llamarán 1 a la de melanina, 2 a la de puertas placas y 3 a la de pintura.

El segundo índice se corresponde a la máquina, instalación eléctrica o estación de trabajo que forma parte de la etapa. Se utiliza la inicial de la máquina, las dos primeras letras de la misma o iniciales de las palabras características del nombre.

El tercer índice no es para el activo en sí, pero se utiliza para el almacén de repuestos.

El cuarto índice es opcional cuando existen varios equipos en paralelo cumpliendo la misma función en el mismo orden. Al final del código y detrás de una barra (/) se ubica el número de equipo.

Un ejemplo se puede observar con una de las sierras sinfín, denominado con la letra "S". La etapa del proceso es la A1 porque se encuentra en la etapa inicial del ingreso de materia prima para cortar grosso modo la medida de las tablas. Al haber dos sierras sin fin se las numera por antigüedad, siendo la más antigua la 1. De esta manera la identificación de la sierra sin fin más antigua queda: **A1S/1**. Para los repuestos de ese equipo se agregarán los números de repuesto a continuación de acuerdo con la lista del pañol.

3.2.1. INFRAESTRUCTURA

La infraestructura es el conjunto de elementos, servicios, medios e instalaciones necesarias para la realización de una actividad. En este caso abarca la infraestructura física tal como las herramientas manuales y eléctricas, máquinas-herramientas que no sean específicas del proceso, vehículos, medios de elevación e instalaciones. A su vez, dentro de lo que es la infraestructura se incluyen elementos de gestión como la seguridad e higiene laboral o el orden y limpieza de planta.

La parte física de la infraestructura fue analizada en la auditoría y contrastada con el relevamiento de planta y se considera que tanto las herramientas, las máquinas herramientas, vehículos y medios de elevación se condicen con los necesarios para el proceso productivo. En el caso de las instalaciones, la parte edilicia se encuentra en buenas condiciones y con un mantenimiento gestionado por la gerencia de la empresa. Por otra parte, las instalaciones eléctricas, si bien no se encuentran en mal estado ni presentan errores de cálculo o instalación, datan de muchos años con un mantenimiento nulo o simplemente con reemplazo

de las piezas que fallan. El mantenimiento planificado para dicha instalación se detalla en la sección correspondiente.

Respecto a la seguridad e higiene en planta se observaron elementos de protección personal (EPP) como principal control de riesgos seguido de una capacitación informal sobre los equipos.

Según la clasificación de medidas de control por su impacto en las tareas, los controles administrativos y los EPP son las menos efectivas de todas (ver Figura 3.2.1.1). Esto se debe a que no eliminan el riesgo, sino que reducen la probabilidad de ocurrencia en el caso de los controles administrativos o disminuyen el daño con los EPP [26].



Figura 3.2.1.1 Clasificación de medidas de control de riesgos según su impacto en las tareas o procesos. [27]

El principal problema a solucionar es este rubro es la delimitación de sectores. Al ser una planta con vehículos circulando hay un peligro de accidentes constante que no se puede eliminar ni sustituir debido a la naturaleza de la planta. Por este motivo, como medida de control de ingeniería, se plantea la división de sectores de circulación de vehículos con pintura que señalice las distintas zonas: Sector de carga/descarga, áreas de trabajo para cada máquina (especialmente las que desprendan partículas peligrosas), vías de circulación de vehículos y de personas.

Tanto los colores, franjas o pictogramas que se utilicen deben ser de acuerdo a la ley nacional de seguridad e higiene en el trabajo (Ley N° 19.587 / Decreto N° 351/79) y la normativa nacional dictada en la IRAM10005 sobre colores y señales de seguridad.

Los EPP con los que actualmente cuentan en la empresa se enfocan principalmente en proteger a los operarios de accidentes por golpes y cortes. Cada operario cuenta con cascos reglamentarios, botines de seguridad, mamelucos y guantes. Para el caso particular de la proyección de partículas de la escudadora se utilizan lentes de seguridad en sus cercanías ya que dichas partículas sólo representan un problema para los ojos.

Como protección contra los riesgos de enfermedades laborales provocadas por ruido o partículas de aserrín en el aire se utilizan los EPP de orejeras de seguridad y barbijos con filtro.

Respecto del orden y la limpieza de planta, se observó durante el relevamiento que, si bien había un buen nivel de ambas en planta, siguen encontrándose oportunidades de mejora. Durante el relevamiento de planta se comentó que hubo un intento de aplicar las 5S pero que no prosperó por la resistencia al cambio tanto por parte de la gerencia como de los operarios. Se trató de implementar una filosofía de trabajo completa en un día en lugar de aplicarla progresivamente.

El enfoque de aplicar cambios grandes de manera dosificada es de los más efectivos. Al comunicar con tiempo y de manera lenta el cambio, los equipos tienen tiempo para ajustarse a los cambios necesarios, para buscar más información y entender cuál será su rol en esta nueva situación. [28]

Las 5S se explicaron brevemente en la sección 2.1.4, siendo estas traducciones del japonés: clasificación, orden, limpieza, estandarización y disciplina.

En el caso de estudio la estandarización, el orden y la limpieza se cumplen en su gran mayoría. Por eso los esfuerzos deberían enfocarse en las dos palabras restantes, clasificación y disciplina. La separación de materiales en uso, para usar o desechos y el control de esto mismo.

La mayor acumulación de elementos fuera de lugar que se observaron eran materiales, maderas en este caso. La filosofía de 5S entonces deberá realizarse en todas las maderas sueltas que se encuentran tiradas por la planta. Clasificarlas en uso, retazos útiles o en desechos. A los materiales en uso colocarles un recipiente al lado del equipo o estación en la que se lo utiliza, de tal manera que, al terminar una etapa del proceso, se deja en un espacio delimitado o un recipiente según el tamaño de la pieza. Para los retazos útiles se puede asignar un espacio donde colocarlos permitiendo que si se necesita un taco o una pieza pequeña se busca en el lugar asignado y no por toda la planta. La estandarización corre por cómo y dónde colocar las maderas. La disciplina corresponde a cada operario con su espacio y de la gerencia en tomarse el tiempo de recorrer la planta, con la misma función puede aplicarse un KPI de control. El indicador se explicará en más detalle en su sección correspondiente.

Para la limpieza del aserrín, el personal ya se encuentra capacitado sobre la importancia de la limpieza y realizan tal tarea de manera correcta. El problema es la limpieza en tableros, bandejas y en lugares inaccesibles comúnmente.

En algunos tableros, por seguridad, no pueden ser abiertos por personal sin conocimientos de electricidad. Lo mismo pasa con conocimientos mecánicos y de seguridad al abrir máquinas para su limpieza. En estos casos, parte de la rutina de mantenimiento incluye que el personal que la realiza inspeccione los tableros y efectúe la limpieza.

3.2.2. CRITICIDAD

El análisis de criticidad es una metodología que permite establecer la jerarquía o prioridades de instalaciones, sistemas, equipos y dispositivos, de acuerdo a una figura de mérito llamada "Criticidad"; que es proporcional al "Riesgo" creando una estructura que facilita la toma de decisiones y el direccionamiento del esfuerzo y los recursos hacia las áreas, de acuerdo con su impacto en el negocio. [29]

El análisis de criticidad es una técnica de fácil manejo y comprensión en el cual se establecen rangos relativos para representar las probabilidades y/o frecuencias de ocurrencia de eventos y sus consecuencias. La Criticidad se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$CRITICIDAD = Frecuencia de fallo \times Impacto \quad (3.2.2.1)$$

La cual es proporcional a la siguiente ecuación:

$$RIESGO = Probabilidad \times Consecuencia \quad (3.2.2.2)$$

Se toma el método general para evaluación de riesgos, que calcula el riesgo utilizando cuadros de doble entrada que permiten establecer el nivel de riesgo a partir de estimaciones cualitativas tanto de la gravedad como de la probabilidad de ocurrencia. [26]

Los niveles de probabilidad de ocurrencia se clasifican en la Figura 3.2.2.1.

Probabilidad de ocurrencia		
Nivel	Frecuencia	Descripción
1	Remoto	1 al año o menos
2	Improbable	Hasta 2 al año
3	Posible	Hasta 4 al año
4	Frecuente	Diaria / Mensual

Figura 3.2.2.1 Criterios de probabilidad de ocurrencia del análisis de criticidad.

En la clasificación del impacto se selecciona por distintos criterios según aplique a cada caso. Si el daño en caso de ocurrir una falla es a personas o es de pérdida de producción se utilizará el que más impacto genere. Eso no significa que se olvide de la peligrosidad que represente un equipo a los otros criterios, sólo querrá decir que se le asignarán mayores recursos y mayor atención a ese equipo en general. Los criterios se encuentran graficados en la Figura 3.2.2.2.

Impacto				
Nivel	Personas	Producción	Mercado	Activos
1	Leve	Parada de minutos	Pérdida recuperable sin atraso	Daños a repuestos
2	Incapacidad temporal	Parada de horas	Pérdida recuperable con atraso	Daños parciales. Sustitución compleja
3	Incapacidad permanente	Parada de días	Pérdida parcial	Pérdida total de equipo
4	Muerte / Invalidez	Parada de semanas	Pérdida irrecuperable	Pérdida total de instalaciones

Figura 3.2.2.2 Criterios de impacto de falla del análisis de criticidad.

La matriz final de selección de criticidad es la de la Figura 3.2.2.3.

		Impacto			
		1	2	3	4
Probabilidad de ocurrencia	1	1	2	3	4
	2	2	2	3	4
	3	3	3	4	5
	4	4	4	5	5
	5	5	5	5	5

Figura 3.2.2.3 Matriz de selección de criticidad del análisis de criticidad de activos.

En el cuadro se delimitan zonas del 1 al 5 donde cada una representa un nivel de criticidad. Los activos dentro del nivel 5 serán los más críticos mientras que los de criticidad 1 los más triviales.

3.2.3. LISTA DE ACTIVOS PARA MANTENIMIENTO

Ya establecida la codificación, el orden y la criticidad se procede a establecer la lista completa de activos para el mantenimiento. Tanto la codificación como el orden permiten que la lista se extienda a todos los equipos más allá de que se les realice mantenimiento o no.

Respecto al contenido, en esta instancia se incluyen los datos básicos de los equipos. La lista se deja abierta y a medida que avance el análisis se irá agregando procedimientos, esquemas, fotografías y datos formando así la lista completa de activos.

Para los casos de las instalaciones eléctricas, no se indican los mismos datos que a los equipos ya se las considera un equipo para fines de la gestión de activos y representa todas las canalizaciones, cajas de pase y pequeños tableros del sector.

A) Sector de entrada de material.

1- Etapa Inicial

- **A1S/1:** Sierra sin fin 1. Equipo antiguo sin manuales ni marcas de fabricante. Forma parte de la producción de carpintería tradicional, puertas placa y melamina. Tensión: 3x380V. Motor: 5,5 kW, 1440 RPM

Criticidad: Probabilidad de ocurrencia remota (1). Impacto sobre personas que produzca incapacidad temporal (2). Criticidad total 2.



Figura 3.2.3.1 A1S/1: Sierra sin fin de 5,5kW de potencia.

- **A1S/2:** Sierra sin fin 2. Marca Maschinenbau Scholz. Forma parte de la producción de carpintería tradicional, puertas placa y melamina. Tensión: 3x380V. Motor: 3 kW, 1440 RPM
Críticidad: Probabilidad de ocurrencia remota (1). Impacto sobre personas que produzca incapacidad temporal (2). Críticidad total 2.



Figura 3.2.3.2 A1S/2: Sierra sin fin de 3kW de potencia marca Maschinenbau Scholz.

- **A1G/1:** Garlopa 1. Marca Maschinen-Werke Gubisch. Forma parte de la producción de carpintería tradicional, puertas placa y melamina. Tensión: 3x380V. Motor: 4,1 kW, 2850 RPM.

Criticidad: Probabilidad de ocurrencia remota (1). Impacto sobre repuestos (1). Criticidad total 1.



Figura 3.2.3.3 A1G/1: Garlopa de 4kW de potencia marca Maschinen-Werke Gubisch.

- **A1G/2:** Garlopa 2. Equipo antiguo sin manuales ni marcas de fabricante. Forma parte de la producción de carpintería tradicional, puertas placa y melamina. Tensión: 3x380V. Motor: 4,1 kW, 2850 RPM.

Criticidad: Probabilidad de ocurrencia remota (1). Impacto sobre repuestos (1). Criticidad total 1.



Figura 3.2.3.4 A1G/2: Garlopa de 4kW de potencia.

- **A1IE:** Instalación eléctrica del sector A1. Bandeja portacables perforada de 100 mm. Bajada directa a equipos.

Criticidad: Probabilidad remota (1). Parada de minutos (1). Criticidad total 1.

2- Etapa de aproximación a medida

- **A2C/1:** Cepilladora 1. Equipo antiguo sin manuales ni marcas de fabricante. Forma parte de la producción de carpintería tradicional. Tensión: 3x380V. Motor: 0,22 kW, 2800 RPM.

Criticidad: Probabilidad de ocurrencia remota (1). Pérdida recuperable con retraso (2)

Criticidad total 2.



Figura 3.2.3.5 A2C/1: Cepilladora de 0,22kW de potencia.

- **A2C/2:** Cepilladora 2. Marca y modelo SCM S63 L'invincible. Forma parte de la producción de carpintería tradicional. Tensión: 3x380V. Motor: 0,37kW, 2850 RPM
Críticidad: Probabilidad de ocurrencia remota (1). Pérdida recuperable con retraso (2)
Críticidad total 2.



Figura 3.2.3.6 A2C/2: Cepilladora de 0,37kW de potencia marca L'Invincible.

- **A2E:** Escuadradora SAC Klass 35. Marca Höchsmann. Manuales y prospectos en https://wtp.hoechsmann.com/es/lexikon/20771/klass_35. Trabaja en conjunto con un equipo de succión. Forma parte de la producción de carpintería tradicional, puertas placa y melamina. Tensión: 3x380V. Motor de corte: 750 W 2850 RPM. Motor de potencia: 4 kW, 1440 RPM. Motor de extracción: 750 W, 2850 RPM.

Criticidad: Probabilidad de ocurrencia frecuente (4). Parada de horas (2). Criticidad total 4.



Figura 3.2.3.7 A2E: Escuadradora SAC Klass 35 de 4,75kW de potencia marca Höchsmann.

- **A2B:** Barreno. Marca E.Kiessling&Co. Forma parte de la producción de carpintería tradicional. Tensión 3x380V. Motor: 1,5 kW, 2860 RPM.

Criticidad: Probabilidad remota (1), pérdida recuperable con retraso (2). Criticidad total 2.

- **A2IE:** Instalación eléctrica del sector A2. Bandejas portacables perforadas de 100mm. Bajadas directas a equipos. Una caja de tomas.

Criticidad: Probabilidad remota (1), parada de minutos (1). Criticidad total 1.

- **AC: Compresor.** Fabricante Metalúrgica Modenesi. Suministra aire comprimido a toda la planta. Tensión 3x380V. Motor: 2,23 kW, 1450 RPM.

Criticidad: Probabilidad improbable (2), parada de días (3). Criticidad total 3.



Figura 3.2.3.8 AC: Compresor de 2,2kW de potencia marca Metalúrgica Modenesi.

- **AE:** Extracción general. Ductos desde las máquinas hasta dos motores eléctricos que impulsan el aire hacia el exterior. Motor 1: 4 kW, 1440 RPM. Motor 2: 4kW, 1440 RPM.

Criticidad: Probabilidad remota (1), parada de horas (2). Criticidad total 2.



Figura 3.2.3.9 AE/1: Motor 1 del sistema de extracción general de 4kW de potencia.



Figura 3.2.3.10 AE/2: Motor 2 del sistema de extracción general de 4kW de potencia.

B) Sector de carpintería tradicional

1- Etapa de mecanizado

- **B1T/1:** Tupí 1. Maschinen-Werke Gubisch. Forma parte de la producción de carpintería tradicional. Mecanismo de avance adicionado en modificación hecha por la empresa. Tensión: 3x380V. Motor corte: 2,98 kW, 2790 RPM. Motor avance: 0,55 kW, 1440 RPM.

Criticidad: Probabilidad de ocurrencia remota (1). Pérdida recuperable con retraso (2).
Criticidad total 2.



Figura 3.2.3.11 B1T/1: Tupí de 3,5kW de potencia marca Maschinen-Werke Gubisch.

- **B1T/2:** Tupí 2. Marca Formula T1 MiniMax. Forma parte de la producción de carpintería tradicional. Mecanismo de avance adicionado en modificación hecha por la empresa. Tensión: 3x380V. Motor corte: 2,98 kW, 2790 RPM. Motor avance: 0,55 kW, 1440 RPM.

Criticidad: Probabilidad de ocurrencia remota (1). Pérdida recuperable con retraso (2).
Criticidad total 2.



Figura 3.2.3.12 B1T/2: Tupí de 3,5kW de potencia marca Fórmula T1 MiniMax.

- B1F: Fresadora CNC CENTAURO ALFA. Distribuida por M. Caseros. Página oficial: <https://www.mcaseros.com/productos/fresadora-copiadora/fresadoras-cnc-para-puertas-y-ventanas/a-cnc-centauro-alfa/>. Manual físico en planta. Forma parte de la producción de carpintería tradicional. Tensión: 3x380V.

Criticidad: Probabilidad de ocurrencia posible (3). Parada de días (3). Criticidad total 4.



Figura 3.2.3.13 B1F: Fresadora CNC ALFA CENTAURO.

- B1TB: Taladro de banco. No se cuenta con manuales. Forma parte de la producción de carpintería tradicional. Tensión: 3x380V. Motor 1,5 kW, 2850 RPM.

Criticidad: Probabilidad de ocurrencia improbable (2). Impacto sobre repuestos (1). Criticidad total 2.



Figura 3.2.3.14 B1TB: Taladro de banco de 1,5kW de potencia.

- B1E/1: Escopladora 1. Equipo antiguo sin manuales ni marcas de fabricante. Tensión: 3x380V. Motor: 2,98 kW, 2980 RPM.

Criticidad: Probabilidad remota (1). Daños a repuestos (1). Criticidad total 1.



Figura 3.2.3.15 B1E/1: Escopladora de 3kW de potencia.

- B1E/2: Escopladora 2. Equipo antiguo sin manuales ni marcas de fabricante. Tensión: 3x380V. Motor: 2,98 kW, 2980 RPM.

Criticidad: Probabilidad remota (1). Daños a repuestos (1). Criticidad total 1.



Figura 3.2.3.16 B1E/2: Escopladora de 3kW de potencia.

- B1IE: Instalación eléctrica de la etapa B1. Bandejas portacable perforadas de 100mm. Bajadas directas a equipos. Una caja de tomas monofásicos y trifásicos.

Criticidad: Probabilidad de ocurrencia remota (1). Parada de minutos (1). Criticidad total 1.

2- Etapa de terminación

- B2C: Lijadora de contacto. Marca Farven. Forma parte de la producción de carpintería tradicional. Tensión 3x380V. Motor cinta: 0,75 kW, 2800 RPM. Motor potencia: 4,47 kW, 1440 RPM.

Criticidad: Probabilidad de ocurrencia remota (1). Parada de horas (2). Criticidad total 2.



Figura 3.2.3.17 B2C: Lijadora de contacto de 5,3kW de potencia marca Farven.

- B2B/1: Lijadora de banda 1. Distribuidor Caseros S.A.. Forma parte de la producción de carpintería tradicional. Tensión: 3x380V. Motor: 4 kW, 1440 RPM.

Criticidad: Probabilidad de ocurrencia improbable (2). Impacto sobre repuestos (1). Criticidad total 2.



Figura 3.2.3.18 B2B/1: Lijadora de banda de 4kW de potencia.

- B2B/2: Lijadora de banda 2. Distribuidor Caseros S.A.. Forma parte de la producción de carpintería tradicional. Tensión: 3x380V. Motor: 4 kW, 1440 RPM.

Criticidad: Probabilidad de ocurrencia improbable (2). Impacto sobre repuestos (1). Criticidad total 2.



Figura 3.2.3.19 B2B/2: Lijadora de banda de 4kW de potencia.

- B2P: Prensa hidráulica en caliente Marzica. Distribuidor Caseros S.A. Modelo discontinuado pero similar al PL30. Página oficial:

<https://www.mcaseros.com/productos/prensa/enchapado-en-caliente/hidraulica-marzica-pl-30/>. Forma parte de la producción de carpintería tradicional, de puertas placa y de melamina. Tensión: 3x380V. Motor: 3kW, 1420RPM

Criticidad: Probabilidad de ocurrencia posible (3). Parada de días (3). Criticidad total 4.



Figura 3.2.3.20 Prensa hidráulica en caliente marca Marzica. Al 2023 la más grande de la ciudad de Mar del Plata.

- B2IE. Instalación eléctrica de la etapa B2. Alimenta a los equipos del sector B2. Bandejas portacable perforadas de 100mm. Bajadas directas a equipos. Una caja de tomas trifásicos y monofásicos.

Criticidad: Probabilidad de ocurrencia remota (1). Parada de minutos (1). Criticidad total 1.

- B2TP: Tablero principal. Alimenta toda la iluminación de planta y la potencia de los tableros secundarios de planta.

Criticidad: Probabilidad de ocurrencia remota (1). Pérdida total de instalaciones (4). Criticidad total 4.



Figura 3.2.3.21 B2TP: Tablero principal. Controla la iluminación del galpón y la distribución.

C) Sector de melamina

1- Puertas placa

- C1P: Pegadora de cantos de puertas placa. Equipo de origen italiano. Tablero de control de temperatura modificado. Forma parte de la producción de puertas placa. Tensión: 3x380V Motor potencia: 1,5 kW, 2850 RPM. Motor aspiración: 2,98 kW, 1440 RPM.

Criticidad: Probabilidad de ocurrencia posible (3). Parada de días (3). Criticidad total 4.



Figura 3.2.3.22 C1P: Pegadora de cantos de puertas placa de 1,5kW de potencia.

- C1R Refiladora de esquinas. Equipo de origen chino. Manual en planta. Forma parte de la producción de puertas placa. Tensión: 3x380V

Criticidad: Probabilidad de ocurrencia remota (1). Daño a repuestos pero de difícil recuperación (2). Criticidad total (2).

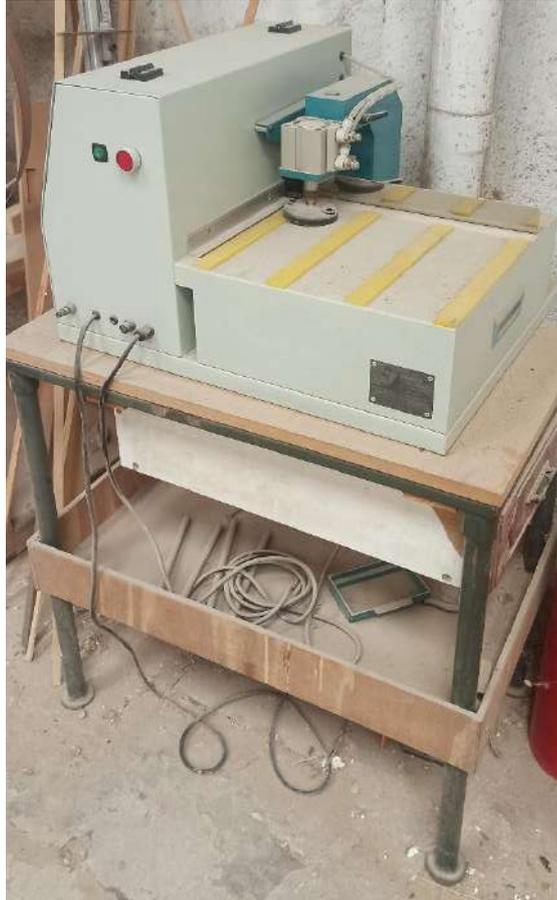


Figura 3.2.3.23 C1R: Refiladora de esquinas.

2- Melamina

- C2A: Agujereadora múltiple SYSTEM 23. Marca Maggi. Distribuidor Bricopa. Página oficial: <https://www.bricopa.com/es/taladros-multiples-maquinaria-madera-nueva/taladro-multiple-system-23-maggi.html>. Manual en planta. Forma parte de la producción de melamina. Tensión: 3x380V Motor: 1,5kW, 1450RPM.

Criticidad: Probabilidad improbable (2). Parada de horas (2). Criticidad total 3.



Figura 3.2.3.24 C2A: Agujereadora múltiple SYSTEM 23 de 1,5kW de potencia marca Maggi.

- C2P: Pegadora de Cantos OAV PEGASUS MAX 340M para melamina. Marca OAV. Distribuidor Caseros S.A. Página oficial <https://www.mcaseros.com/productos/pegadora-de-cantos/compacta/pegadora-de-cantos-oav-pegasus-max-340m/>. Manual en planta. Forma parte de la producción de melamina. Tensión: 3x380V. Motor 1: 1 HP, 1440 RPM. Motor 2: 1/6 HP, 2800 RPM. Motor 3: 1/6 HP, 2800 RPM.

Criticidad: Probabilidad improbable (2). Parada de horas (2). Criticidad total 3.



Figura 3.2.3.25 C2P: Pegadora de cantos OAV PEGASUS MAX 340M de 1kW de potencia.

3- Cabina de pintura

- C3C: Compresor. Forma parte de la producción de carpintería tradicional, puertas placa y melamina. Tensión 3x380V. Motor: 1,1 kW, 2850 RPM.

Criticidad: Probabilidad posible (3). Parada de horas (2). Criticidad total 3.



Figura 3.2.3.26 C3C: Compresor de cabina de pintura de 1,1kW de potencia.

- C3P: Cabina de pintura. Forma parte de la producción de melamina, puertas placa y carpintería tradicional.

Criticidad: Probabilidad remota (1). Parada de horas (2). Criticidad total 2.



Figura 3.2.3.27 C3P: Cabina de pintura.

- CIE: Instalación eléctrica sector C. Alimenta el sector de la cabina de pintura y todo el galpón de melamina C. Tablero junto al compresor. Bandejas portacable perforadas de 100mm.

Criticidad: Probabilidad posible (3). Parada de días (3). Criticidad total 4.



Figura 3.2.3.28 CIE: Tablero del compresor de la cabina de pintura y alimentación del sector C.

Resumen

Se recopilan todos los equipos con sus códigos y criticidad en la Figura 3.2.3.29.

Sector entrada de material (A)					
Nombre	Código	Criticidad	Nombre	Código	Criticidad
Compresor planta	AC	3	Extracción general	AE	2
Etapa inicial (1)			Etapa de aproximación a medida (2)		
Sierra sinfín 1	A1S/1	2	Cepilladora 1	A2C/1	2
Sierra sinfín 2	A1S/2	2	Cepilladora 2	A2C/2	2
Garlopa 1	A1G/1	1	Escuadradora	A2E	4
Garlopa 2	A1G/2	1	Barreno	A2B	2
Instalación eléctrica A1	A1IE	1	Instalación eléctrica A2	A2IE	1
Sector carpintería tradicional (B)					
Nombre	Código	Criticidad	Nombre	Código	Criticidad
Etapa de mecanizado (1)			Etapa de terminación(2)		
Tupí 1	B1T/1	2	Lijadora de contacto	B2C	2
Tupí 2	B1T/2	2	Lijadora de banda 1	B2B/1	2
Fresadora CNC	B1F	4	Lijadora de banda 2	B2B/2	2
Taladro de banco	B1TB	2	Prensa hidráulica	B2P	4
Escopladora 1	B1E/1	1	Instalación eléctrica B2	B2IE	1
Escopladora 2	B1E/2	1	Tablero principal	B2TP	4
Instalación eléctrica B1	B1IE	1			
Sector melamina (C)					
Nombre	Código	Criticidad	Nombre	Código	Criticidad
Puertas placa (1)			Instalación eléctrica C	CIE	4
Pegadora de cantos	C1P	4	Melamina (2)		
Refiladora de esquinas	C1R	2	Agujereadora múltiple	C2A	3
Cabina de pintura (3)			Pegadora de cantos	C2P	3
Compresor	C3C	3			
Cabina de pintura	C3P	2			

Figura 3.2.3.29 Tabla resumen de la lista completa de activos.

3.3. PLAN DE MANTENIMIENTO

Dentro del mantenimiento se realiza la distinción entre planificación y programación. La planificación especifica la tarea a realizar, detalla la manera en la que se realiza dicha tarea y explica los motivos por los que se realiza. Por otro lado, la programación se encarga de decir el momento específico en que se realiza y las personas o empresas involucradas en su realización. En resumen, la planificación indica el qué, cómo y por qué de una tarea mientras que la programación el cuándo y quién de la misma.

Como este es un caso de estudio no se realizará la programación por varios motivos. El primero es que, si bien es un caso real, no es necesario que se lleven a cabo todos los procedimientos analizados en este proyecto. El segundo es que no se conoce la disponibilidad de la empresa, ni sus tiempos para realizar las tareas de mantenimiento o el cronograma de producción, menos aún si se tiene en cuenta la posibilidad de tercerizar un servicio externo para hacerlas.

Lo que sí se recomienda respecto a la programación de los mantenimientos predictivos es que se basen en la criticidad. Equipos de criticidad 1 o 2 tales como las garlopas o los cepillos no requieren una inspección tan seguida como la escuadradora o las pegadoras de cantos que tienen criticidad 4.

3.3.1. MANTENIMIENTO ELÉCTRICO

Actualmente en la planta se realizan chequeos predictivos intuitivos. Esto significa que la revisión de instalaciones y equipos es sólo escuchando si existe algún ruido inusual para luego tomar acciones correctivas. De esta manera no se reconocen las causas ni el equipo particular que está teniendo problemas por lo que no es eficaz como mantenimiento predictivo. Además, por la falta de personal calificado para trabajo eléctrico, los correctivos toman un tiempo prolongado en ser realizados.

Para las instalaciones eléctricas se plantea un mantenimiento predictivo en base a rutinas de inspección, de limpieza y de termografía infrarroja. Se considera dentro de las instalaciones al tablero principal, a los tableros seccionales, a los tableros internos de los activos y a los circuitos seccionales y terminales. Se integran todos los tableros y circuitos dentro de un mismo grupo ya que al tratarse de rutinas de inspección se planea un recorrido eficiente donde se inspeccionen todos los equipos en un mismo día.

La rutina se divide en dos partes, la primera de inspección y limpieza y la segunda de termografía infrarroja.

3.3.1.1. RUTINA DE INSPECCIÓN Y LIMPIEZA

La tarea consiste en una inspección visual mientras se limpia el aserrín de los componentes en caso de tableros y de las bandejas en caso de los circuitos seccionales y terminales.

El procedimiento, como se trata de una tarea con riesgo de electrocución, se atiene a las "reglas de oro de seguridad eléctrica". Siendo estas: Corte efectivo de la energía, bloqueo y señalización, verificación, puesta a tierra y cortocircuito y la última es señalización. El corte efectivo se realiza con los dispositivos de maniobra aguas arriba del tablero o bandeja a limpiar. Para evitar la realimentación se utilizan los dispositivos de bloqueo, cuyos modelos comerciales permiten colocar candados y tarjetas de identificación. La función de este paso es importante en caso que otra persona intente realimentar el circuito desconociendo que hay

alguien trabajando aguas abajo. La verificación se realiza midiendo con un voltímetro la ausencia de tensión en el tablero. La puesta a tierra consiste en cortocircuitar las fases del tablero y conectarlas a tierra, existen dispositivos para esta tarea o puede realizarse manualmente con conductores. La quinta regla indica que debe delimitarse el sector donde se va a estar realizando la tarea.

Finalizada la aplicación de las reglas de oro de seguridad se procede a la limpieza del tablero primero con un aspirado del aserrín, seguido de un cepillado para barrer los restos de rincones o un soplado con aire dependiendo el equipo. Ya eliminado el aserrín se procede a la limpieza con limpia contactos en aerosol los casos de tableros con elementos engrasados o electrónicos sensibles tales como PLC o variadores de frecuencia.

Durante la limpieza se debe inspeccionar los elementos, particularmente los bornes y conexiones. Se debe buscar que no haya bornes o cables sueltos. Por otra parte, con la observación del tablero se pueden detectar rastros de quemaduras o componentes dañados.

Para realimentar el tablero se debe quitar los dispositivos de puesta a tierra, los bloqueadores y, cuando sea seguro, realimentar el circuito. Por último se quita la delimitación del espacio y cuando sea necesario se prueba el equipo.

En la Figura 3.3.1.1 se haya un ejemplo de la suciedad que se acumula en los equipos.



Figura 3.3.1.1 Tablero de escuadradora con el aserrín acumulado de una semana sin limpieza.

En el caso de los circuitos por bandeja, luego de la desenergización, se procede a aspirar, cepillar y soplar la suciedad de la bandeja. Para subir hasta la bandeja se utiliza el medio de elevación más seguro con el que se cuente para acceder a todos los lugares. Igualmente que en los tableros, mientras se limpia se realiza la inspección de los componentes, en este caso serán conductores y cables. La falla que se busca en este caso es un cable con la capa aislante lastimada o cortada.

3.3.1.2. RUTINA DE TERMOGRAFÍA INFRARROJA

La rutina consiste en un recorrido por planta tomando termografías de todos los motores y tableros eléctricos, tanto seccionales como de los equipos, para su análisis y detección temprana de posibles fallas. Cabe destacar que la medición por termografía infrarroja se realiza con los equipos en funcionamiento por lo cual se deben tener las precauciones correspondientes a la manipulación de puertas y tapas de tableros con tensión. Asimismo con las precauciones sobre las situaciones peligrosas en las que el operario se exponga al acercarse a máquinas en funcionamiento.

El equipo a utilizar debe ser uno similar a una cámara Fluke TiS20+ dado que posee un costo reducido y unas capacidades acordes a la necesidad de esta pequeña planta. Esa marca comercial provee el software junto con los equipos por lo que facilita los informes y el análisis. Otras marcas que proveen productos similares son Testo, Flir o Cem, todas cuentan con equipos de la misma gama que la mencionada y software propio.

Antes de especificar el procedimiento se establecen los criterios de evaluación. Se toman como referencia los manuales de fabricantes, conocimientos adquiridos durante la carrera de Ingeniería Electromecánica y la experiencia personal trabajando con termografía en plantas reales.

- Conductores y cables

El primer componente que se analiza son los conductores y cables. Según el material que se utilice serán los límites de temperatura en el conductor. Para el caso de policloruro de vinilo (PVC) que es el único utilizado en toda la planta es de 70°C [30]. Si la temperatura en cualquier parte del conductor de PVC alcanza esa temperatura se tomará como alarma y requerirá intervención inmediata. La temperatura de alarma temprana por alta temperatura será entre los 60°C y los 70°C donde se programará una revisión del tablero.

Respecto al tipo de problema que pueda tener un conductor, el punto caliente donde se alcance la temperatura crítica ayuda a caracterizar el problema. Si el punto caliente del conductor se encuentra en un borne, empalme o conexión y se va enfriando a lo largo del conductor significa que el problema es un falso contacto en dicho punto. Puede deberse a diversos factores, entre los más comunes se encuentran: un terminal mal colocado o incorrecto para el tipo de borne, un empalme mal realizado, un borne flojo o una conexión guinalda no permitida.

Una vez detectado un problema de este estilo se planifica un mantenimiento correctivo. Para todos los casos correctivos se trabaja con las 5 reglas de oro que ya se explicaron y luego es relativamente simple: si hay un empalme mal realizado se rehace, si un borne está flojo se ajusta, los terminales colocados de manera incorrecta se quitan y se coloca uno nuevo.

En la Figura 3.3.1.2 un ejemplo de un punto caliente en un borne.

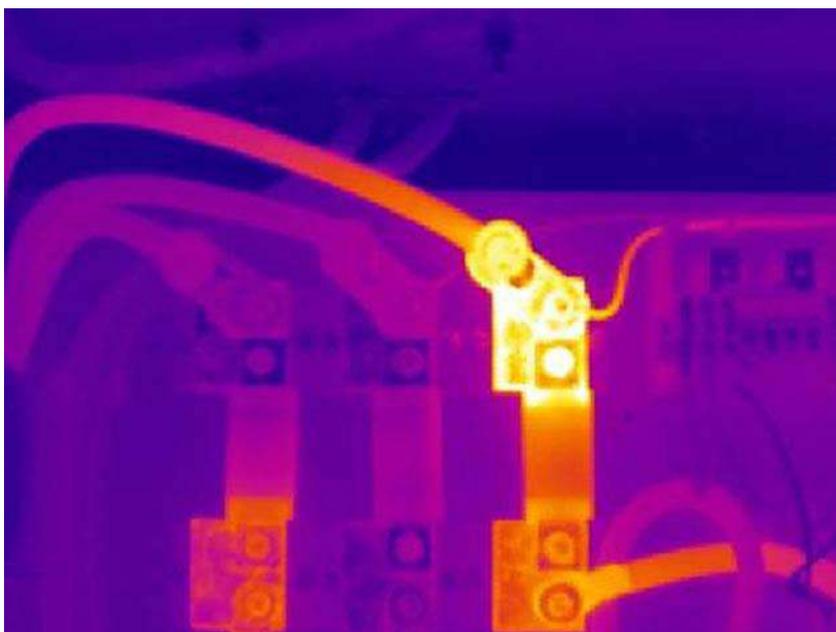


Figura 3.3.1.2 Ejemplo de punto caliente en borne sin correcto ajuste. Se observa como la temperatura decrece a medida que se aleja del punto caliente. [31]

Otros problemas detectables por la temperatura en cables están relacionados al consumo. Una carga desbalanceada se observará como una diferencia notable de temperatura entre los conductores de las distintas fases. El criterio que se toma en cuenta es que se toleran 10°C de diferencia máxima entre fases para dar la alarma y proceder a planificar un correctivo sobre la fuente del consumo.

El otro problema de consumo en conductores es la sobrecarga. Este fenómeno está directamente relacionado con la temperatura máxima de 70°C que indica el fabricante. La forma de caracterizar a una sobrecarga en una imagen termográfica es cuando el conductor en toda su extensión presenta la misma temperatura alta. En estos casos se acompañan las imágenes termográficas con mediciones de corriente.

Los mantenimientos correctivos en estos casos ya incurren en trabajar sobre la fuente del sobreconsumo o del desbalanceo. Corresponde un análisis particular, mediciones específicas una planificación acorde a la fuente.

En la Figura 3.3.1.3 un ejemplo de un consumo desbalanceado.

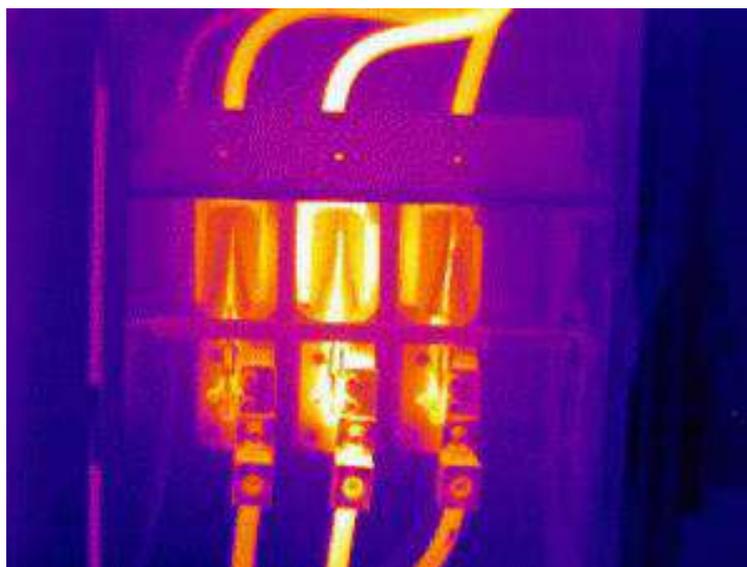


Figura 3.3.1.3 Ejemplo de consumo desbalanceado con posibilidad de una sobrecarga en el conductor central. El punto caliente en este caso es uniforme a lo largo de todo el conductor y continúa a través de elementos. [32]

- Equipos electrónicos

Los equipos electrónicos presentes en la planta son variadores de frecuencia y controladores lógicos programables (PLC). Los criterios térmicos de estos equipos se guían por los manuales técnicos de los fabricantes ya que la temperatura depende de la ventilación y disipación interna con la que cuente el equipo.

Por lo general, los manuales indican la temperatura ambiente a la que debe trabajar el equipo y no la temperatura interna que soporta (ver Figura 3.3.1.4). Usualmente la temperatura ambiente máxima es de 50°C y dependiendo de la ventilación forzada puede soportar hasta los 70°C como temperatura crítica. Como criterio general se toma que el parámetro a tener en cuenta para proteger a los equipos electrónicos no es la temperatura de los mismos sino la temperatura ambiente del tablero y la alarma para planificar un mantenimiento correctivo en los 45°C.

Como criterio secundario se tomará la temperatura del componente en análisis comparándola con la de mediciones anteriores. La alarma para planificar un mantenimiento correctivo estará cuando la temperatura aumente 10°C respecto a mediciones anteriores en condiciones similares de funcionamiento. Por condiciones similares de funcionamiento se tiene en cuenta el consumo, la temperatura ambiente y la tarea para la que se esté usando el equipo.

Las tareas correctivas en casos de temperatura ambiente elevada tienen como meta bajar dicha temperatura. Puede ser de muchas maneras, con forzadores, separando los equipos que más temperatura generan, dividiendo los componentes en otros tableros para reducir la ocupación, etc. Cada caso debe planificarse a conciencia de la situación particular de cada tablero.

Montaje vertical

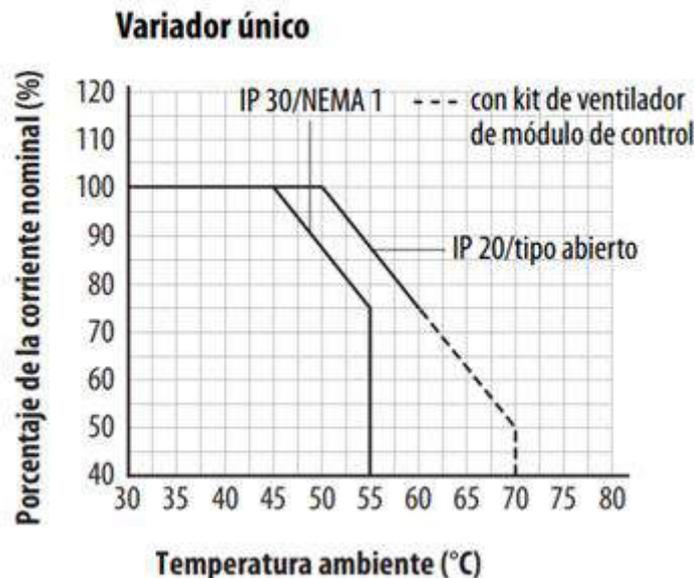


Figura 3.3.1.4 Curva para determinar sobredimensionamiento en variadores PowerFlex 525 en aplicaciones con altas temperaturas. [33]

- Dispositivos de maniobra y protección

Para los distintos dispositivos de maniobra y protección se estudian diferentes parámetros. Cabe mencionar que desde el punto de vista de la termografía la diferencia entre estos dispositivos es la presencia de bobinados, componente que genera mayor temperatura interna.

El primer parámetro a tener en cuenta, tomado individualmente para cada dispositivo, es la diferencia de temperatura de los conductores a la entrada a y la salida del mismo. Se toma como diferencia de temperatura máxima a 10°C. Debe tenerse en cuenta los cambios de sección o las derivaciones que puedan encontrarse en bornes del dispositivo. La diferencia de temperatura se toma para misma sección de cable ya que evidencia un problema en el elemento.

Como segundo parámetro, ligado al anterior. Se toma como diferencia de temperatura máxima entre fases a 10°C. Los bornes de los dispositivos de maniobra y protección no siempre se desgastan al mismo ritmo y uno de los problemas que pueden detectarse por termografía es que un borne posee mayor temperatura que el resto. Ya se mencionó el problema del ajuste de bornes, si habiendo corregido y ajustado el borne continúa con temperatura el problema puede deberse al desgaste de bornes.

El tercer parámetro es la temperatura interna. Los fabricantes recomiendan distancias mínimas entre los elementos en un tablero para garantizar la correcta disipación de temperatura. Si hay mucho agrupamiento de elementos juntos los equipos expondrán temperaturas superiores a las recomendadas. Al igual que con los equipos electrónicos, los manuales indican generalmente una temperatura ambiente máxima de trabajo de 50°C. La temperatura interna máxima de los dispositivos de protección no se recomienda que supere los 70°C y si posee bobinados internos 80°C. A esas temperaturas se programa un mantenimiento correctivo donde, según el caso, se pueden separar los elementos o agregar ventilación forzada al tablero.

- Transformadores

Los transformadores tienen muchas fuentes de calor tanto en su núcleo por corrientes parásitas como en los bobinados por efecto Joule. En este caso el limitante térmico se encuentra en los materiales aislantes que posea y en los bornes. El fabricante debe indicar el tipo de aislante utilizado y ese será el límite de temperatura del transformador (ver figura 3.3.1.5).

Tipo de aislante	Temperatura máxima
Clase Y	90°C
Clase A	105°C
Clase E	120°C
Clase B	130°C
Clase F	155°C
Clase H	180°C

Figura 3.3.1.5 Tabla de aislantes eléctricos y sus temperaturas máximas admisibles correspondientes. [34]

Para los bornes se toma la temperatura admisible por el aislante del cable debido a que está en contacto con el mismo y soporta menor temperatura.

- Motores eléctricos

El criterio de evaluación termográfico de los motores eléctricos es similar al de los transformadores. Se toma la temperatura de la carcasa y se tiene en cuenta que en el interior la temperatura es entre 20 y 40°C mayor. El límite de temperatura está determinado por el tipo de aislante eléctrico cuyos valores máximos tolerables son los de la Figura 3.3.1.5. De sobrepasarse dicho límite el aislante pierde sus propiedades y comienza a cortocircuitarse el bobinado. Generalmente los motores poseen aislantes de clase F o H. Dado el margen de error de 20°C sólo en la identificación de la temperatura interna y teniendo en cuenta que la suciedad se asienta de manera irregular en cada motor, se evalúan los niveles críticos de temperatura de los motores por comparación. Tanto entre mismas mediciones de períodos anteriores como con los otros motores de la rutina de inspección. De esta manera se evalúa teniendo en cuenta la temperatura ambiente (verano/invierno), la incertidumbre de la temperatura exacta, y la evolución del sobrecalentamiento de los activos.

- Reporte

El informe de la rutina de termografía debe incluir el código del activo, la fecha de la realización, nombre del operario que realizó las mediciones, las imágenes con su escala de temperaturas, la emisividad utilizada para toma, las mediciones opcionales de tensión o corriente, observaciones varias y las conclusiones sobre el estado del equipo.

El formato no es materia de este proyecto ya que no se conoce el modelo y marca del equipo de medición. Según la cámara y el programa de análisis que se utilice cambian los formatos de los reportes.

3.3.1.3. ANÁLISIS DE ACTIVOS PARA TERMOGRAFÍA

Todos los activos de planta poseen motores eléctricos y una conexión eléctrica a la que se puede hacer un mantenimiento predictivo por termografía infrarroja. Si se realiza la medición para todos los equipos o con qué frecuencia depende del estudio de criticidad y de los recursos disponibles para dedicar en este mantenimiento.

A continuación, se explican los procedimientos para la toma de mediciones de termografía. Se destaca que muchos equipos repiten el procedimiento por lo que se expondrá un caso general y los códigos de los activos a los que aplica. En todos los casos el activo debe encontrarse en funcionamiento.

Todos los procedimientos, imágenes e información sobre cada equipo que se adicionan en esta sección formarán parte de la lista completa de activos.

- Motores eléctricos expuestos.

Para la medición en motores eléctricos expuestos se deben realizar desde la mayor cantidad de ángulos posible (siendo 3 tomas una cantidad adecuada) y repetir la misma toma en todas las mediciones periódicas. La emisividad de la superficie se tomará 0,9 que es la de la pintura epoxi utilizada generalmente en motores. En caso de no estar pintado y ser de aluminio o de fundición se tomará 0,5 que es un valor intermedio para ambas. [35]

Activos con motores eléctricos expuestos: A1S/1; A1S/2; A1G/1; A1G/2; A2C/1; A2C/2; A2B; AC; AE; B1T/1; B1T/2; B1TB; B1E1; B1E2; B2B/1; B2B/2.

- Tableros eléctricos de una toma

En distintos puntos de la planta existen cajas de paso o tableros con un solo elemento (generalmente interruptor termomagnético o contactor). Dichos tableros no representan un riesgo para el trabajador ya que suelen no poseer tapa o ser de fácil extracción. En estos casos el procedimiento es retirar la tapa y tomar la medición con una imagen centrada. No es necesario en caso de hallarse un punto caliente realizar una segunda toma con acercamiento ya que por el pequeño tamaño de estos tableros el nivel de detalle de la primera toma es suficiente para el análisis.

Activos con tableros de una sola toma: A1IE; A2IE; B1IE; B2IE; CIE.

- A2E Escuadradora.

La Escuadradora cuenta con un tablero eléctrico en su parte inferior. En dicho tablero se encuentran los fusibles de protección, un transformador con aislación clase B, borneras, contactor y elementos de control detrás del fondo del tablero. En el gabinete central de la parte inferior de la máquina se encuentran los dos motores de 4 y 0,75kW. Por otra parte, al lado de la escuadradora se encuentra el sistema de extracción con un motor expuesto.

Para el procedimiento se comienza indicando que por la cantidad de partículas proyectadas que tiene el equipo y la necesidad de medir en funcionamiento se deben poseer los EPP necesarios para proteger a los trabajadores. Si la proyección de partículas impide la toma clara de imágenes se debe realizar la medición con el equipo encendido, pero sin realizar cortes.

Para el tablero eléctrico se retira la tapa sujeta por tornillos tipo Phillips sin dejarla caer ya que el contactor está afirmado a dicha tapa. Verificar que el aserrín no supere el nivel de los equipos. En tal caso se debe realizar el procedimiento de limpieza antes de realizar la medición. Para el tablero frontal se requiere una sola toma general que incluya todos los elementos. Luego se retira el fondo del tablero sujeta por una varilla roscada y tuerca de 10 mm. La segunda toma se realiza a la parte trasera de los equipos de control. Si se encuentra un punto caliente en un equipo en cualquiera de las dos tomas se realiza una toma extra de un acercamiento al posible problema. Una vez terminadas las tomas se vuelve a colocar el fondo del tablero y la tapa del mismo.

Para el gabinete con los motores se retira la tapa sujeta por tornillos Phillips. Dado el lugar confinado donde se encuentran los motores sólo puede tomarse una imagen a cada uno. Una vez tomadas las termografías se vuelve a colocar la tapa.

Las últimas tomas se realizan al motor expuesto para la extracción según el procedimiento correspondiente.

- AC Compresor general

El procedimiento para la medición es el de motores expuestos ya que el motor del compresor está a la vista. Este compresor tiene su tablero de potencia que incluye sólo un contactor y por el tamaño se aplica el procedimiento de tableros de una sola toma. Figura 3.3.1.6.



Figura 3.3.1.6 Tablero del compresor AC. Tablero de una sola toma.

- B1T2 Tupí 2

De los dos tupíes uno es mucho más antiguo que el otro y no posee tablero de conexiones. El tupí 2 en cambio sí tiene. Es un tablero dentro del gabinete del equipo y se abre con llaves Allen de 4mm. Dicho tablero contiene dos interruptores termomagnéticos unipolares, una llave selectora y dos contactores, uno con relevo térmico acoplado. Al abrir el tablero se puede obtener una imagen termográfica de todos los elementos en una sola toma por lo cual no contiene diferencias con el procedimiento de medición de tableros de una toma. Al finalizar se vuelve a colocar la tapa.

El motor de potencia se encuentra dentro de otra puerta del gabinete y también se abre con llaves Allen de 4mm. El motor se puede observar desde un único ángulo por lo que se le realiza una sola toma. Finalizada la medición se cierra la tapa.

El motor de avance se encuentra fuera del gabinete y se incluyó entre los motores expuestos.

- B1F Fresadora CNC

La fresadora cuenta con un tablero eléctrico en toda la parte inferior del equipo. En dicho tablero se encuentran un variador de frecuencia, tres controladores, un transformador con aislación clase E, dos capacitores, seccionador, interruptores termomagnéticos, contactores, relés, una fuente de corriente continua, borneras y otro pequeño transformador con aislación clase E.

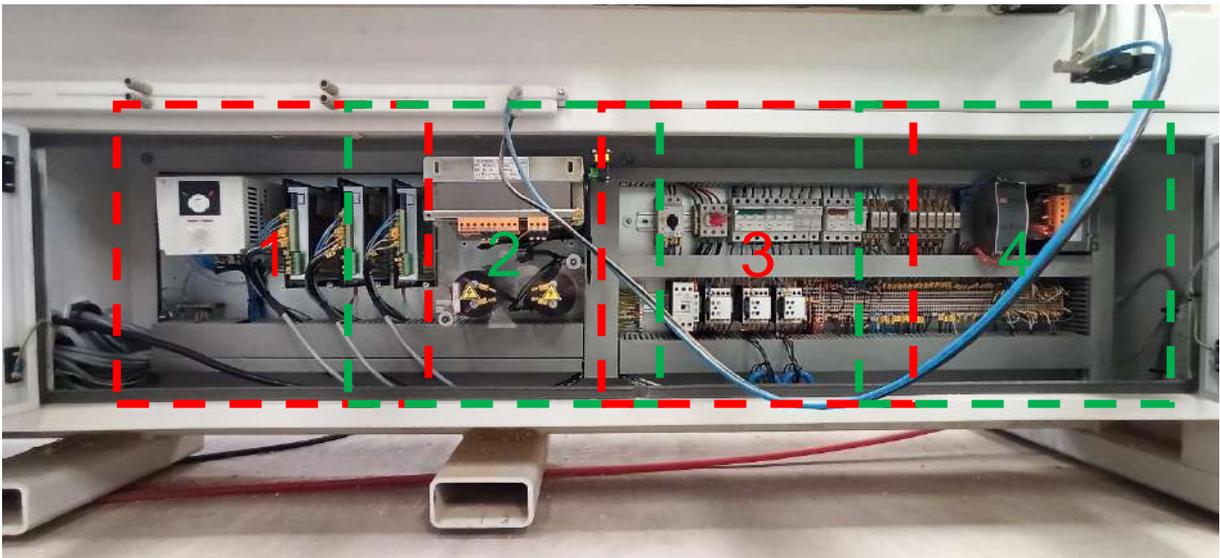


Figura 3.3.1.7 Tablero eléctrico del activo B1F fresadora CNC. En la imagen se delimitan las 4 tomas a realizar en el tablero.

El tablero se abre con una llave universal de gabinetes, posee dos puertas que además de la cerradura cuentan con un alargue del seccionador con llave rotativa de enclavamiento. Dicho dispositivo impide que se abra el tablero si la llave se encuentra cerrada para evitar accidentes. Como se requiere tomar las mediciones con el equipo funcionando se baipasea la llave desacoplando la llave rotativa de la puerta del seccionador y girándolo. El desacople se realiza accionando la pequeña palanca marcada en la Figura 3.3.1.8 con un pequeño destornillador.



Figura 3.3.1.8 Ejemplo de una llave rotativa para puerta similar a la del tablero. Marcada con un círculo verde la palanca para falsear la llave.

Una vez abierto el tablero se retiran los acrílicos de protección de los capacitores ya que impide la medición. Tomar las correctas precauciones ya que existe un riesgo de contacto directo al realizar dicha maniobra.

Las imágenes a tomar del tablero se dividen como indica la Figura 3.3.1.7. En caso de encontrar un punto caliente se debe realizar otra toma con el acercamiento al elemento con el posible problema.

- B2C Lijadora de contacto

La lijadora de contacto posee un gabinete central con la parte motriz del equipo y sobre este el tablero de control.

El gabinete principal posee puertas a ambos lados sujetas con tornillos tipo Allen de 4mm. Se deben tomar precauciones al abrir dicho gabinete por la cercanía de las partes móviles (correas) a la puerta. Si bien el motor a medir se encuentra en un espacio confinado, la existencia de dos aberturas permite tomar imágenes desde dos ángulos diferentes. Una vez realizada la medición se cierra el gabinete nuevamente tomando las precauciones necesarias por las partes móviles. Figura 3.3.1.9.



Figura 3.3.1.9 Gabinete del activo B2C lijadora de contacto. Existe riesgo de atrapamiento por las correas tan cerca de la puerta.

El tablero eléctrico en cambio sólo posee una abertura y un espacio reducido. La tapa del costado se retira sacando los tornillos Allen de 4 mm. Y se toma una única imagen tratando de enfocar a todos los elementos aglomerados. Los elementos son dos pulsadores, dos luces piloto, un amperímetro analógico y dos llaves. Luego se vuelve a colocar la tapa. Figura 3.3.1.10.



Figura 3.3.1.10 Tablero eléctrico del equipo B2C lijadora de contacto. Se observa la aglomeración de equipos que dificulta la identificación de cada elemento.

- B2P Prensa hidráulica

La prensa hidráulica es un equipo con un gabinete donde se accede al motor y un tablero eléctrico.

El gabinete del motor se abre retirando los tornillos Allen de 4mm que sujetan la puerta. Dado el amplio espacio del gabinete se pueden tomar dos imágenes del motor. Una vez finalizada la medición se cierra el gabinete. Figura 3.3.1.11.



Figura 3.3.1.11 Gabinete del motor de la prensa hidráulica B2P. Se cuenta con un amplio espacio para realizar las mediciones.

El tablero eléctrico se encuentra atascado por el frente por lo que debe abrirse la puerta trasera del gabinete para tomar las mediciones. La puerta está cerrada por tornillos Allen de 4 mm. Dentro del gabinete se encuentran un manómetro en la parte superior al cual no se le realizan mediciones, el tablero eléctrico en el centro y en la parte inferior las borneras. En el tablero eléctrico se ubican en la parte superior izquierda un amperímetro, a la derecha de éste, dos relés, en la parte central un temporizador y los pulsadores de marcha, parada y parada de emergencia. En la parte inferior del tablero se encuentran a la izquierda una llave selectora y un interruptor termomagnético. A la derecha del interruptor se encuentra un contactor con relevo térmico. Como indica la Figura 3.3.1.12 se toma una imagen del tablero completo y otra de la bornera de la parte inferior. En caso de encontrar un punto caliente se realizan tomas con acercamiento al elemento con posibles problemas. Finalizada la medición se cierra el tablero.

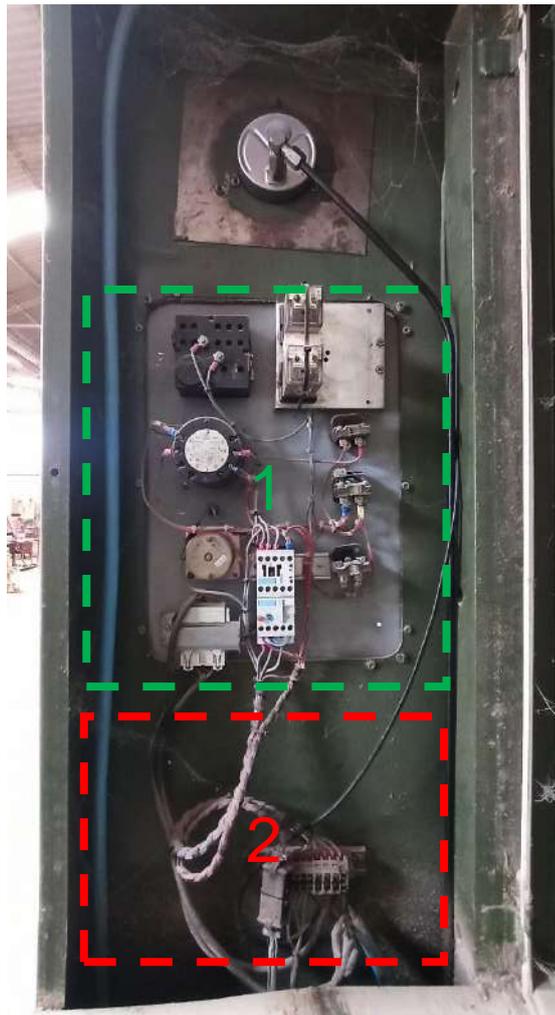


Figura 3.3.1.12 Tablero eléctrico de la prensa hidráulica B2P. En la imagen se delimitan las dos tomas de la termografía infrarroja.

- B2TP Tablero principal

El tablero principal se encuentra en un gabinete sin puerta. El tablero cuenta con una tapa calada con los elementos a la vista. El primer paso es, entonces, retirar la tapa con cuidado ya que existe riesgo de contacto directo.

Los elementos del tablero son interruptores termomagnéticos, un detector de falla, un temporizador y un seccionador fusible. Las imágenes se toman como indica la Figura 3.3.1.13. En caso de encontrar un punto caliente se realiza una toma con acercamiento al elemento del posible problema. Al finalizar la medición se vuelve a colocar la tapa calada teniendo principal cuidado con los contactos directos.

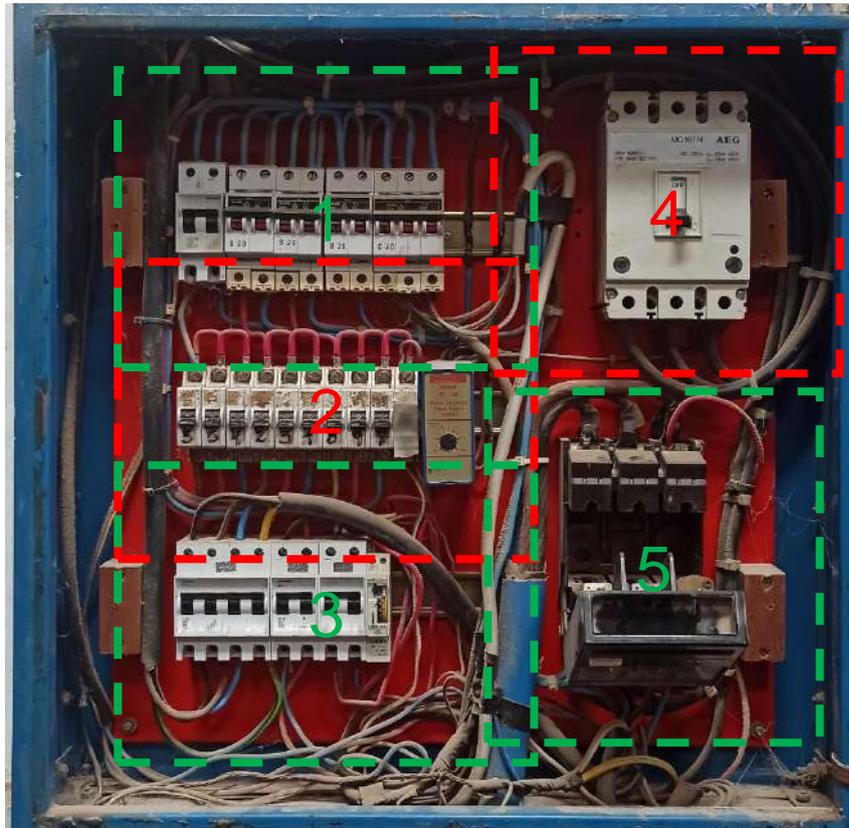


Figura 3.3.1.13 Tablero principal. Identificadas en la imagen las cinco tomas a realizar del tablero.

- C1P Pegadora de cantos para puertas placa

Este activo está compuesto por un tablero eléctrico en gabinete, un tablero de control que es parte del equipo, un motor expuesto en la máquina, un motor en el sistema de extracción, actuadores neumáticos y un elemento resistivo.

El gabinete con el tablero eléctrico posee un sistema de enclavamiento de puerta similar pero más antiguo que el de la fresadora CNC por lo cual el procedimiento de falseo de la llave es el mismo. La puerta se sostiene por tornillos tipo Phillips y dentro hay una pequeña caja que se abre con un sistema de trabas. Los componentes del tablero eléctrico son un seccionador rotativo, cuatro temas de tapones fusibles más uno monofásico, cinco contactores con cinco relevos térmicos, un transformador con aislación clase B, borneras y dentro de la caja se encuentra un controlador lógico. Las imágenes se tomarán como indica la Figura 3.3.1.14.

El tablero de control se destapa quitando los tornillos para destornillador plano. El tablero requiere una sola toma y los elementos en el mismo son un termorregulador, dos teclas 1-0 y cuatro pulsadores.

El motor expuesto sigue el procedimiento específico para su tipo. Lo mismo aplica para el motor del sistema de extracción de aserrín.

Se menciona la existencia de elementos de neumática y resistencias calentadoras de pegamento ya que en las termografías tanto del motor como de los tableros pueden encontrarse reflejos en partes metálicas o una temperatura “ambiente” elevada cuando en realidad se trata de estos elementos trabajando a temperatura normal.

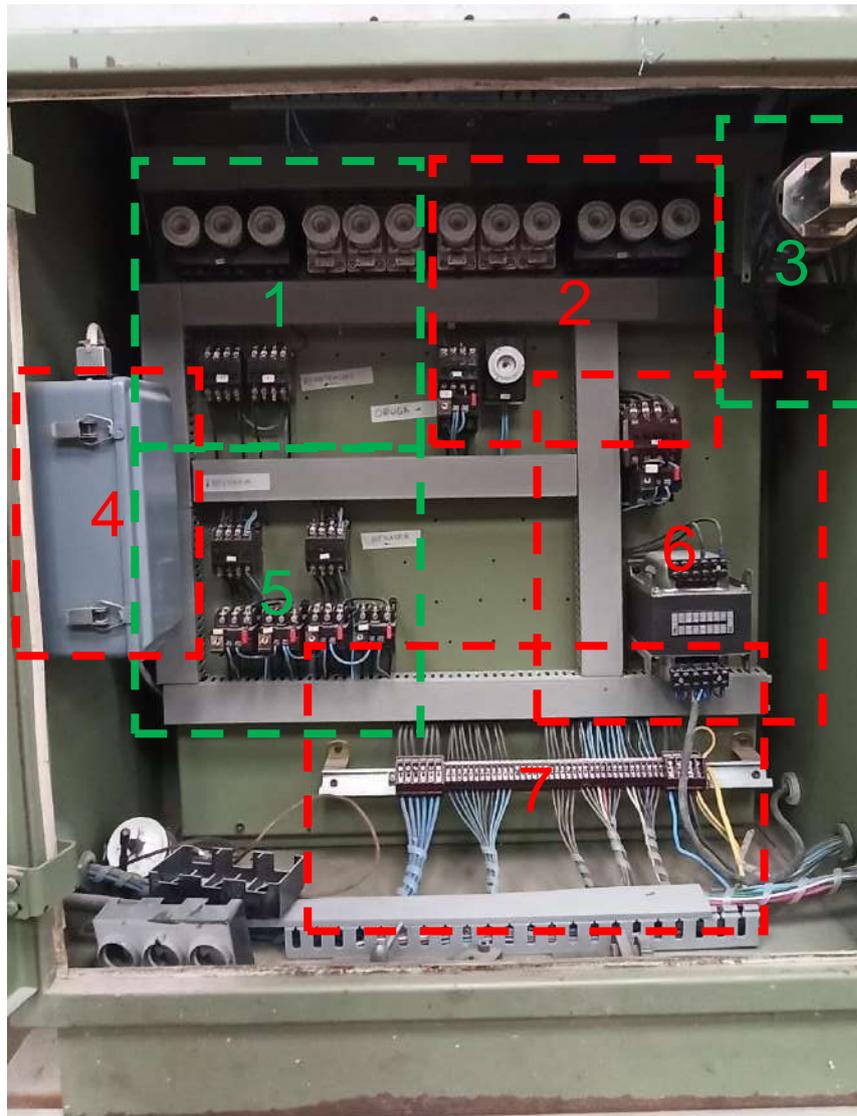


Figura 3.3.1.14 Tablero eléctrico del equipo C1P. Indicadas en la imagen las tomas a realizar. La imagen 4 debe tomarse de frente a la caja.

- C1R Refiladora de esquinas

El equipo tiene su tablero de control retirando los tornillos, tipo Allen de 4mm, en la parte trasera del gabinete. El tablero es de una sola toma y los componentes son electrónicos y neumáticos. Por ese motivo se realiza una toma para medir la temperatura ambiente del gabinete. Una vez finalizada la toma se cierra el equipo colocando nuevamente los tornillos.

- C2P Pegadora de cantos para melamina

La pegadora de cantos posee una tapa detrás del espacio donde se colocan las puertas. Se recomienda abrir la puerta entre la colocación de puertas para tener espacio y no incomodar al operario. Una vez abierto las imágenes termográficas se deberán tomar desde los costados para no impedir la utilización del equipo.

En la tapa central del equipo se encuentran los motores a estudiar. Se realiza una toma a cada motor eléctrico desde cada costado. Debido a los componentes resistivos y neumáticos

se deben tener en cuenta los reflejos de éstos en los metales del equipo. Este es el motivo por el cual se realizan tomas desde cada lado de los motores.

El tablero se abre desde la parte inferior trasera del gabinete del equipo. Cuenta con dos puertas las cuales tienen una cerradura de tableros universal. Dentro del tablero eléctrico se encuentran un transformador con aislación clase B, un PLC, borneras, seis guardamotores con seis contactores, relés y fusibles. Por el espacio reducido, para las imágenes se pueden realizar tomas más amplias que las indicadas en la Figura 3.3.1.15 aunque no se recomienda debido a los reflejos y la dificultad en el análisis de la imagen.

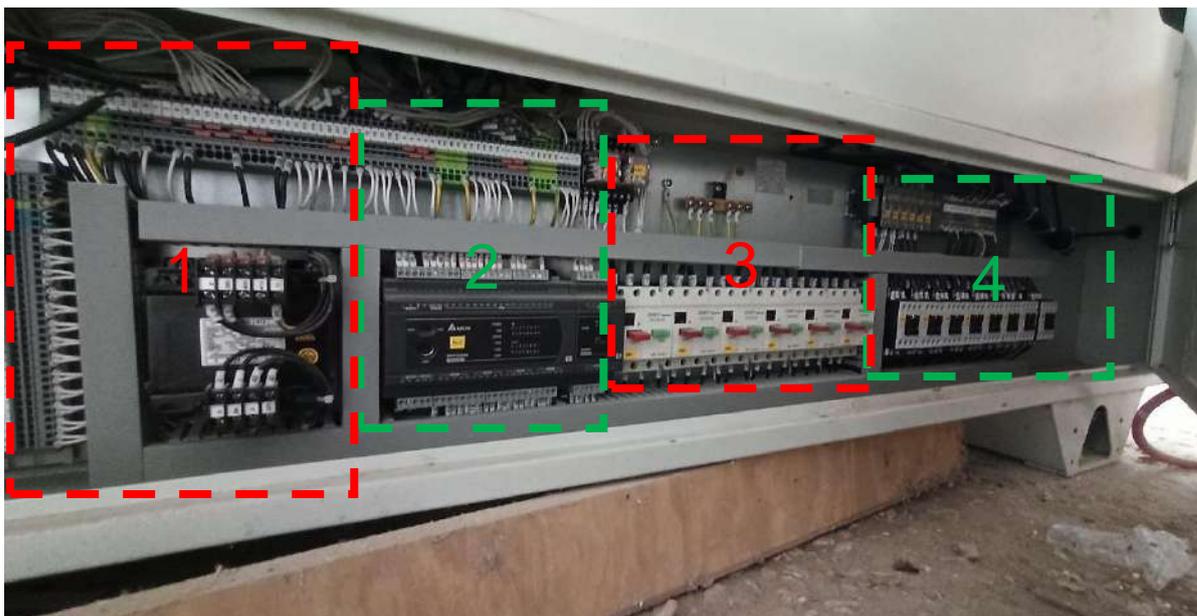


Figura 3.3.1.15 Tablero eléctrico del C2P. Indicadas las tomas a realizar. Las tomas deben tomarse de frente al tablero, no en ángulo como la fotografía de referencia.

- C2A Agujereadora múltiple

La agujereadora múltiple posee un pequeño tablero dentro del gabinete principal. La puerta se abre con tornillos Allen de 4mm. Dentro del tablero se encuentran tres fusibles, un contactor y una llave selectora. Se aplica el procedimiento de tableros de una sola toma y luego se cierra la puerta.

- C3C Compresor de la cabina de pintura

El compresor de la cabina de pintura es el de mayor tamaño. El motor se encuentra a la vista por lo que se aplica el procedimiento de motores expuestos. La alimentación del mismo es parte del tablero secundario del sector por lo cual se contempla su estudio dentro de las imágenes que se tomen de dicho tablero.

- C3IE Instalación eléctrica del sector C

La instalación incluye bandejas y tableros de una sola toma al igual que los demás activos considerados como instalación eléctrica de un sector. Lo particular del sector C es que cuenta con un tablero secundario para la potencia.

El gabinete se cierra con un tornillo plástico para ajustar a mano o con un destornillador plano. Dentro del tablero se encuentran cuatro interruptores termomagnéticos bipolares, uno tripolar

y uno tetrapolar. Además, para protección del compresor 1 hay un seccionador fusible. Se realizan las tomas según la Figura 3.3.1.16. Si se observa durante la toma una temperatura alta en los cables de entrar y/o salida del seccionador se puede realizar una toma en ángulo de los bornes ya que en una toma recomendada de frente no se pueden apreciar.

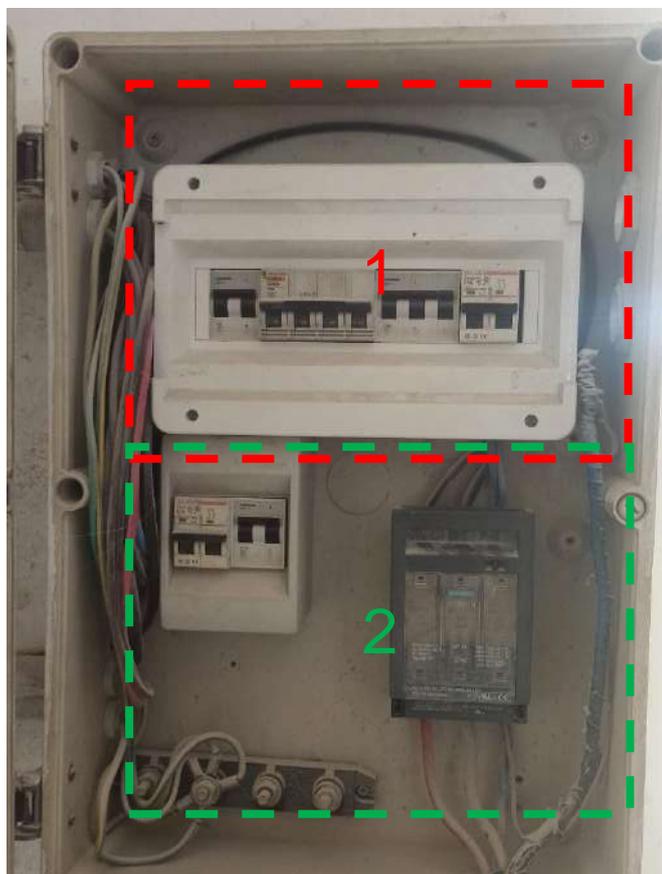


Figura 3.3.1.16 Tablero secundario para el sector C. Se indican en la figura las tomas a realizar.

3.3.1.4. CONCLUSIONES

El mantenimiento eléctrico se basará en inspección y limpieza periódicas, sumadas a la rutina predictiva de termografía infrarroja. De esta forma se mantendrá un nivel de confiabilidad en las instalaciones que permitirán el trabajo continuo.

Con la implementación de las tareas predictivas (termografía e inspección) y preventivas (limpieza) se irán relegando las tareas correctivas de urgencia o cortes repentinos de energía para dar paso a paradas programadas en tiempos de producción muertos para aumentar el rendimiento de la planta.

3.3.2. MANTENIMIENTO MECÁNICO

En el caso de estudio, en la actualidad el mantenimiento de máquinas se trabaja sólo con correctivo o preventivos cambiando piezas clave con la frecuencia indicada por el fabricante.

En este caso se utilizará una rutina predictiva de análisis de vibraciones, de limpieza y de cambios de repuestos preventiva.

Los equipos analizadores de vibraciones solían tener costos prohibitivos para una PyME pero con el correr de los años surgieron opciones asequibles. Originalmente el medidor contaba con el analizador incorporado y un alto coste. Hoy en día existen sensores individuales fijos en las máquinas o medidores que sólo toman datos para analizar con el software en una PC.

3.3.2.1. LIMPIEZA

El principal problema en el caso de estudio, al igual que lo analizado para el mantenimiento eléctrico, es la acumulación de aserrín en máquinas y equipos, en la Figura 3.3.2.1 ejemplificado. La propuesta para esto es que dentro de la rutina de inspección y limpieza eléctricas se realice una revisión interna periódica de partes mecánicas.

Al igual que con la rutina eléctrica, tanto la inspección como la limpieza debe realizarse con los equipos apagados y bloqueando su alimentación para evitar accidentes. La diferencia en este caso es que el acceso a partes de la máquina es limitado. Por lo que una limpieza por soplado sería lo más adecuado para estos casos. Se debe utilizar mascarilla y lentes de protección debido al soplado de aserrín para esta tarea.

Un problema que puede ocurrir con los equipos debido a la presencia de aserrín es que se empaste la lubricación de elementos. Luego de cada limpieza deben probarse los equipos y prestar atención a ruidos y atascamientos del equipo.



Figura 3.3.2.1 Escuadradora con partes móviles cubiertas de aserrín.

3.3.2.2. ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Antes de describir el procedimiento de la toma de vibraciones se explica el criterio de detección de fallas luego de haber corroborado la fiabilidad de los datos obtenidos como se explicó en la sección 2.3.2.5.

Existen diferentes tipos de fallas, algunas pueden ocurrir en casi todos los equipos y otras son específicas de cada equipo. Se analizan las que incumben al caso de estudio.

- Identificación del pico de primer orden

El primer paso en el análisis de vibración de máquina es la identificación del pico espectral que corresponde a la velocidad de rotación de la flecha, o sea el llamado pico 1x. Esto será el 1x en un espectro normalizado. Es importante de verificar si la normalización se hizo de manera correcta. También se llama el pico de primer orden.

Muchas veces, los picos 1x del eje van acompañados de una serie de armónicos o de múltiplos enteros de 1x y esto ayuda a encontrarlos. Una buena confirmación del pico de

primer orden es la existencia de otras frecuencias forzadas conocidas como el paso de álabes de la impulsora de la bomba. Dichas frecuencias se encuentran como el número de álabes o aspas multiplicado por las RPM.

En máquinas con ejes múltiples se pueden identificar las RPM del accionado con la relación de engranajes o correas y el pico 1x del principal. [12]

- Desbalanceo

Las máquinas están sujetas a varias condiciones de desbalanceo, las más importantes se llaman estáticas y dinámicas. El desbalanceo estático es un estado donde el centro de rotación de un rotor no corresponde a su centro de masa o, en otras palabras, su centro de gravedad no está ubicado en su eje de rotación. Esto resulta en una fuerza centrífuga, que se aplica en el rodamiento a la frecuencia 1x. Esta fuerza 1x es proporcional al cuadrado de la velocidad del rotor, lo que quiere decir que máquinas de alta velocidad requieren un balanceo con mucha más precisión que máquinas de baja velocidad. Esquema según Figura 3.3.2.2.

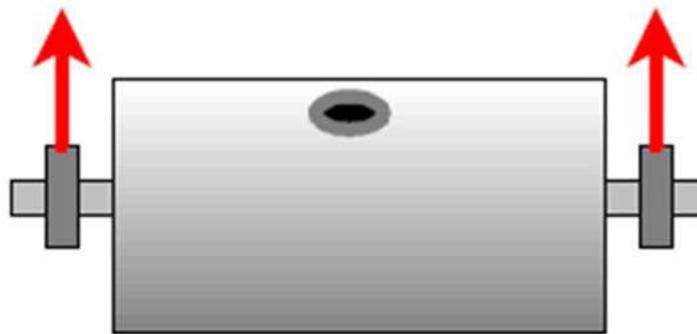


Figura 3.3.2.2 Desbalanceo estático. Fuerza a frecuencia 1x y en fase sobre los rodamientos. [12]

Las fuerzas de desbalanceo en maquinaria producirán vibraciones en los rodamientos, donde los componentes radiales y tangenciales 1x son 90 grados fuera de fase. El ángulo de fase actual depende de las movibilidades mecánicas relativas de la estructura en dos direcciones de medición. En la práctica, se encuentra una fase de 60 a 120 grados.

El valor de la fuerza se calcula como:

$$F = m \cdot r \cdot \omega^2 \quad (3.3.2.1)$$

Siendo m la masa (aplicada sobre el centro de masas), r la distancia radial entre el eje de rotación y el centro de masas y finalmente la velocidad angular elevada al cuadrado.

El desbalanceo estático resulta en fuerzas 1x en los dos rodamientos de soporte del rotor, y las fuerzas en ambos rodamientos siempre están en la misma dirección. Se dicen que sus señales de vibración están en fase una con otra. Un desbalanceo estático puro, producirá un fuerte pico 1x en el espectro de vibraciones y su amplitud será proporcional a la gravedad del desbalanceo y al cuadrado de las RPM.

Para el desbalanceo par, tenemos a un cilindro con dos masas iguales colocadas a distancias iguales pero opuestas del centro de gravedad. Entonces, en este caso, el rotor se encuentra en un equilibrio estático. No obstante, las dos masas provocan un cambio de orientación de los ejes de inercia principales centroidales. En otras palabras, cuando gira, produce fuerzas centrífugas en los rodamientos que estarán en fase opuesta. Esquema según Figura 3.3.2.3. [36]

Un rotor con desbalanceo par puede ser balanceado estáticamente y puede parecer que está perfectamente balanceado, cuando se pone en arista de presión. Pero cuando gira, producirá fuerzas centrífugas en los rodamientos que estarán en fase opuesta. Un rotor puede tener desbalanceo estático y desbalanceo par al mismo tiempo y esta condición se llama desbalanceo dinámico. Esto es lo que por lo general se encuentra en la práctica.

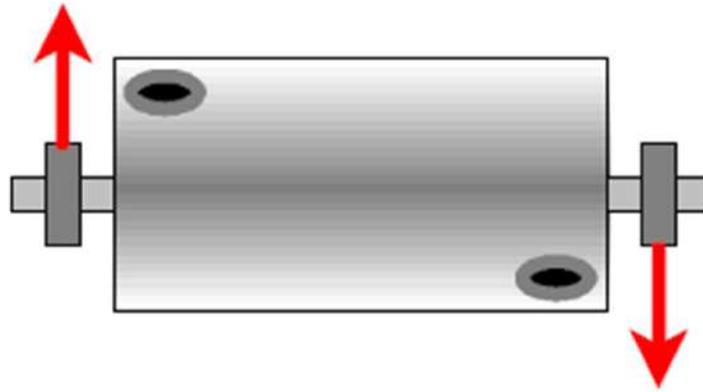


Figura 3.3.2.3 Desbalanceo par. Las fuerzas sobre los rodamientos son opuestas. [12]

En la Figura 3.3.2.4 se observa el espectro de frecuencia de un desbalanceo. Los límites de alarma temprana y crítica se marcan en amarillo y rojo respectivamente. Existe un solo pico y el mismo se encuentra en las RPM del motor por lo que se deduce que corresponde a la frecuencia 1x. El módulo de dicha magnitud sobrepasa el valor crítico por lo que no se encuentra en funcionamiento normal. Si este espectro se repite en el mismo sentido que en el otro rodamiento se trata de un desbalanceo estático. Si se repite en el sentido opuesto entre rodamientos se tratará de un desbalanceo par.

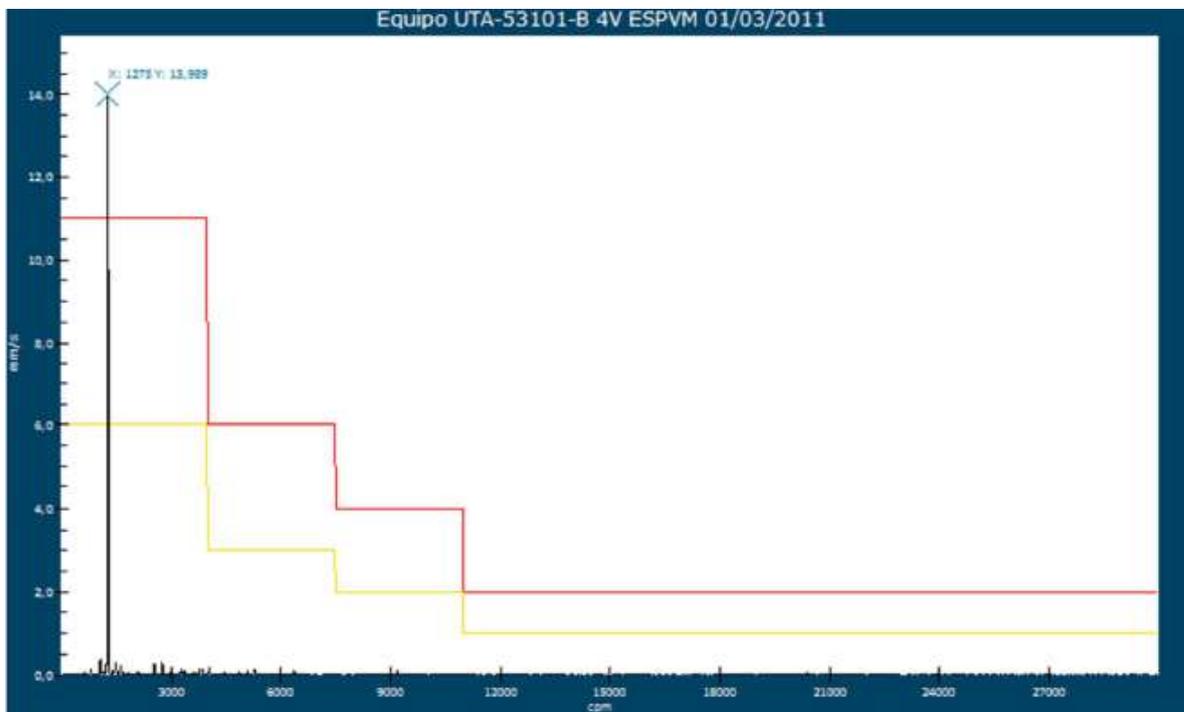


Figura 3.3.2.4 Espectro de un desbalanceo. Amplitud pico sólo en la 1x. [12]

En una máquina con un rotor desbalanceado sobresaliente como un ventilador se producirán vibraciones $1x$ en la dirección axial y también algunas en la dirección radial y tangencial en el rodamiento más cerca del rotor. Esto es debido al hecho que el desbalanceo provoca un momento de flexión en la flecha y causa que el cárter del rodamiento se mueva en la dirección axial. [12]

Entre las principales causas del desbalanceo se encuentran:

- Aglomeración desigual de polvo en los rotores de un ventilador.
- Falta de homogeneidad en partes coladas, como burbujas, agujeros de soplado, y partes porosas.
- Excentricidad del rotor.
- Flexión de rodillos, especialmente en máquinas de papel.
- Distribución desigual en las barras de rotor de motores eléctricos o en el enrollado.
- Erosión y corrosión desigual de las impulsoras de una bomba.
- Pesos de balanceo que faltan.
- Eje con flexión.

- Desalineación

La desalineación es una condición en la que las líneas centrales de ejes acoplados no coinciden. Si las líneas centrales de los ejes desalineados están paralelas, pero no coinciden, entonces se dice que la desalineación es una desalineación paralela.

Si los ejes desalineados se juntan, pero no son paralelos, entonces la desalineación se llama desalineación angular. Casi todas las desalineaciones que se observen en la práctica son una combinación de los dos tipos de base. [12]

Cabe destacar que, en el caso de la desalineación, las reglas de diagnóstico de la falla no se van a presentar en todos los casos de la misma manera. Esto se debe a lo severos que suelen ser los daños producidos por este desperfecto. En la medición real suele encontrarse la desalineación en conjunto con otras fallas, generalmente en los rodamientos. [36]

La desalineación paralela produce una fuerza de cizallamiento y un momento de flexión en la extremidad acoplada de cada eje, niveles de vibración altos en $2x$ y en $1x$, suele encontrarse una $3x$ pero de baja amplitud. Se producen en las direcciones radiales o tangenciales en los rodamientos en cada lado del acoplamiento, y son de fase opuesta. Esquema según Figura 3.3.2.5.

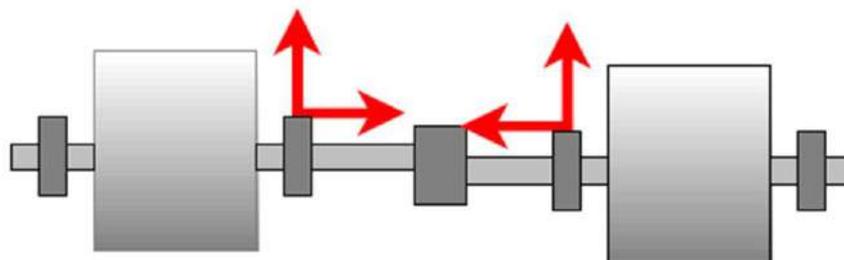


Figura 3.3.2.5 Desalineación paralela. Fuerzas radiales en fase y tangenciales opuestas entre rodamientos. [12]

En la mayoría de los casos, los componentes $2x$ estarán más altos que los $1x$. Los niveles axiales $1x$ y $2x$ estarán bajos solamente en desalineación paralela, y su fase estará opuesta.

Cuando los daños son severos pueden encontrarse picos en frecuencias 4x y 8x debidos a la flojedad mecánica del equipo. La Figura 3.3.2.6 ejemplifica el caso.

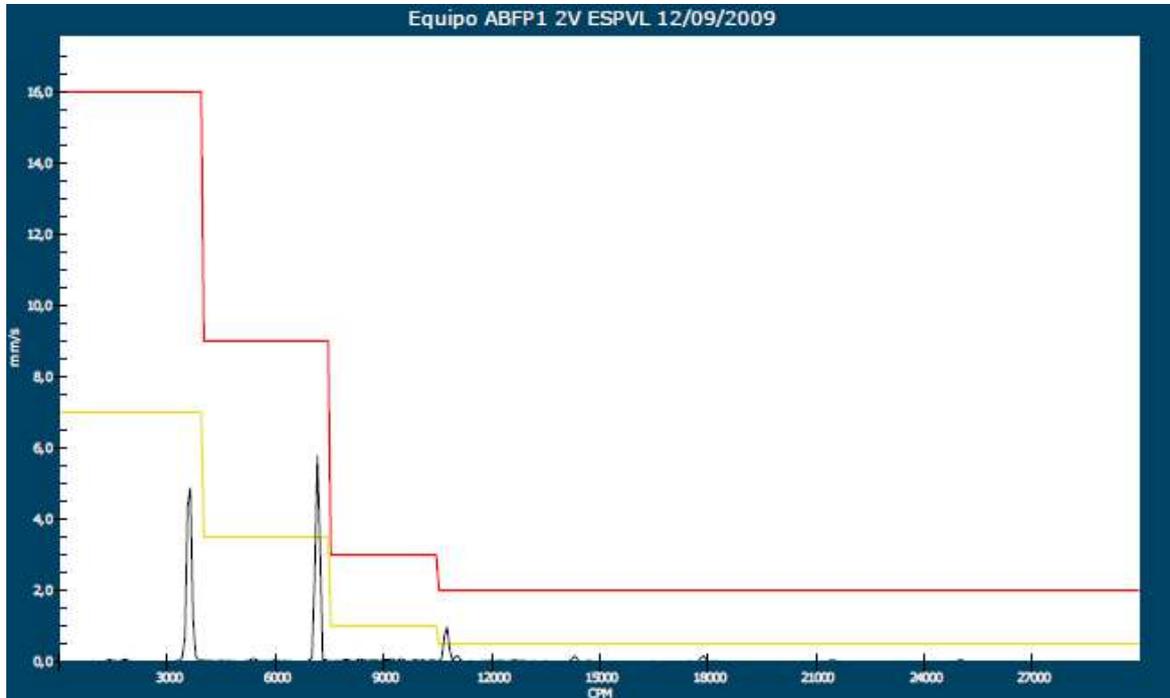


Figura 3.3.2.6 Espectro de frecuencias de una desalineación paralela. Picos en 1x y en mayor medida en 2x. Pequeña amplitud en 3x. [12]

La desalineación angular produce un momento de flexión en cada eje. Esto genera una fuerte vibración en 1x y algo de vibración en 2x en la dirección axial en ambos rodamientos. La 3x, si aparece, será de baja amplitud y de fase opuesta. Esquema según Figura 3.3.2.7.

También habrá niveles relativamente fuertes en direcciones radiales y/o transversales 1x y 2x, pero en fase.

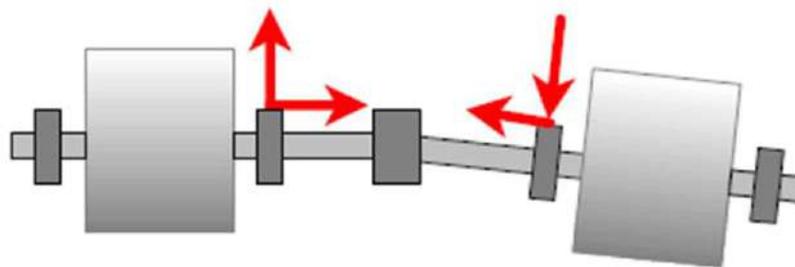


Figura 3.3.2.7 Desalineación angular. Presencia de fuerzas axiales y según el ángulo habrá fuerzas tangenciales o radiales. [12]

La mayoría de los casos de desalineación son una combinación de los tipos descritos. El diagnóstico se basa en picos 2x más fuertes que los picos 1x y en la existencia de picos axiales 1x y 2x. Debe descartarse que los altos niveles axiales 1x no estén causados por desbalanceo.

La desalineación produce una variedad de síntomas en tipos diferentes de máquinas y se deben consultar las firmas de vibraciones promedios para máquinas sanas con el fin de determinar los niveles permisibles 1x y 2x.

El estudio de la fase en una desalineación será siempre un complemento necesario para un diagnóstico certero. Asimismo, las mediciones deben tomarse a temperatura de trabajo normal. [12]

La desalineación puede causarse por alguna de las siguientes condiciones:

- Ensamblado impreciso de los componentes.
- La posición relativa de los componentes se altera después del montaje.
- Distorsión debido a fuerzas en tuberías.
- Distorsión en soportes flexibles debido a torque.
- Expansión de la estructura de la maquina debido al alza de la temperatura.
- El frente del acoplamiento no está perpendicular al eje del eje.
- "Pie Suave", esto es cuando una máquina se altera cuando los pernos de fijación son puestos con fuerzas de torque inferiores a las indicadas.

- Eje flexionado

La firma de vibración causada por un eje flexionado se parece a la firma causada por desalineación angular y es fácil confundirlas. Un eje flexionado, que por lo general está causado por un calentamiento desigual en el rotor, causa altos picos axiales 1x y 2x y altos picos radiales y transversales 1x en ambos rodamientos. La fase del componente 1x estará opuesta en las extremidades opuestas del rotor. Esquema según Figura 3.3.2.8 y se ejemplifica el espectro en la Figura 3.3.2.9.



Figura 3.3.2.8 Eje flexionado. Fuerzas axiales y radiales o tangenciales según la flexión del eje. [12]

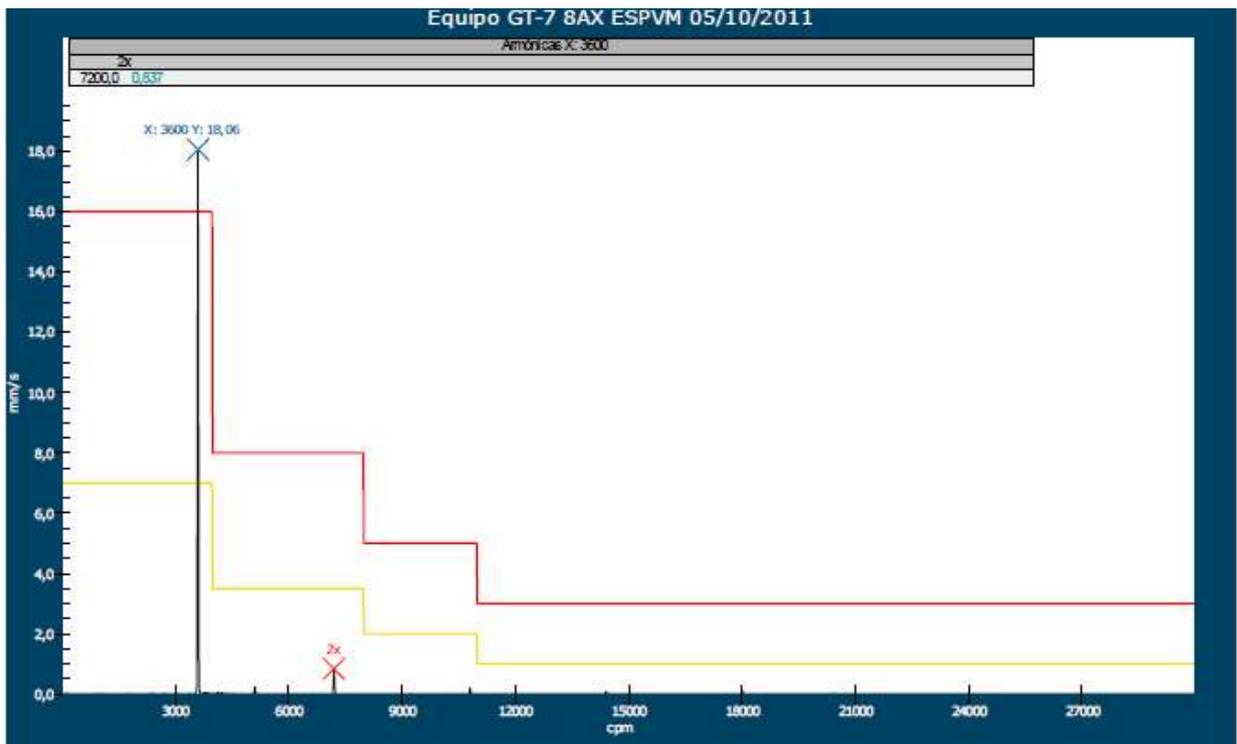


Figura 3.3.2.9 Espectro axial de un eje flexionado. Pico a la frecuencia fundamental 1x y en 2x. [12]

- Cojinetes de deslizamiento

La mayoría de los cojinetes de deslizamiento generarán picos espectrales a frecuencias más bajas que 1x, y estos se llaman picos subsincrónicos. A veces también se generan los armónicos de estos picos subsincrónicos lo que indica una fuerte degeneración del rodamiento.

Una causa de los problemas en bujes es el remolino de aceite u oil whirl. Remolino de aceite es una condición en la que ocurre una fuerte vibración entre 0,38x 0,48x (ver Figura 3.3.2.10). Nunca aparece en exactamente 0,5x, pero siempre está un poco más bajo de frecuencia. Está causado por un juego excesivo y una carga radial ligera, lo que resulta en una acumulación de la película de aceite y obliga al gorrón de migrar en el rodamiento a menos de la mitad de las RPM. El remolino de aceite es una condición seria, que necesita corrección, cuando se encuentra, ya que se puede deteriorar rápidamente hasta el punto donde hay contacto de metal a metal en el rodamiento.

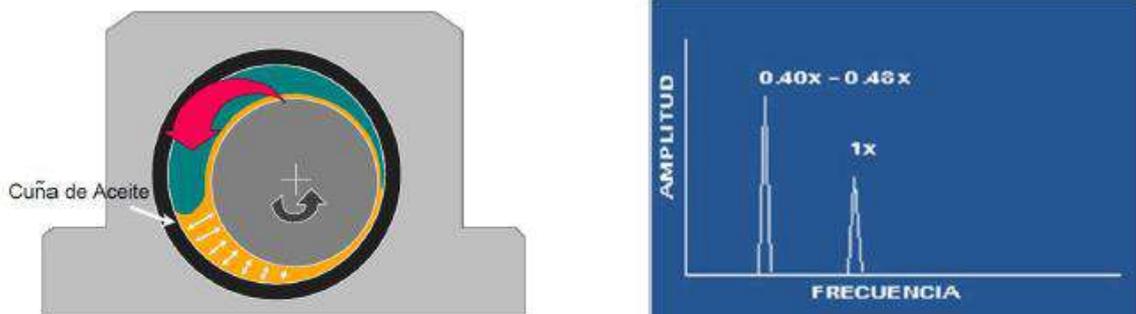


Figura 3.3.2.10 Esquema del remolino de aceite y su espectro característico. [12]

Otra causa de fallas en cojinetes es la holgura mecánica. La holgura mecánica puede ser de dos tipos: holgura rotativa o no rotativa. Ver figuras 3.3.2.11 y 3.3.2.12.

Una holgura rotativa está causada por un juego excesivo entre las partes rotativas y estacionarias de la máquina, y la holgura no rotativa es una holgura entre dos partes que normalmente son estacionarias, como una pata de máquina y su base.

Los dos tipos de holgura producirán armónicos 1x extensivos en los tres ejes de vibración. En casos más graves, habrá armónicos de medio orden e incluso de un tercio de orden.

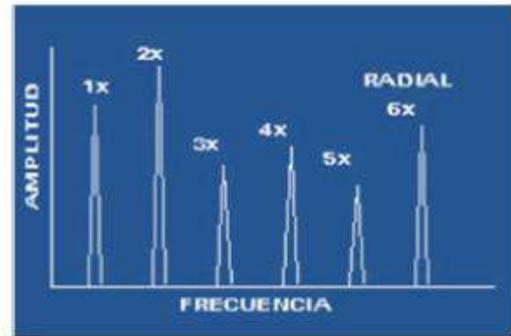
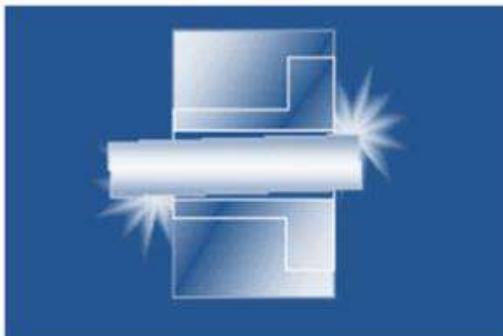


Figura 3.3.2.11 Esquema de la holgura rotativa y su espectro característico. [12]

La holgura entre una máquina y su base incrementará el componente de vibración 1x y 2x, puede aparecer una componente 3x de baja amplitud, la vibración será mayor en la dirección de la menor rigidez. Por lo general, esa es la dirección horizontal, pero eso depende de la estructuración horizontal de la máquina. Subarmónicos 0,5x de baja amplitud también se producen si la holgura es grave.

La flexibilidad de la base u holgura puede ser causada por pernos flojos, corrosión o cuarteaduras en la estructura de montaje.

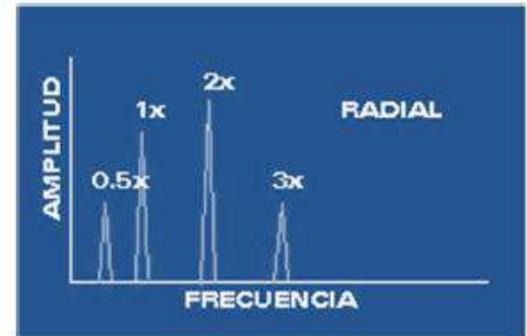
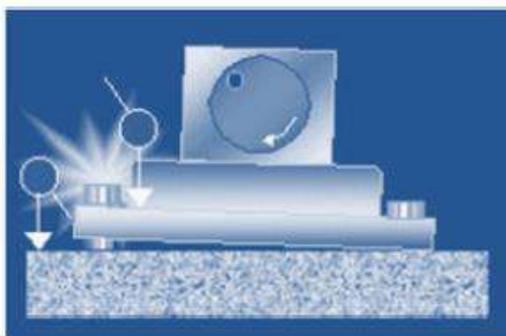


Figura 3.3.2.12 Esquema de la holgura no rotativa y su espectro característico. [12]

La última causa de problemas en cojinetes es la desalineación del rodamiento.

Un rodamiento desalineado generará una vibración axial considerable. Los picos se verán normalmente a 1X, 2X y también a 3X.

Dado que hay una vibración axial tan fuerte, también puede ser confundido con desalineación de la máquina o con desequilibrio en una bomba o ventilador en voladizo. La presencia de picos a 2X y 3X indicaría una condición de rodamiento torcido en vez de un desequilibrio. Por

otro lado, en un análisis de fase con los sensores dispuestos a cada lado del rodamiento se vería un desfase de 180°. [12]

- Acoplamientos

Los acoplamientos existen en muchos tipos y configuraciones. Un defecto en un acoplamiento por lo general causa síntomas similares a la desalineación.

Frecuentemente los problemas de acoplamiento producen componentes de vibración 1x más fuertes que los que produce la desalineación. Si el acoplamiento no es verdadero, eso es si las caras de las bridas no son paralelas, se produce una vibración similar a la desalineación angular.

La desalineación de acoplamientos es un problema común y el resultado son componentes altos 1x y 2x radiales y tangenciales.

El desgaste en el acoplamiento puede producir todos los síntomas de desalineación y de holgura. [12]

- Correas

Las correas son un tipo de transmisión de fuerza relativamente barato, pero están sujetas a muchos problemas.

Si es que hay dos poleas en el sistema, el segundo armónico estará dominante. La frecuencia fundamental de la correa (FFC) se da con la fórmula siguiente.

$$FFC = \pi \frac{D}{L} (RPM) \quad (3.3.2.2)$$

Siendo D el diámetro de la polea, L la longitud de la correa y las RPM de giro de la polea.

La FFC es siempre subarmónica por debajo de 1x. En el espectro de una medición en conjuntos que contengan transmisión por correas se observarán las 1x de los distintos equipos y por debajo de estos la frecuencia de vibración de la correa como se observa en la Figura 3.3.2.13.

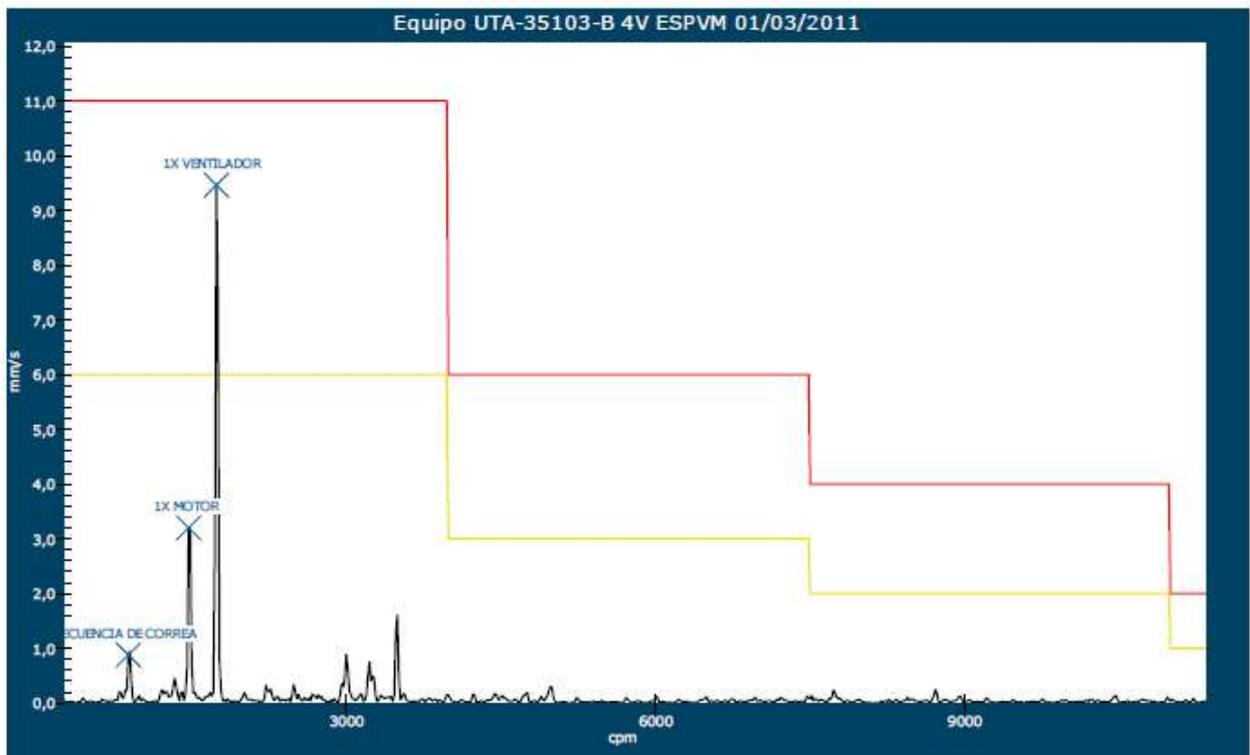


Figura 3.3.2.13 Espectro de frecuencias de un conjunto motor-ventilador con transmisión por correas. La FFC es siempre inferior a 1x. [12]

Entre los problemas presentes en sistemas con correas se encuentran los siguientes:

-Correas mal emparejadas, estiradas o desgastadas, especialmente correas en Ve, generarán vibración a la FFC y sus armónicos.

-Poleas excéntricas generarán fuertes componentes radiales 1x, especialmente en la dirección paralela a las correas. Esta situación es muy común e imita el desbalanceo.

Eso se puede verificar removiendo las correas y volviendo a medir. Una vibración 1x de una polea excéntrica o de una polea con movimiento excéntrico generalmente se manifestará en la otra polea.

-La desalineación de poleas generará fuertes componentes axiales 1x y armónicos axiales de la frecuencia fundamental de la banda.

- Rodamientos con elementos rodantes

Los problemas de rodamientos con elementos rodantes son las fallas más comunes que se diagnostican en análisis de vibración. Un rodamiento defectuoso producirá componentes de vibración que no son múltiplos exactos de 1x, en otras palabras, son componentes no armónicos. La existencia de componentes no síncronos en un espectro de vibraciones es una bandera roja para el analista e indica que puedan existir problemas de rodamientos y que el analista inmediatamente debería de excluir otras posibles fuentes de este tipo de componentes para verificar el diagnóstico.

Las fórmulas para el cálculo de las frecuencias de los tonos de rodamiento a partir de la geometría del rodamiento son:

BPFI: Ball Pass Frequency Inner (Frecuencia de falla de pista interna)

$$BPFI = \frac{n}{2}(S_I - S_O) \left(1 + \frac{d}{D} \cos \varphi\right) \quad (3.3.2.3)$$

BPFO: Ball Pass Frequency Outer (Frecuencia de falla de pista externa)

$$BPFO = \frac{n}{2}(S_I - S_O) \left(1 - \frac{d}{D} \cos \varphi\right) \quad (3.3.2.4)$$

FTF: Fundamental Train Freq. (Frecuencia de falla de jaula)

$$FTF = \frac{1}{2} \left[S_I \left(1 - \frac{d}{D} \cos \varphi\right) + S_O \left(1 + \frac{d}{D} \cos \varphi\right) \right] \quad (3.3.2.5)$$

BSF: Ball Spin Freq. (Frecuencia de falla de elemento rodante)

$$BSF = \frac{D}{2d} \left\{ (S_I - S_O) \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cos^2 \varphi \right] \right\} \quad (3.3.2.6)$$

Donde:

n es el número de elementos rodantes

S_I son las RPM de la pista interna

S_O son las RPM de la pista externa

d es el diámetro del elemento rodante

D es el diámetro del rodamiento

φ es el ángulo de contacto

Para los rodamientos más comunes se pueden tomar unas aproximaciones de las ecuaciones anteriores.

Falla en el anillo exterior: n*RPM*0,4

Falla en el anillo interior: n*RPM*0,6

Falla en el elemento rodante: n*RPM*0,23 para n<10

Falla en el elemento rodante: n*RPM*0,18 para n>10

Falla en la jaula: RPM*0,4

Otro fenómeno encontrado en los rodamientos son las bandas laterales en el espectro de frecuencias.

Si el efecto se encuentra localizado en el anillo interior del rodamiento, la velocidad de revolución modulará en amplitud los tonos de rodamiento, y esto provocará bandas laterales alrededor de los tonos de rodamiento, a una distancia de 1x. La modulación de amplitud proviene del hecho que el defecto en el anillo interior entre y salga del área de carga del rodamiento una vez por revolución.

Mientras que está en el área de carga el defecto producirá vibración a la frecuencia del paso de bolas, pero cuando está fuera del área de carga, muy poca vibración, se producirá en esta frecuencia. Esto explica la modulación de amplitud del tono de rodamiento y las bandas laterales consecuentes.

Bandas laterales a una distancia de 1x de tonos de rodamiento son una indicación segura de desgaste en el rodamiento, que va avanzando. A veces, si un rotor está fuertemente desbalanceado un defecto de rodamiento en el anillo interior no producirá modulación de amplitud o bandas laterales. Esto se debe a que la fuerza centrífuga causada por el desbalanceo mantiene el anillo interior cargado en el mismo lugar en su periferia todo el tiempo. Ver Figura 3.3.2.14.

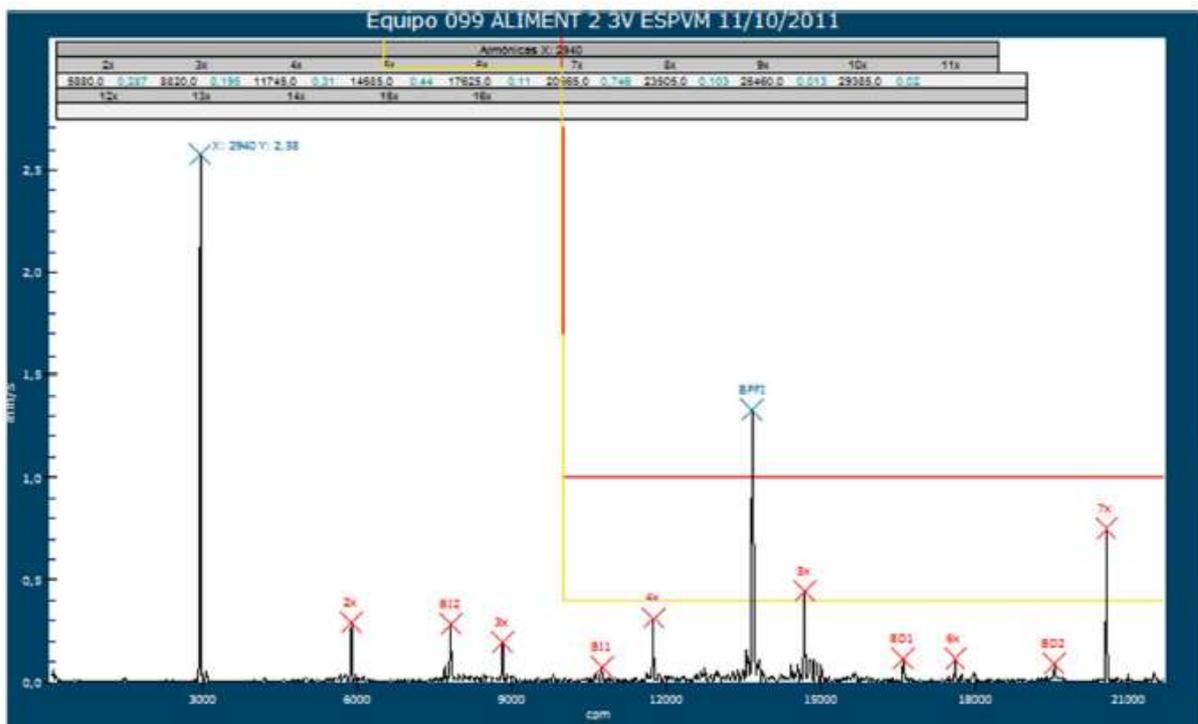


Figura 3.3.2.14 Espectro de frecuencia de un equipo con un rodamiento con falla de pista interna. Las bandas laterales están separadas de las armónicas de la fundamental por el valor de la BPF1. [12]

Otro ejemplo de bandas laterales en espectros de rodamientos involucra la frecuencia fundamental de tren (FTF). Esto es el ritmo a que la jaula que mantiene los rodillos gira en el rodamiento. Si un rodillo está astillado, cuarteado, o peor, en varios pedazos hará mucho ruido cuando esté en el área de carga del rodamiento, pero será silencioso cuando está fuera de esta área. Entrará y saldrá del área de carga al ritmo de la FTF ya que migra alrededor del rodamiento con la jaula. Esto provocará modulación de amplitud de los tonos de rodamiento al ritmo FTF y el resultado son las bandas laterales alrededor de los tonos de falla de elemento rodante BSF a la distancia FTF.

El último defecto detectable a comentar es la falla en la película lubricante.

La interrupción de la película lubricante genera componentes aleatorias claramente definidas en el espectro de aceleración en el rango de 4 a 10 kHz.

Al tomar la lectura directa del acelerómetro (sin atenuación alguna) hay una importante amplificación de los fenómenos de este rango de frecuencias. Además, en la mayoría de los

equipos hay pocas razones para encontrar otras componentes en este rango, lo que hace más claro aún el diagnóstico (ver Figura 3.3.2.15) [12].

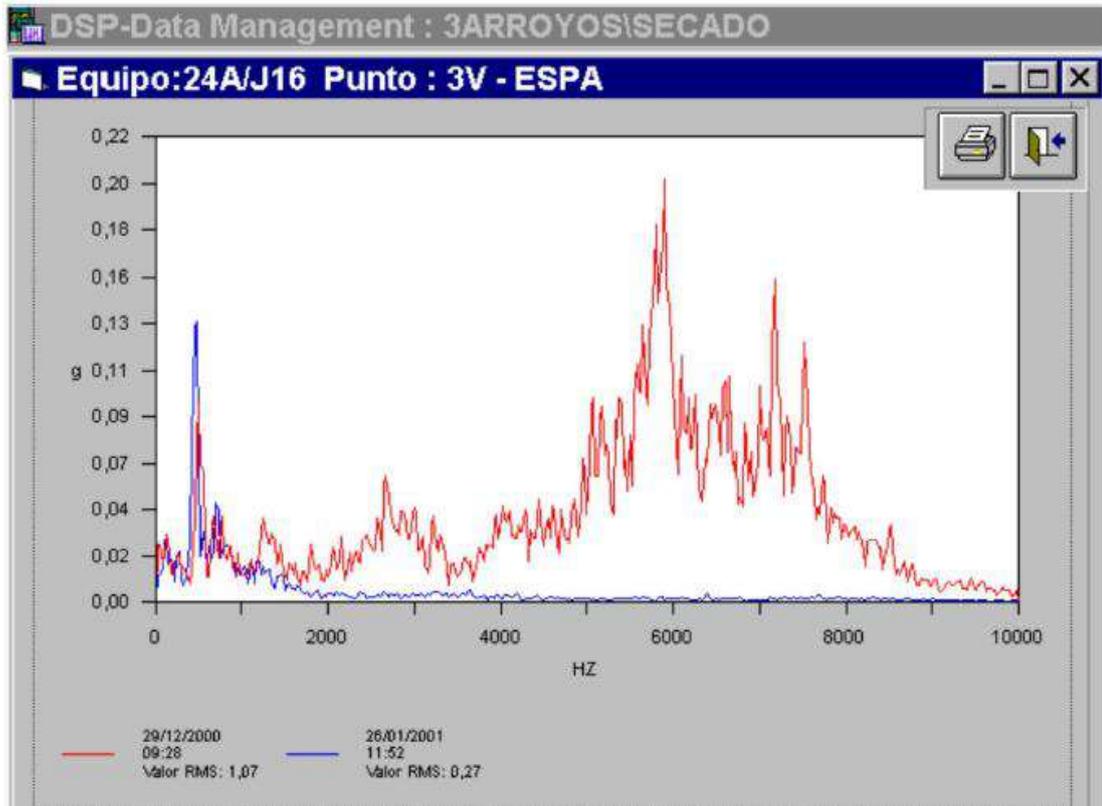


Figura 3.3.2.15 Comparación de espectros de un rodamiento con una falla en la película lubricante (rojo) y luego de su lubricación (azul). [12]

- Motores eléctricos de corriente alterna

La maquinaria eléctrica sufre de todos los defectos de otra maquinaria rotativa, con la complicación adicional de efectos puramente eléctricos. La constricción magnética o magnetoestricción es la deformación de un material magnético en presencia de un campo magnético, y causa vibración al doble de la frecuencia de línea en todos los aparatos eléctricos como motores, generadores, transformadores, etc. En motores eléctricos hay una atracción magnética entre el rotor y el estator que varía en 120 Hz (tomando 60 Hz como frecuencia de línea). Esto también causa vibración en el estator en 120 Hz. Es a veces difícil distinguir el efecto magnético en 120 Hz del componente de vibración 2x en máquinas de 3600 RPM. La manera más fácil de identificar la fuente de la vibración es que el componente magnético 120 Hz desaparecerá de inmediato cuando se apaga la corriente, y el componente 2x seguirá presente mientras que el rotor está rodando bajo el impulso cinético. [12]

Un defecto de los motores eléctricos que puede detectarse con un análisis de vibraciones es la excentricidad del estator. Tal defecto se refiere a la distribución estacionaria y no uniforme del espaciado entre el rotor y el estator. Para explicar el fenómeno se toma un ejemplo analizado en la bibliografía de un motor de dos polos a 50Hz. Esquema en la Figura 3.3.2.16.

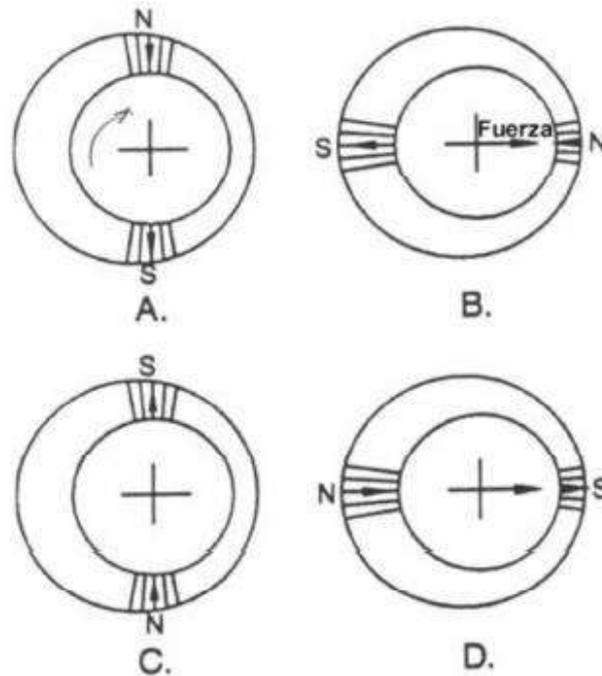


Figura 3.3.2.16 Esquema de la excentricidad del estator. Se ejemplifica la problemática para dos casos. [12]

Durante una rotación del campo magnético en el estator a 3000 rpm en un motor de dos polos, se producen dos atracciones del rotor en la dirección horizontal, debido a que la separación rotor-estator no es uniforme. De esta forma estas fuerzas no equilibradas tendrán lugar a 6000 rpm (100 Hz), cosa que sucederá siempre con independencia del número de polos. Ver Espectro de Figura 3.3.2.17.

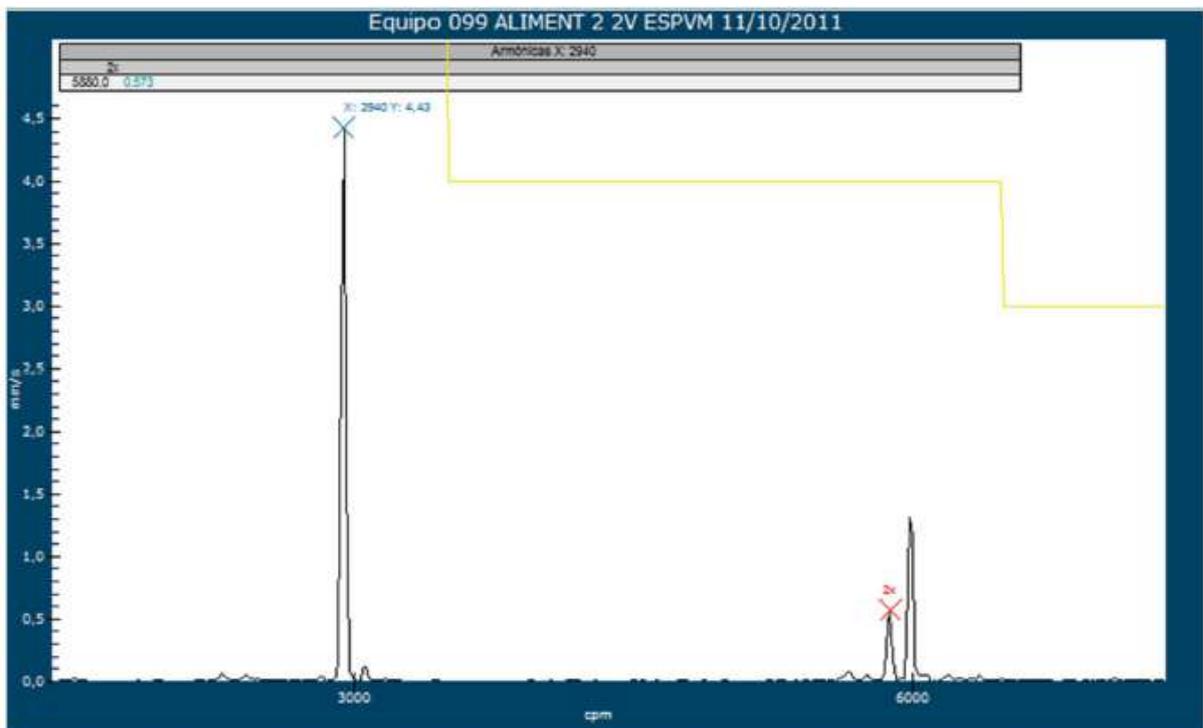


Figura 3.3.2.17 Espectro del ejemplo de motor a 50Hz. Se identifican armónicos 1x y 2x. Estando paralelo y muy cercano a 2x se ubica la vibración a 6000RPM del estator excéntrico. [12]

El criterio dado por la bibliografía que propone el ejemplo analizado es el siguiente:

En el caso de motores nuevos o recién reparados, cuya potencia esté comprendida entre los 35 kW y los 750 kW por ejemplo, resulta preocupante la presencia de la segunda frecuencia de línea con una amplitud de 1,3 mm/s. Sin embargo, para este mismo tipo de motor ya en servicio, 2,5 mm/s puede tomarse como límite de amplitud a la segunda armónica de línea. Desde luego, si el motor en cuestión acciona husillos de precisión, como lo es el caso de máquinas herramienta, entonces la amplitud de la ya mencionada componente de frecuencia no deberá exceder los 0,6 mm/s. [12]

El segundo caso de problema detectable es similar al anterior, la excentricidad en el rotor. La excentricidad en el rotor equivale a afirmar que el rotor no es concéntrico con su propio eje de rotación. Esto hace que también tenga lugar una distribución no uniforme del espaciado entre el rotor y el estator, pero en este caso, esta no uniformidad no es estacionaria sino que se traslada conjuntamente con la rotación del rotor. Tal defecto puede tener su origen en un corto circuito en las láminas del estator, lo que produce calentamiento local que deforma al rotor, sacándolo de su línea de rotación. De igual forma que en el caso del estator, se puede apreciar vibraciones altas a la segunda armónica de la frecuencia de línea, pero acompañada por bandas laterales espaciadas a la frecuencia de paso de los polos del motor. [12] Este espaciado, al igual que en los casos anteriores se debe a la segunda armónica de vibración modulada por el paso de polos. Ver Figura 3.3.2.18.

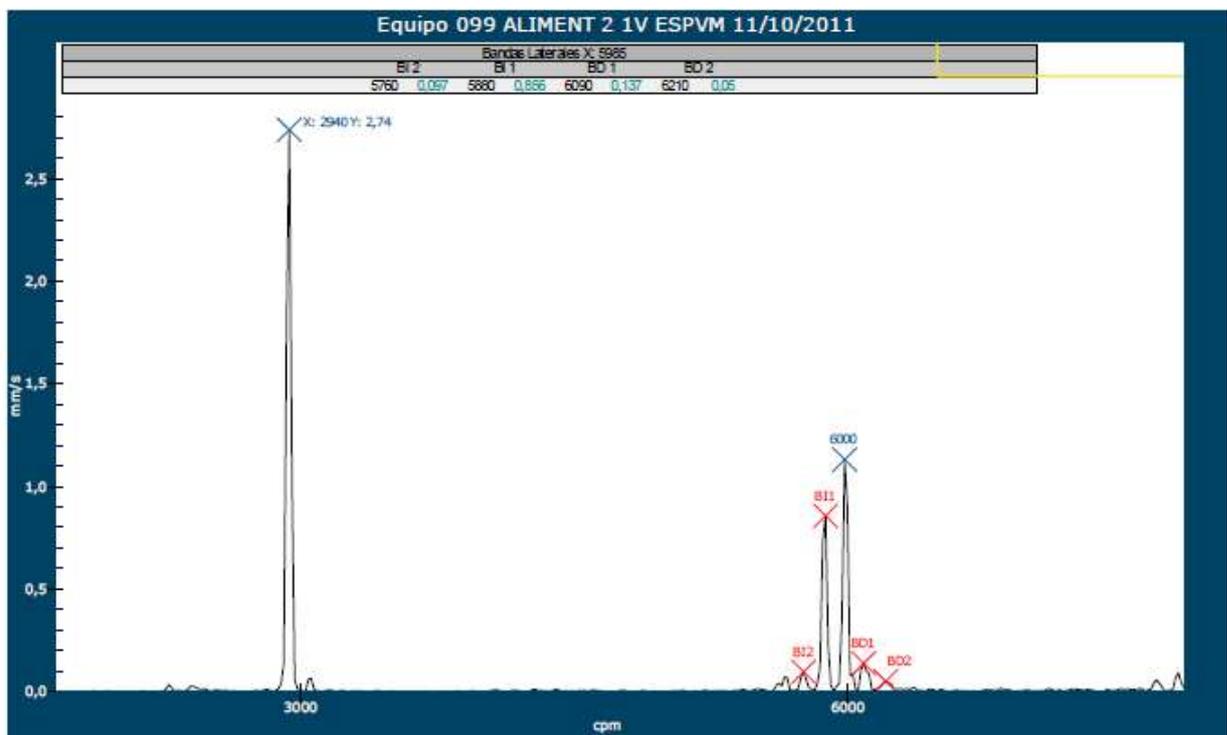


Figura 3.3.2.18 Espectro de un caso de rotor excéntrico. Se observan las armónicas 1x y la 2x en azul con las bandas laterales marcadas en rojo. [12]

El siguiente problema a analizar son las roturas en barras del rotor. La presencia de roturas en las barras del rotor hace que la frecuencia de rotación del motor sea modulada por el producto de la frecuencia de deslizamiento por el número de polos.

Debido a este fallo mecánico se produce un desbalance eléctrico en el motor, que a vez genera niveles de vibraciones suficientemente altos a la primera y segunda armónicas de la velocidad de rotación.

Un motor a inducción con barras defectuosas producirá una firma de vibración que varía lentamente en amplitud, a dos veces la frecuencia de deslizamiento.

Este fenómeno se llama batido y muchas veces se puede oír y también medir. Este dato cobra importancia en las tareas de control diario que debe realizar el operario de manera intuitiva. El reporte de ruidos anormales en máquinas debe realizarse lo más rápido posible para la detección temprana de fallas.

La amplitud y la frecuencia de los batidos dependen de la carga del motor.

Este fenómeno producirá una componente de alta frecuencia conocida como frecuencia de paso de barras (ver Figura 3.3.2.19), debido a que ésta frecuencia se encuentra modulada eléctricamente se podrán observar bandas laterales separadas a dos veces la frecuencia de línea. [12]

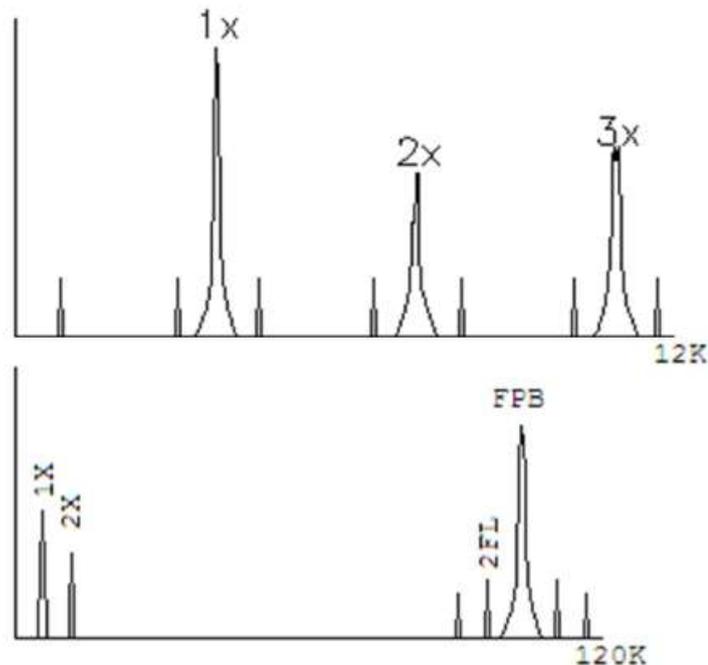


Figura 3.3.2.19 Caracterización del espectro de frecuencias de un motor eléctrico con rotura de barras. Primer y segundo armónicos altos y un pico a la frecuencia de paso de barras con bandas laterales. [12]

- Motores eléctricos de corriente continua

Vibración excesiva en motores de C.C. puede ser causada por segmentos de conmutadores malformados o picados, o por un contacto incorrecto de los cepillos con el conmutador. La frecuencia estará a la frecuencia de paso de segmentos, lo que equivale al número de segmentos del conmutador multiplicado por las RPM.

Sistemas de control de velocidad electrónicos para grandes motores de C.C. por lo general usan rectificadores controlados de silicio (SCR en inglés) para convertir una corriente trifásica en una corriente continua y pueden generar grandes cantidades de interferencia eléctrica en armónicos más altos de la frecuencia de línea de C.A., especialmente 360 Hz, lo que es 6 veces la frecuencia de línea (con 60Hz de frecuencia de línea coincidiendo con la bibliografía).

Cuando estos componentes se introducen en los bobinados del motor causarán vibraciones a esas frecuencias.

Si el pico en 360 Hz en el espectro de vibración se incrementa de manera significativa, las causas más probables son arrollamientos con circuitos abiertos, holgura en conexiones eléctricas o SCR funcionando de manera incorrecta. [12]

- Cajas de engranajes

Cajas de engranajes sanas generarán tonos bastante prominentes en la frecuencia del engranaje, que es el número de dientes de los engranes por las RPM del engrane.

En una caja nueva, a medida que se desgastan los dientes, el componente del engranaje disminuirá en valor cuando los dientes se hacen más suaves y se adaptan.

Después, a medida que va progresando el desgaste, el engranaje incrementará de nivel. El nivel del componente del engranaje depende también de la alineación de los ejes que cargan los engranes.

Si la caja tiene ejes múltiples, cada par de engranes generará sus propios componentes de engranaje. [12]

En los engranajes existen diferentes tipos de problemas a analizar. El primero será el "Hunting Tooth Gear". Es el fenómeno en el cual el mismo diente del piñón coincide con el mismo diente de la corona en cada ciclo y se desgastan más rápido y en mayor medida en el mismo lugar. Es fácilmente evitable por diseño, ya que al asignarle números primos de dientes a los engranajes se desgastan todos por igual.

En el espectro este fenómeno se observa como un pico a una frecuencia igual a las RPM sobre el mínimo común múltiplo de los números de dientes del piñón y corona. Esta frecuencia es muy baja y subarmónica por lo que suele pasar desapercibida por el analista.

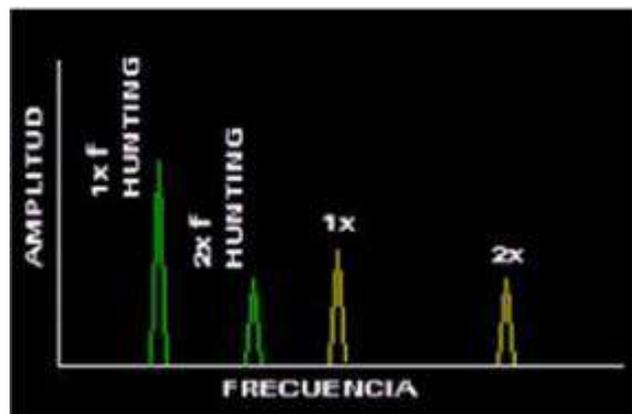


Figura 3.3.2.20 Espectro del Hunting Tooth Gear. Se observan los característicos picos a frecuencias subarmónicas. [12]

El segundo problema a analizar es el daño en dientes. Daño localizado en un diente de un engrane resultará en componentes de frecuencia elevada del engranaje y esto será modulado por las RPM del engranaje.

Esto causa bandas laterales a distancia de 1x alrededor del engranaje, y armónicos del engranaje. En el caso que se producen bandas laterales, es fácil determinar que engrane tiene un defecto, por la distancia de las bandas laterales. Ver Figura 3.3.2.20.

Además, puede ocurrir la aparición de bandas laterales alrededor de la frecuencia natural de vibración (f_n) del engrane defectuoso. El espaciamiento de las bandas laterales es las RPM del engrane defectuoso. [12]

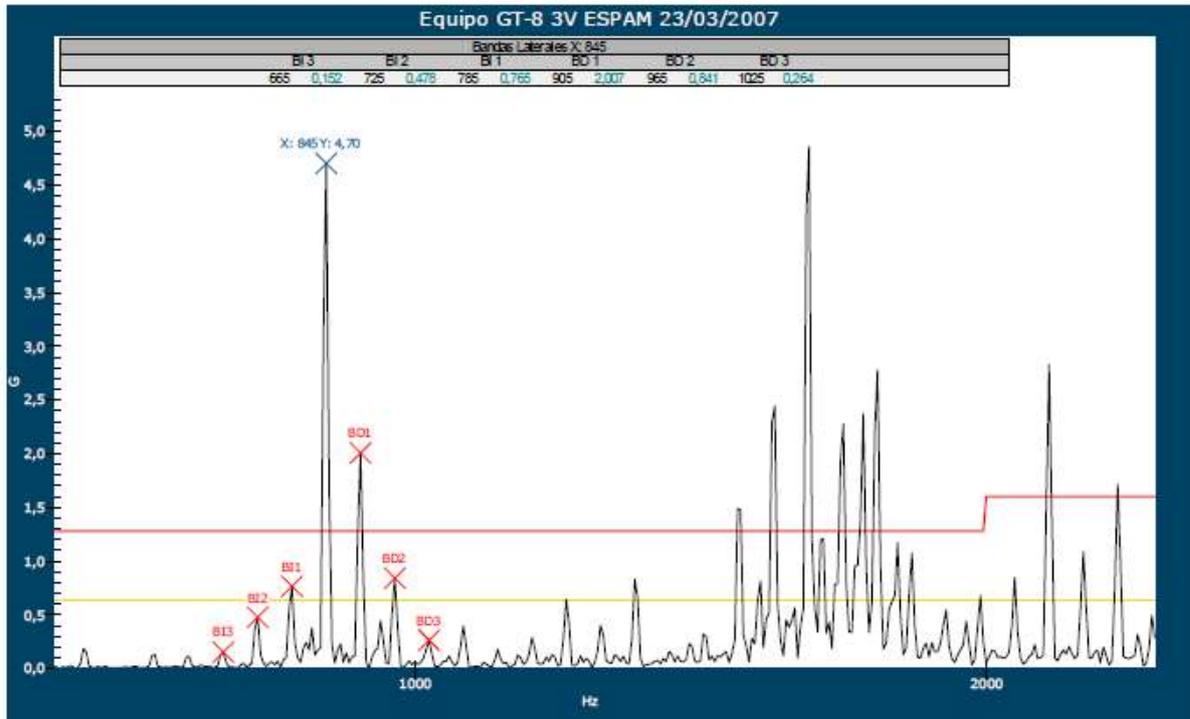


Figura 3.3.2.21 Espectro de un caso de daño en dientes. Se observan las bandas laterales distanciadas por las RPM del engranaje alrededor del pico de la frecuencia de engrane. [12]

Un engranaje con un solo diente agrietado o astillado generará alta vibración en la frecuencia natural del engranaje y probablemente también en la $1x$ del engranaje. Particularmente en este caso, en una gráfica espectral mostrará muy poca vibración en las RPM, por el contrario, una señal en el tiempo será de gran ayuda para determinar si el problema dominante es un diente roto.

Mientras que una forma de onda originada por un engranaje con dientes en buen estado presenta una forma senoidal bastante homogénea, cuando el engranaje tiene un diente roto o agrietado la forma de onda presenta ahora picos muy bien definidos con una separación igual a las RPM del engranaje como se observa en la Figura 3.3.2.21. [12]

El tercer problema a analizar es la desalineación de los engranajes. Esto usualmente se debe a un mal ensamble. Casi siempre se excitan los armónicos de 2do o mayor orden de la frecuencia de engrane, la presencia de bandas laterales a la RPM del piñón o la rueda no siempre sucederá. Si los armónicos $2x$ y $3x$ de la frecuencia de engrane dominan el espectro indican que el problema reviste gravedad. Ver Figura 3.3.2.22.

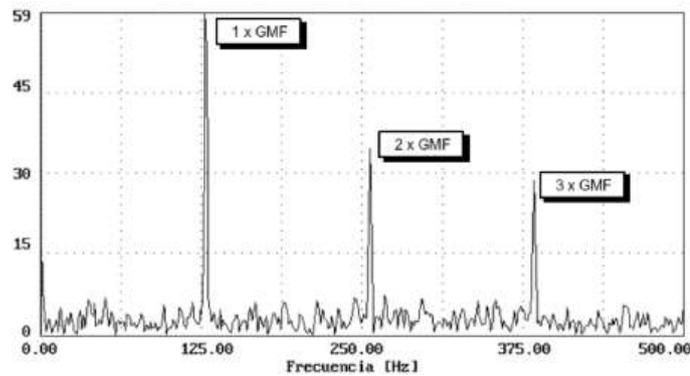


Figura 3.3.2.2 Espectro característico de un engranaje desalineado. Picos en armónicos 1x, 2x y 3x de la frecuencia de engrane. [12]

Los últimos dos problemas a analizar generan firmas vibratorias similares. Estos son la excentricidad y el “backlash”. La excentricidad de un engranaje es cuando el centro de simetría no coincide con el centro de rotación. Por su parte, el “backlash” es el juego excesivo entre engranajes, particularmente cuando al finalizar el contacto entre dos dientes los siguientes no entran inmediatamente en contacto. Ver Figura 3.3.2.23.

En el caso de existir alguno de estos dos defectos, o ambos de manera simultánea se observa un aumento considerable del número de bandas laterales alrededor de la frecuencia de engrane y de sus primeros armónicos, separadas una frecuencia igual a las RPM de la rueda defectuosa (piñón o corona). Si se trata de un problema de “backlash” la amplitud a la frecuencia de engrane debe disminuir con el aumento de la carga. [12]

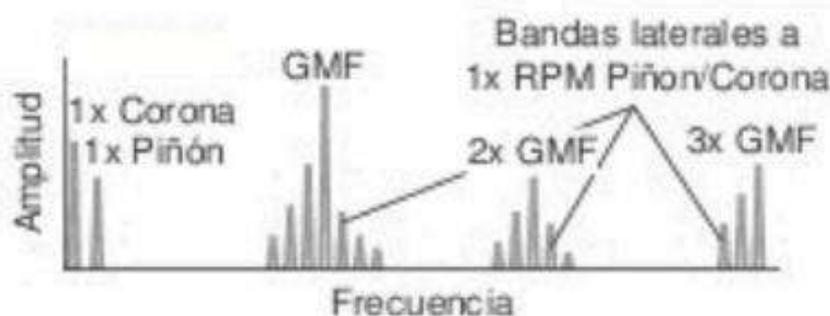


Figura 3.3.2.23 Espectro característico de un engranaje excéntrico o con backlash. Muchas bandas laterales alrededor de los armónicos de la frecuencia de engrane. [12]

- Compresores

El último equipo que se analiza es el compresor, que no representa un cambio más allá de ser un motor corriente con una cantidad de lóbulos, un acople por correas o engranajes, rodamientos y cojinetes dependiendo el tipo de compresor. Todos los elementos mencionados ya fueron analizados. La excepción que no ha sido mencionada hasta ahora es el caso de un compresor alternativo. El elemento no analizado hasta ahora es el sistema biela-manivela.

La característica distintiva del sistema biela-manivela es que los niveles de vibraciones son altos porque sobre el movimiento rotatorio del cigüeñal, la masa del pistón, siempre está variando la posición al centro de giro. Esto produce un desbalanceo, que, si bien se atenúa con los contrapesos del cigüeñal, no se logra cancelar. [12]

3.3.2.3. ANÁLISIS DE ACTIVOS PARA VIBRACIONES

La hipótesis base del mantenimiento predictivo asume que hay características medibles u observables, los cuales definen exactamente la condición de la máquina. Las magnitudes físicas que se van a monitorear se eligen de manera que puedan detectar en la forma más incipiente posible los problemas más probables que se espera encontrar en la máquina. El mantenimiento predictivo por control de vibraciones es una técnica que monitorea el comportamiento dinámico de la máquina. Esta técnica se basa en que fallos de elementos situados dentro o fuera de la máquina, especialmente sus elementos móviles, generan nuevas fuerzas dinámicas que afectan los niveles de algunas magnitudes dinámicas en puntos a los cuales se tiene acceso para realizar mediciones desde el exterior. Una vez definidas las magnitudes a monitorear, se sigue su evolución en el tiempo. Una extrapolación de los datos permitirá predecir cuándo serán alcanzados los niveles de estas magnitudes que se consideran peligrosas para que la máquina pueda seguir funcionando en forma segura.

Los niveles de alerta y peligro, punto fundamental en la confiabilidad del sistema, deberá ser consultado con el constructor de la máquina o basados en diversos estándares internacionales.

El plan de adquisición de datos, en todos los casos requiere de una descripción completa de los equipos a controlar, de la posición de los puntos de medida y de la selección adecuada de normas de referencia para la correcta implementación de las alarmas del sistema.

Un listado de datos podría ser el siguiente:

- Esquema general del sistema (indicando puntos de medición).
- Tipos de acople o correas de transmisión.
- Lubricante de cada punto.
- RPM de funcionamiento (pudieran ser más de una).
- Tipos de rodamientos (fabricante y código para determinar frecuencias de falla).
- Cantidad de álabes de una bomba, aspas de un ventilador, dientes de un engranaje o lóbulos de un compresor.
- Tipo de fundación. [12]

La importancia de una completa lista de activos se hace notar en este punto. En este punto se debe ampliar nuevamente la lista provisoria de la sección 3.2.3.

- Puntos de medición

Es conveniente que las mediciones se realicen sobre los cojinetes, sobre el alojamiento que soporta al cojinete o sobre otras partes estructurales que respondan significativamente a las fuerzas dinámicas y caractericen la vibración global de la máquina. La norma ISO 10816-1 indica los siguientes puntos para los distintos tipos de equipos. Se los clasifica en 4 casos y el quinto esquema es un ejemplo general de un equipo con distintos componentes. Se observa cada caso en las Figuras 3.3.2.24 a 28.

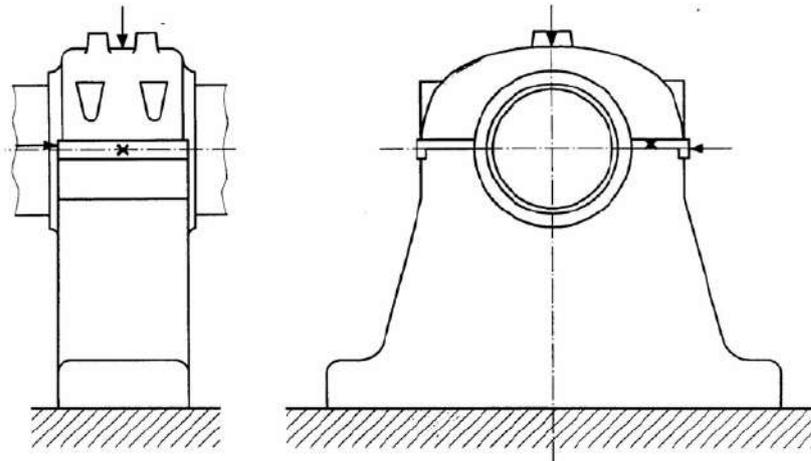


Figura 3.3.2.24 Caso 1: Puntos de medición para el pedestal de un cojinete. [37]

Este caso aplica a los cojinetes de A1G1, A1G2, B2C, C1P, C2P.

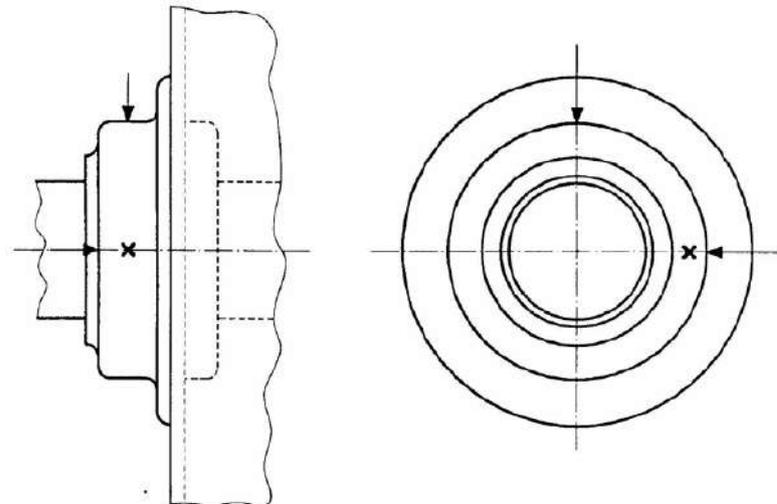


Figura 3.3.2.25 Caso 2: Puntos de medición para el alojamiento de un cojinete. [37]

El Segundo caso aplica a A1S1, A1S2, B1TB, B2B1, B2B2, B2C, C1P, C2P, C3C1, C3C2.

Se destaca que tanto en el caso 1 como en el 2 puede encontrarse la situación desventajosa de no poder acceder a los cojinetes internos de la máquina. Dicho casos donde no se tiene acceso a los cojinetes no se cuentan en la lista. Sí se agrega una nota entre la información del activo que debe aplicarse el mantenimiento preventivo para esos casos. Todos los componentes que no puedan ser incluidos en rutinas predictivas serán tenidos en cuenta para los cambios preventivos.

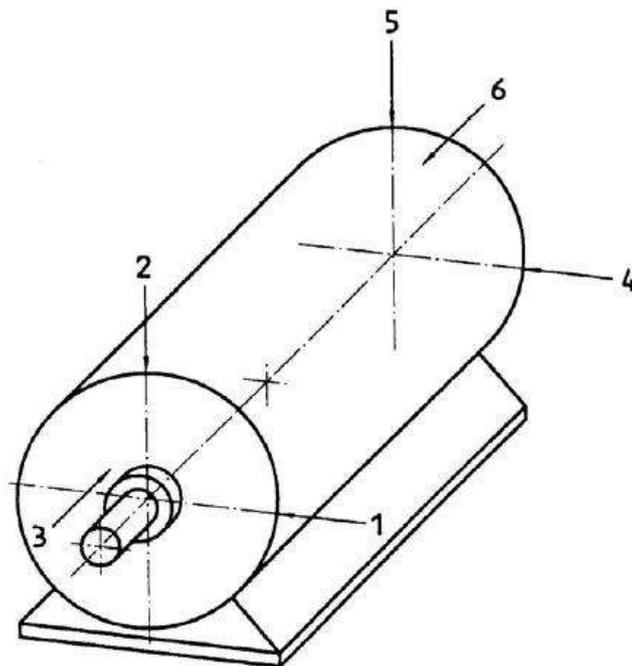


Figura 3.3.2.26 Puntos de medición para máquinas eléctricas pequeñas. [37]

El tercer caso es el más común en la fábrica ya que casi todos los equipos funcionan con motores eléctricos. La excepciones a este caso son los equipos con motores paso a paso controlados por un plc como son B1F (fresadora CNC), C1R, C2A.

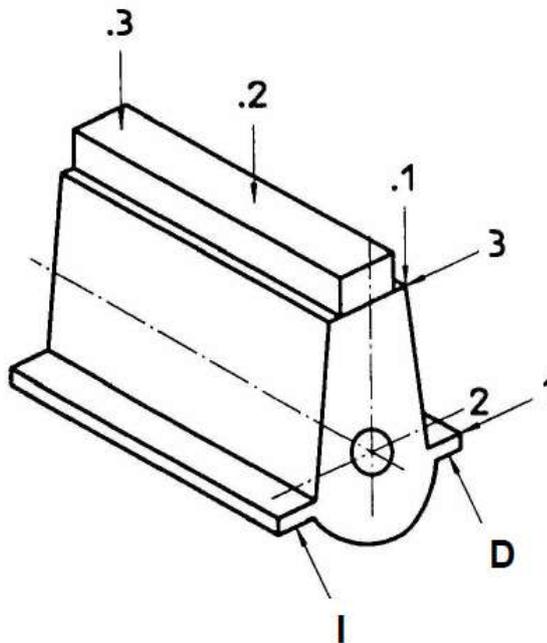


Figura 3.3.2.27 Caso 4: Puntos de medición para máquinas recíprocantes. [37]

El caso 4 se aplica a los compresores fijos de la planta. C3C1 y C3C2. Estos puntos de medición son los del lado del compresor alternativo. Todos los conjuntos compresores de la planta están accionados por un motor eléctrico y un acople de poleas.

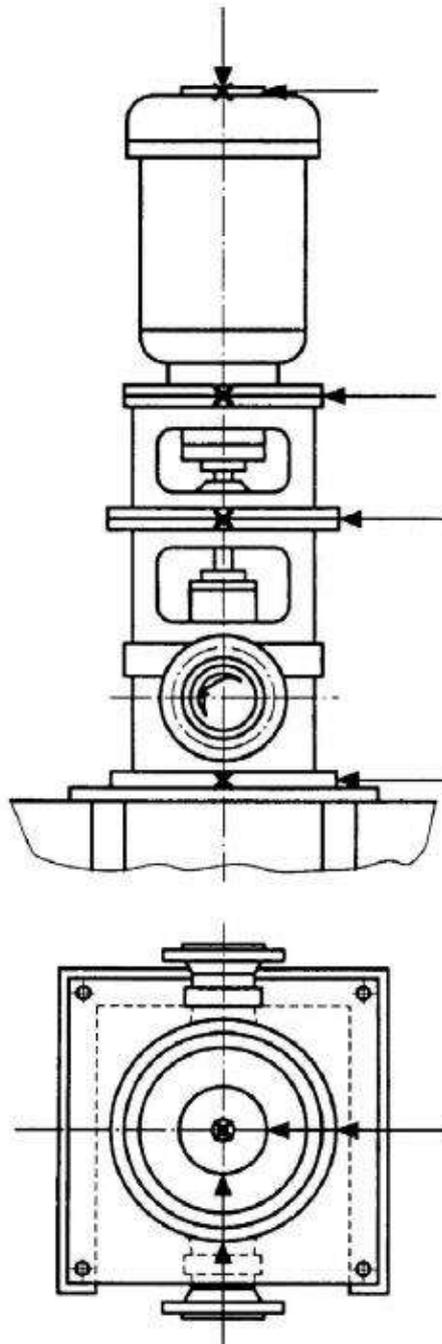


Figura 3.3.2.28 Puntos de medición para el conjunto de una máquina vertical. [37]

- Tipo de transmisión

Para esta clasificación tendremos dos tipos de acoples en planta, cajas de engranajes y poleas. Como se explicó en el análisis de dichos componentes, no alcanza con sólo mencionar el tipo. Para las poleas se requiere identificar la FFC (frecuencia fundamental de correa) que depende de la longitud de la correa y el diámetro de la polea. En el caso de la caja de engranajes se requieren la cantidad de ejes y el número de dientes.

En planta en estudio se encuentran engranajes reductores en la prensa B2P para los ejes inferiores donde no se tiene acceso sin desarmar la máquina. Ya que para analizar se requiere

que el equipo esté en funcionamiento se descarta el mantenimiento predictivo para estos equipos.

El resto de los equipos cuenta con transmisión por correas. Se encontraron correas trapezoidales clásicas tipo A y trapezoidales dentadas tipo A de distintas marcas y longitudes.

- Tipo de lubricante

El tipo de lubricante se especifica en los manuales de los equipos y para los casos de los rodamientos en su respectivo catálogo de fabricante. Estos datos ya están incluidos en los manuales de la lista de activos.

- RPM de funcionamiento

Las RPM es un dato de chapa de los motores eléctricos por lo que en su evaluación se tiene en cuenta ésta. Ya que todos los motores se encuentran en conjuntos con poleas o cajas reductoras se incluye el dato de las RPM del lado conducido.

En la lista inicial de activos se incluyeron las RPM del motor, pero para los ejes de las herramientas no se ha especificado aún.

Las transmisiones que se encontraron por correas se clasifican por su relación de transmisión. Si un equipo figura en varias relaciones de transmisión se aclara para qué movimiento. El taladro de banco B1TB posee varias velocidades, inclusive una relación 1:1.

Los equipos con una reducción 4:3 son B2B1/2, B1TB.

Los equipos con una reducción 2:1 son A1S1/2, A1G1/2, B2C (herramienta), B1T1/2, B1TB.

Los equipos con una reducción 3:1 son A2C1/2 (herramienta), A2E (herramienta), AC, B1E1/2, B2C (avance), C3C.

Los equipos con una reducción 5:2 son A2C1/2 (avance), A2E (avance).

- Tipo de rodamiento

Este dato se tiene en cuenta tanto para determinar las frecuencias de falla como para disponer de los repuestos necesarios. Se incluye como parte de la información dentro de los manuales de los equipos, en los que cuentan con manuales en planta.

En el caso de estudio sólo los equipos A2E, B1F, C2A y C2P cuentan con manuales con esta información. El resto aún conserva los rodamientos originales que en la mayoría de los casos ya no se fabrican. Para obtener esta información se recomienda utilizar la primera oportunidad cuando se realice un mantenimiento correctivo al equipo debido a una falla y tomar las medidas para identificar el posible reemplazo de los rodamientos de los equipos.

- Tipo de fundación

Puede ser rígida o flexible. El criterio de clasificación es el siguiente:

Si la primera frecuencia natural del sistema máquina-soporte en la dirección de la medición es mayor que su frecuencia principal de excitación (en la mayoría de los casos es la frecuencia de rotación) en al menos un 25%, entonces el sistema soporte puede ser considerado rígido en esa dirección. Todos los otros sistemas soportes pueden ser considerados flexibles. En algunos casos el sistema máquina-soporte puede ser considerado rígido en una dirección de

medición y flexible en la otra dirección. Por ejemplo, la primera frecuencia natural en la dirección vertical puede estar sobre la frecuencia principal de excitación mientras que la frecuencia natural horizontal puede ser considerablemente menor. Tales sistemas serían rígidos en el plano vertical y flexible en el plano horizontal. En estos casos, la vibración debe ser evaluada de acuerdo a la clasificación del soporte que corresponda en la dirección de la medición. [38]

- **Reporte**

Al igual que con los reportes de mediciones termográficas, el formato de los reportes de vibraciones depende del software de análisis y del equipo de medición.

La información que deben incluir es: fecha de medición, operario que realizó la medición, analista que realiza el informe, código de equipo, información del equipo (RPM, potencia, tipo de máquina, etc), observaciones sobre el equipo, fenómenos vibratorios detectados, valores medidos, de alarma y críticos, conclusiones.

3.3.2.4 CONCLUSIONES

El mantenimiento mecánico basado en análisis de vibraciones estará acompañado por la inspección predictiva de los operarios y la limpieza periódica de los equipos.

El personal de mantenimiento mecánico se apoyará en los resultados del análisis y de las incidencias reportadas por el personal de producción que son quienes mejor conocen los ruidos y condiciones operacionales de los equipos.

La implementación de la rutina de mantenimiento mecánico será esencial para evitar fallos inesperados de equipos y roturas prematuras de piezas. De esta manera, se reducen los costos por repuestos y por tiempos de producción muertos.

3.3.3. ALMACÉN DE REPUESTOS

Parte de la gestión del mantenimiento de una planta productiva incluye el almacenamiento y disponibilidad de repuestos. Se encarga de administrar los repuestos y consumibles intentando lograr un equilibrio entre ajustar el nivel de stock a la demanda de forma eficaz, asegurar un buen nivel de servicio y contener el costo de almacenamiento.

En el caso de estudio de la carpintería, el almacén actual cuenta con este equilibrio ya que no tiene espacio muerto ocupado por repuestos que no se requieren. Los resultados de la auditoría en este ámbito fueron mayoritariamente positivos por lo que se realizan recomendaciones sobre los puntos menos trabajados dentro de la correcta gestión del sector.

- **Criticidad**

El primer concepto a tener en cuenta es la aplicación de la criticidad dentro del manejo de repuestos. La dirigencia de la planta no había realizado una clasificación por probabilidad de ocurrencia de fallos y necesidad de repuestos. Más bien fueron identificando qué repuestos eran más críticos con la prueba y error. Tener paradas de días porque un repuesto era más difícil de conseguir de lo que se creía llevó a la decisión de tener una cantidad de stock mínimo.

Esto va de la mano de otro concepto que se aplica en la planta que es el de stock mínimo, máximo y el punto de pedido. El stock mínimo o de seguridad es, como bien indica el nombre, la mínima cantidad de un repuesto que es necesario tener para sobrellevar cualquier reemplazo antes de que llegue la compra. El stock máximo es la cantidad que permite el espacio físico para almacenar ese repuesto particular. Y el punto de pedido es la cantidad de un repuesto a partir del cual hay que realizar un pedido de compra. Por regla, el punto de pedido debe ser mayor al stock mínimo.

Volviendo a la criticidad, dentro de los equipos de criticidad alta pueden existir repuestos con distintos niveles de criticidad. La disponibilidad de proveedores, los plazos de reaprovisionamiento y la criticidad del equipo al que pertenecen pueden requerir que un repuesto sea crítico. Esto se regula con los niveles de stock mínimo, máximo y de pedido. Igualmente, repuestos críticos pueden no mantenerse en stock si el tiempo de reaprovisionamiento es mínimo. Para llegar a estas conclusiones puede aplicarse el diagrama de flujo de la Figura 3.3.3.1 recomendado por la bibliografía.

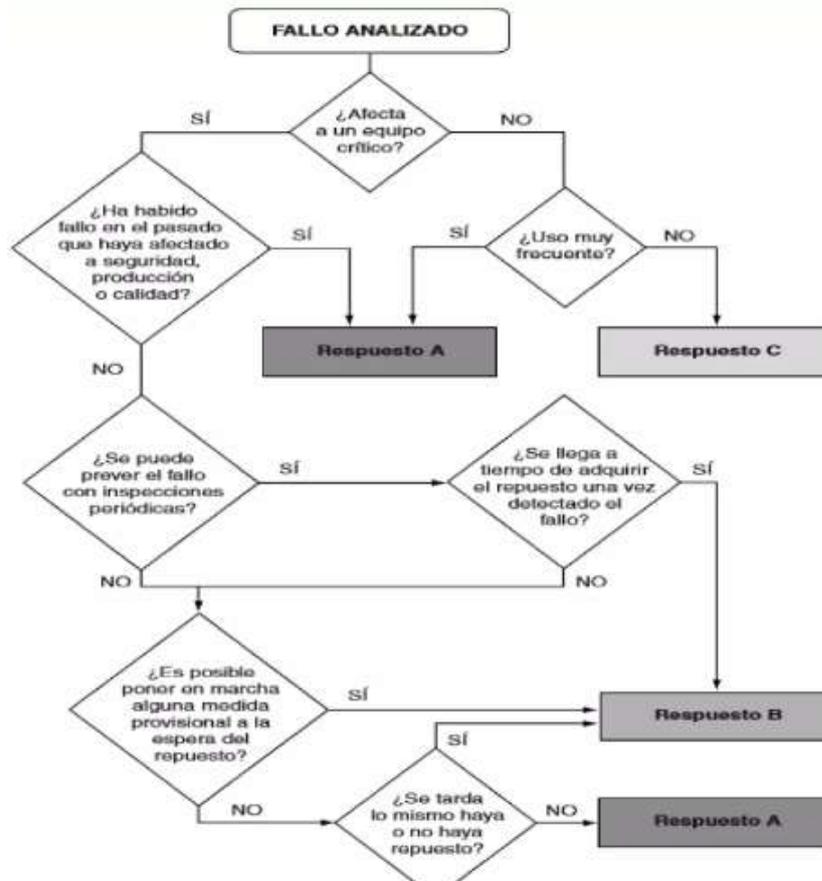


Figura 3.3.3.1 Diagrama de flujo de categorización de repuestos. Repuesto A: repuesto que debe permanecer en stock. Repuesto B: repuesto que no es necesario mantener en stock pero debe estar localizable. Repuesto C: resto. [25]

- Codificación

En el caso de estudio, dado que se utiliza una amplia variedad de consumibles y repuestos se utiliza una codificación numérica donde se asigna un número de 5 cifras indicando en la primera cifra si es 1 si es una pieza de repuesto específica (la resistencia de calentamiento del pegamento de la pegadora de cantos), 2 si es consumible (papel de lija), o 3 si es material técnico (tornillos). La segunda y tercera cifra indican el tipo de material (por ejemplo 01 corresponde a tornillos, 05 a rodamientos). Por último, las cifras cuarta y quinta indican el tamaño o modelo. Por ejemplo, el 10511 es el tipo de rodamiento 11 que en la lista del inventario se corresponde con SKF 6203 2RS. Esta es la manera con la que se manejan actualmente en la planta y por los resultados del relevamiento de planta y la auditoría funciona correctamente.

Dado que el sistema de almacenamiento funciona y se encuentra registrado en una planilla antigua con la que el encargado del pañol ubica de manera eficiente los elementos no se modifica el criterio.

El cambio a realizar en este punto es la inclusión de los códigos de repuestos que corresponden con cada activo. De tal manera que en la lista completa de activos se podrá encontrar una lista con el nombre y código de los repuestos correspondientes. Así como los posibles proveedores de los repuestos, especialmente de los que no se mantienen en stock.

- Sistema informático

Pensando en la dependencia que tiene actualmente el caso de estudio en la carpeta donde se anota el inventario, se requiere aplicar un sistema que permita tener de manera digital la información para no perderla. No se requiere más que una planilla de cálculo donde se transcriba todo el inventario que actualmente se encuentra en papel y se escriben con lápiz las cantidades.

Además de evitar que se pierda la información, una planilla de cálculo en computadora puede permitir tener un registro histórico de los retiros de material, los resultados de auditorías periódicas de comparación entre stock esperado y stock real, además de otros beneficios que trae aparejada esta tecnología.

Con el paso del tiempo pueden ir implementándose estas modificaciones y medir los resultados con indicadores como se profundizará en su sección correspondiente.

CONCLUSIÓN

A la buena gestión de repuestos del almacén actual se adicionan tres ejes sobre los cuales mejorar. Un estudio de criticidad de repuestos y un sistema de codificación alineados a los realizados sobre los equipos. Y además, un sistema informático para no depender de la memoria de una persona o de un material fácilmente dañable como lo es el papel, sumado a los demás beneficios que provee la digitalización.

3.3.4. ANÁLISIS DE FALLOS

El análisis de fallos es una herramienta de toma de decisiones que permite, mediante la investigación de las causas de falla, identificar dónde y qué acciones deben realizarse para evitar que sigan ocurriendo.

Esta herramienta es parte del modelo de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM - Reliability Centered Maintenance) el cual requiere un cambio integral en la forma de trabajar de la planta y suele aplicarse a industrias grandes. En el caso de estudio, al ser una PyME de muchos años, no es recomendable la implementación de estos modelos de grandes empresas. Sí se considera que es necesaria la aplicación simplificada del análisis de fallos ya que actualmente, por los resultados de la auditoría, se trabaja de manera intuitiva y no se poseen conocimientos en el tema. La filosofía de mejora continua se debe aplicar de manera paulatina para casos resistentes al cambio como el del presente proyecto.

3.3.4.1. CLASIFICACIÓN

Lo primero que se hará en este caso es clasificar los fallos y averías comenzando con definir ambos conceptos. Se define a un fallo como a un cambio en un equipo o elemento del mismo que impide que realice la función para la que fue diseñado. Por otra parte, una avería es el resultado de una falla que ha ocurrido en el equipo y que lo ha dejado inoperativo o en condiciones peores a las normales. La avería es la consecuencia directa de una falla no tratada a tiempo y requiere una intervención para reestablecer la función. [39]

La clasificación de fallas se divide teniendo en cuenta ocho criterios. No siempre es posible clasificar a un fallo dentro de los ocho criterios, pero cuanto más se caracterice al problema mejor funciona la herramienta de análisis.

- Aparición

Puede producirse de manera súbita o paulatina. Las fallas súbitas no pueden detectarse hasta que ocurren y son inesperadas. Las fallas paulatinas son detectables y van dando indicios de que van a ocurrir.

- Dimensión

Un fallo parcial no implica la parada del equipo mientras que un fallo total provoca la parada inmediata del equipo. En esta categoría hay que tener en cuenta que un fallo parcial sin tratamiento puede llevar a un fallo total.

- Momento en el que ocurre

Esta clasificación está ligada a los patrones de comportamiento de las fallas que se comentarán más adelante.

La falla puede ocurrir en la edad temprana del equipo, la llamada mortalidad infantil a las primeras horas de marcha. Esto puede deberse a defectos de fabricación o de instalación del equipo.

El otro momento en el que ocurre una falla es al final de la vida útil debido al desgaste propio del uso. El deterioro progresivo es detectable y este fallo no es inesperado.

La tercera categoría dentro de esta clasificación es el fallo aleatorio. Este tipo de falla no está relacionado al desgaste ni a defectos de instalación. Pueden ocurrir en cualquier momento de la vida útil de un equipo.

- Duración

La clasificación por la duración no es tan intuitiva ya que no depende de cuánto tiempo existe la condición ya que de eso depende el tiempo de reacción del mantenimiento. La clasificación es si es estable, pasajera o intermitente. Una falla estable es una falla que permanece hasta que se realice el mantenimiento. Una falla pasajera es de origen aleatorio y al irse dicha condición desconocida la falla se va también. Por último, la falla intermitente está relacionada a características cambiantes del proceso, haciendo que la falla ocurra en los intervalos de dicha condición.

- Origen

En esta clasificación tenemos dos opciones. El origen directo es ocasionado por un elemento propio del sistema, línea de producción o equipo. Como ejemplo de este caso es un fallo ocasionado por la vibración propia del equipo desbalanceado. El origen indirecto es un efecto derivado de otros componentes ajenos. Tal es el caso de un fallo ocasionado por la vibración del entorno.

- Información

Esta clasificación hace énfasis en si se conocen los orígenes de la falla o su existencia. Una falla manifiesta es cuando se tiene información sobre su existencia o su origen mientras que una falla oculta es la cual no hay métodos de detección o no se utilizan.

- Causas

La clasificación por causas abarca las posibilidades en las causas de una falla. Esta clasificación tiene la particularidad de que tiene infinitas posibilidades si se quiere. Por este motivo se generalizan las causas y sólo se aplica cuando sean conocidas. Una falla puede estar causada por una falla en el material, un error humano del personal de operación, un error humano del personal de mantenimiento o por condiciones externas anómalas.

Si se quiere profundizar más para que la caracterización sea más completa, la falla en el material a su vez puede deberse a errores de diseño o subdimensionamiento, al desgaste, a la rotura o a la fatiga. El error humano del personal de operación puede ser un error de interpretación de parámetros de funcionamiento, una actuación incorrecta ante una falla parcial, factores físicos, factores psicológicos o falta de instrucciones claras o procedimientos. El error humano del personal de mantenimiento puede deberse a observaciones erróneas de parámetros predictivos, al montaje o desmontaje sin seguir buenas prácticas de trabajo, a no respetar tolerancias de ajustes, a la reutilización de elementos defectuosos o al uso de herramientas o repuestos inadecuados. Dentro de las condiciones externas anómalas pueden dividirse las condiciones de operación diferentes a las de diseño, a temperatura, humedad o suciedad, al suministro eléctrico o a servicios industriales no apropiados.

- Tipo de componente

En esta categoría no se refiere al activo sino el componente que falló. Puede ser un componente mecánico, un componente electrónico/eléctrico o software.

En el caso de las averías la clasificación es en con un solo criterio y ese es el tipo de avería en sí.

Una avería puede ser permanente o crónica, esta es la que persiste hasta que no se elimina por una modificación u operación de mantenimiento.

Por otra parte, puede ser intermitente, es decir, que es una avería temporal cuya manifestación se repite.

La siguiente categoría son las averías latentes. Ésta no se hace evidente, puede revelarse por métodos de diagnósticos o por un fallo.

Por último, la avería sistemática se produce cada vez que concurren condiciones de utilización particulares.

3.3.4.2. PATRONES

Los fallos no siempre se presentan de la misma manera, por eso a lo largo de los años se ha tratado de identificar patrones de aparición para, en caso de identificar cada caso, se puede evitar que ocurran nuevamente en ese o en otros equipos.

Se va a analizar seis patrones bien definidos cada uno con una curva característica de probabilidad vs tiempo de uso. Tres de estos patrones están asociados a la edad de los activos mientras que los otros tres son patrones que pueden ocurrir de manera aleatoria independientemente de si el equipo es nuevo o no.

Los patrones relativos a la edad son la curva de la bañera, la curva de envejecimiento y la curva de fatiga. [40]

- Patrón A: Bañera

La curva de la bañera tiene una alta probabilidad de presentarse cuando el activo es nuevo, seguido de un bajo nivel de fallos aleatorios y, finalmente, hay un fuerte aumento hacia el final de su vida. Este patrón representa el 4% de las ocurrencias.

La curva de la bañera se forma por 3 sectores indicados en la Figura 3.3.4.1.

Mortalidad infantil: Al principio de la vida del activo, son frecuentes sus fallos relacionados con problemas como defectos de fabricación, errores de instalación o puesta en marcha.

Vida útil: En esta fase, sus fallas son aleatorias, causadas por esfuerzos repentinos, condiciones extremas y errores humanos. Son fallas que no son predecibles por el tiempo durante la "vida útil" de la máquina o equipo.

Período de desgaste: Durante este período, luego de un cierto período de uso, sus fallas son causadas por el desgaste causado por problemas surgidos al final de la vida útil de la máquina o equipo.

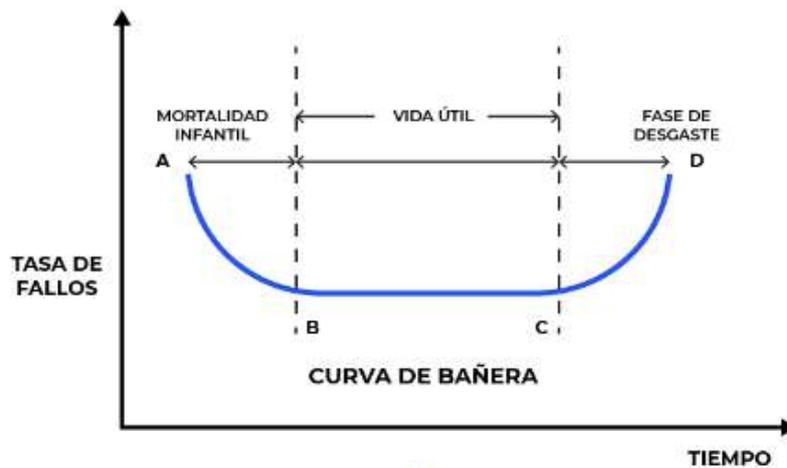


Figura 3.3.4.1 Curva de la bañera. Se indican los tres sectores que forman la bañera. [41]

- Patrón B: Envejecimiento

Se caracteriza por un bajo nivel de fallos aleatorios seguido por un aumento acentuado de los fallos al final de su vida útil, siendo el 2% el motivo de los fallos. Es la parte final de la curva de la bañera. También se lo llama desgaste por uso o desgaste tradicional.

- Patrón C: Fatiga

El patrón C se conoce como la “curva de fatiga”, y se caracteriza por un nivel creciente de fallos durante la vida útil del activo. Es responsable de aproximadamente el 5% de los fallos.

Los tres patrones restantes son llamados patrones aleatorios ya que no dependen de la edad de los activos. Estos son el período inicial de acostumbramiento, el patrón aleatorio y la mortalidad infantil.

- Patrón D: Acostumbramiento

Se le llama el patrón inicial de acostumbramiento, ya que comienza con un nivel de fallos muy bajo y luego aumenta, llegando a un nivel constante. En dicho valor constante los fallos son aleatorios. El patrón D es la razón del 7% de los fallos.

- Patrón E: Aleatorio

En el patrón de fallo E, los fallos son aleatorios y constantes a lo largo de la vida útil del activo, por lo que es responsable del 11% de los fallos.

- Patrón F: Mortalidad infantil

Este patrón se conoce como la curva de mortalidad infantil y muestra una alta tasa inicial de fallos seguida de un nivel aleatorio de fallos. El patrón F es la causa del 68% de las fallas.

En la Figura 3.3.4.2 se muestran las curvas de los patrones de fallos con el porcentaje de ocurrencia en equipos [39].

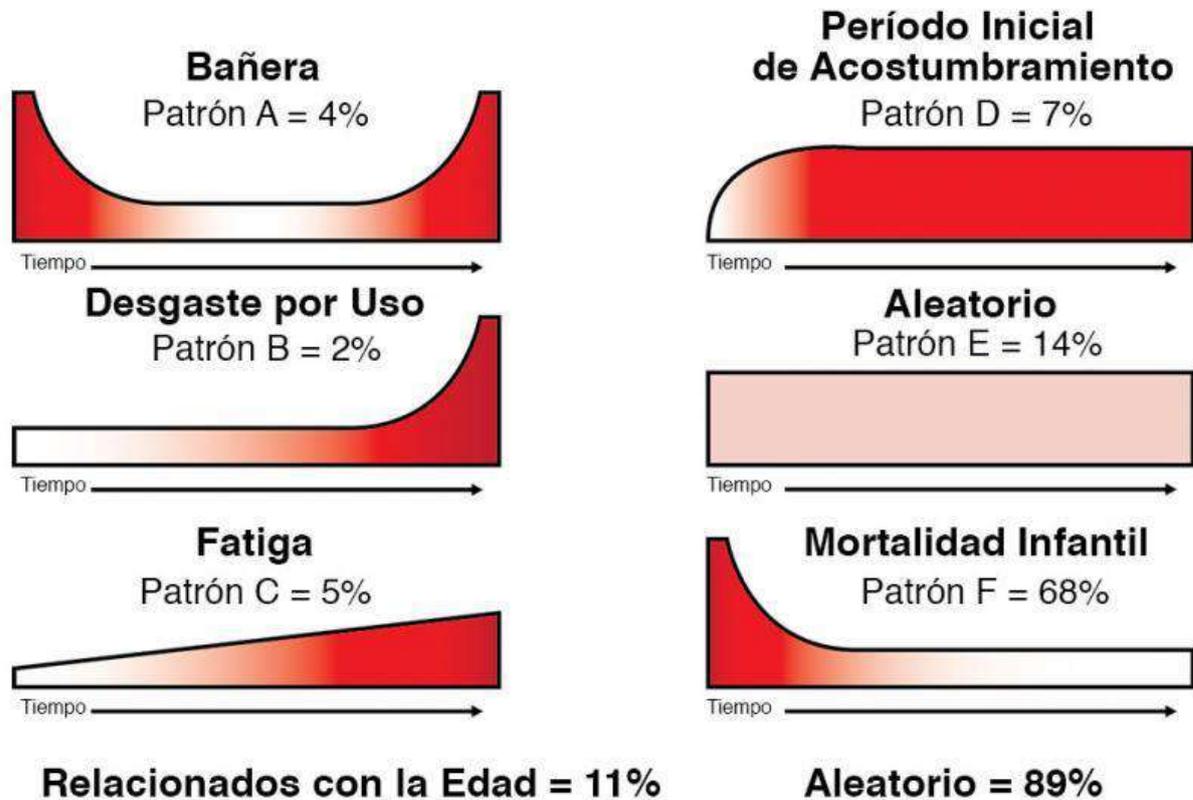


Figura 3.3.4.2 Patrones de aparición de fallos en equipos. Los porcentajes son según bibliografía. [41]

3.3.4.3. ANÁLISIS

El mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) basa la toma de decisiones en la previsión de cada posible modo de fallo, de cada modo de fallo todas sus posibles causas y de dichas causas los motivos que la originaron. Luego a cada uno se le realiza un estudio de criticidad en base a probabilidad de ocurrencia y daños que causaría dicho modo de falla. Como ya se mencionó, dado el hecho de que se trabaja sobre una PyME que no realiza ningún tipo de análisis ni posee personal con experiencia o capacitación sobre el tema, no se puede esperar aplicar este nivel de detalle y responsabilidad integral de toda la empresa sino algo progresivo y que involucre poca gente en un principio. En este punto se hace una distinción ya que el sistema de análisis del RCM no puede aplicarse de manera "diluida" ya que pierde su capacidad de ayudar en la toma de decisiones. Por ese motivo, respecto al análisis, se recurre a otras herramientas que en menor medida ayudan a encontrar el origen de un fallo. Estas herramientas son más visuales y facilitan su implementación.

La primera herramienta de análisis de fallos es el diagrama espina de pescado, diagrama causa-efecto o diagrama de Ishikawa. Este método se basa en que múltiples causas producen

la avería. Con esa premisa se requiere analizar dichas causas de manera sistemática, pasando a cada una por diversas dimensiones de análisis.

En el diagrama, se separa como la cabeza del pescado al problema, la descripción del problema debe ser lo más clara y concisa posible, aclarando cuándo ocurrió y en qué circunstancias. Por ejemplo, se corta la correa del sistema de avance de la lijadora de contacto B2C el miércoles 5/8/2022 a las 15:32h durante el proceso de lijado de un marco de puerta estándar. Desde el lado de las causas hasta el problema debe ir la espina central, de la cual se desprenden las seis espinas laterales: hombre, máquina, entorno, material, método y medida.

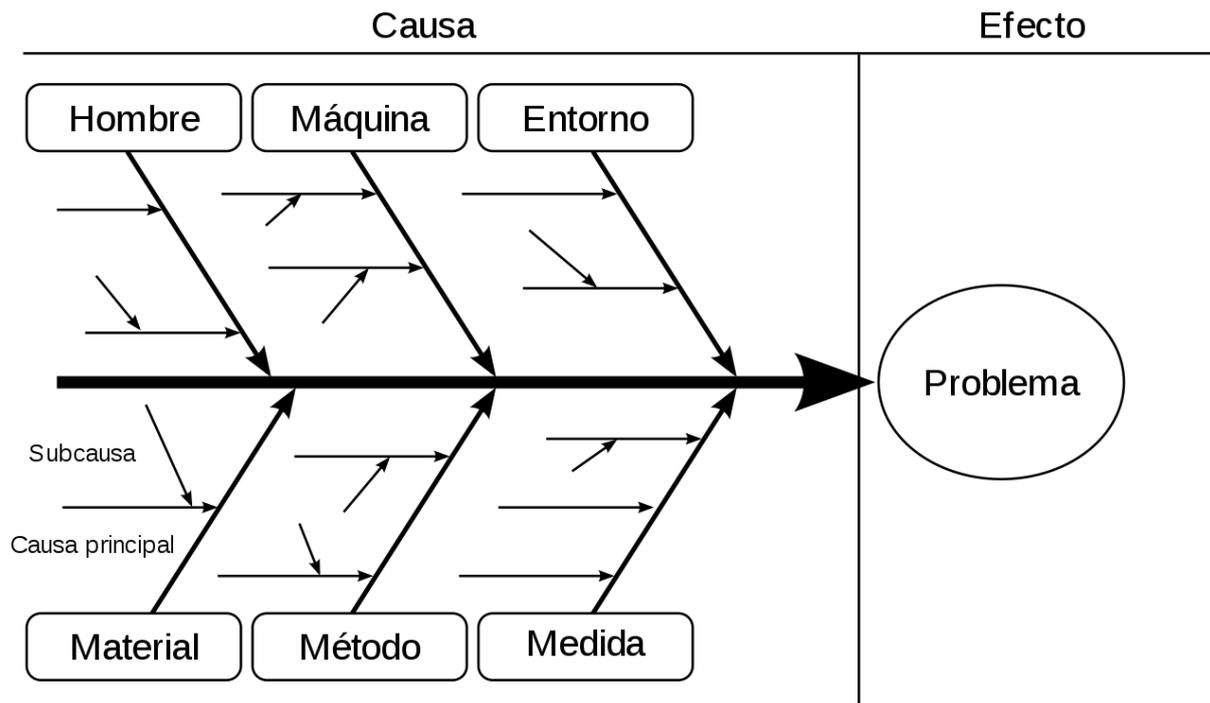


Figura 3.3.4.3 Diagrama de Ishikawa o de espina de pescado como puede observarse por su forma que se asemeja a las espinas de un pescado. [25]

Luego de tener el diagrama en blanco, se debe completar con las posibles causas en cada categoría. Siguiendo con el ejemplo, se podrían colocar en las causas principales: Hombre: error en la colocación del marco en máquina, error en la colocación de la correa; Máquina: estado del equipo B2C; Entorno: exceso de aserrín en el equipo, aceite o agua en la correa; Material: estado de la correa; Método: predictivos incorrectos; Medida: vibraciones en la polea, corriente del motor.

De cada causa pueden escribirse también las subcausas para tener mayor detalle. Una subcausa de la correa en mal estado puede ser la falta de inspección visual.

Lo que se recomienda es reunir a las personas afectadas, en el caso del ejemplo serían el operario de turno al que se le rompió la correa y el encargado del mantenimiento del equipo. Cada persona involucrada debe estar interiorizada en toda la información reunida sobre el fallo. Juntos deben plantear las hipótesis en cada dimensión. Para cada dimensión o categoría debe preguntarse el por qué. Según el creador del método, Ishikawa Kaoru, debe preguntarse el por qué unas cinco veces para llegar a la causa raíz de esa hipótesis. Toda la información que surja de esta etapa debe quedar asentada para su posterior análisis.

La etapa de análisis debe incluir pruebas e investigación para tener un sustento técnico en el análisis y estimación de probabilidad e importancia de las causas en la falla final.

El plan de acción debe enfocarse en las causas que resultaron del análisis. El enfoque con el que se plantea el plan de acción es el del diagrama de Pareto. El diagrama de Pareto es un gráfico que ayuda a identificar la regla de 80-20, el 20% de las causas produce el 80% de los problemas.

Los pasos para formar el diagrama de Pareto según la bibliografía son los siguientes:

- 1) Seleccionar categorías lógicas para el tópico de análisis identificado (incluir el período de tiempo).
- 2) Reunir datos. Pueden utilizarse datos registrados anteriormente
- 3) Ordenar los datos de la mayor categoría a la menor.
- 4) Totalizar los datos para todas las categorías.
- 5) Calcular el porcentaje del total que cada categoría representa.
- 6) Trazar los ejes horizontales (x) y verticales (y primario - y secundario)
- 7) Trazar la escala del eje vertical izquierdo para frecuencia (de 0 al total, según se calculó anteriormente).
- 8) De izquierda a derecha trazar las barras para cada categoría en orden descendente.
- 9) Trazar la escala del eje vertical derecho para el porcentaje acumulativo, comenzando por el 0 y hasta el 100%.
- 10) Trazar el gráfico lineal para el porcentaje acumulado, comenzando en la parte superior de la barra de la primera categoría (la más alta).
- 11) Dar un título al gráfico, agregar las fechas de cuando los datos fueron reunidos y citar la fuente de los datos.
- 12) Analizar la gráfica para determinar el 20% responsable del 80% de los problemas. [42]

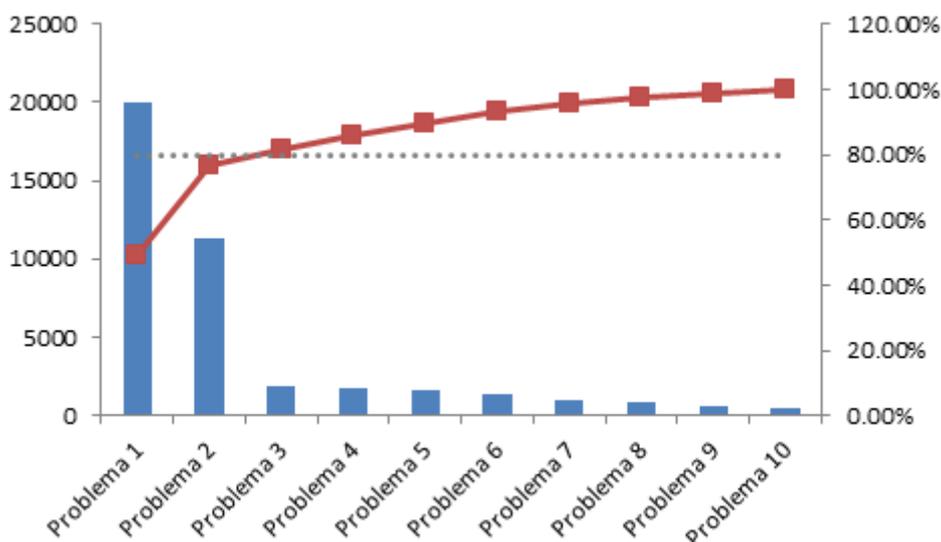


Figura 3.3.4.4 Ejemplo de un diagrama de Pareto. En el eje derecho los porcentajes acumulados y en el eje izquierdo valores de frecuencia de ocurrencia. En el eje horizontal se colocan las categorías de problemas. [42]

En el ejemplo de la Figura 3.3.4.4 se observa que los problemas 1 y 2 son la causa del 80% de los fallos. Por ende, se deben tomar las decisiones en base a solucionar esos dos problemas y sus causas con prioridad.

3.3.4.4. CONCLUSIONES

El análisis de fallos representa una herramienta esencial para la toma de decisiones. En el caso de estudio se implementa el diagrama de Ishikawa para los casos puntuales y el diagrama de Pareto para el análisis en general. Ambos métodos proveen información clave para lo cual se requiere capacitación del personal en su uso.

Esta herramienta permitirá tomar decisiones basadas en un análisis y no puramente en intuición.

3.4. PLAN DE MEJORAS

En el área de mantenimiento podemos identificar fácilmente una fracción técnica que se encarga de que los equipos trabajen de la manera esperada, sin paradas inesperadas ni bajas en calidad o productividad. De eso se encarga el plan de mantenimiento. Por otro lado, usualmente olvidado y a veces separado completamente del mantenimiento, se encuentra la gestión del mismo. Dentro de la gestión del mantenimiento podemos encontrar un conjunto de ramas de la organización industrial que no suelen relacionarse al mantenimiento mas no deberían desunirse. En esta sección se plantean mejoras en la gestión del mantenimiento.

3.4.1. INDICADORES

Como parte de las mejoras en la gestión del mantenimiento para el caso de estudio se comienza con la medición de indicadores. Los KPI permiten obtener información útil sobre el desempeño de la gestión, sobre el estado de los activos o sobre la eficacia de una medida correctiva.

Una de las cosas que se debe definir es, entonces, cuáles serán esos indicadores. Hay que tener cuidado en la elección, pues se corre el riesgo de utilizar como tales una serie de números que no nos aporten ninguna información útil. Se corre el riesgo de tomar datos, procesarlos y obtener a cambio otros datos. Los indicadores a continuación expuestos son de uso ampliamente difundido en la industria, pero no significa que sean aplicables al caso de estudio. En cada uno se aclara cuál es su uso en la planta del presente proyecto y en qué etapa del plan de mantenimiento y mejora se aplicaría.

Siguiendo con la línea de que el caso de estudio es una PyME y para vencer la resistencia al cambio se plantean cambios pequeños y paulatinos que acompañen el crecimiento de la empresa.

Los indicadores se irán definiendo según su categoría. Como se mencionó anteriormente, los KPI pueden utilizarse para distintos casos. Es importante que cada uno tenga un objetivo detrás de su utilización.

Los objetivos deben plantearse con el criterio S.M.A.R.T. que es un acrónimo nemotécnico en inglés para decir específico, medible, alcanzable, relevante y a tiempo (specific, measurable, assignable, realistic and time-related). Este criterio especifica que, a la hora de plantear un objetivo, el mismo debe cumplir con ser claro y entendible, debe poder medirse (con el o los KPI correctos), debe ser posible de realizar, debe ser importante y útil para la gestión de la planta y debe plantearse para un período de tiempo razonable con la medición.

Otro concepto a aplicar en el caso de estudio es el cascadeo de objetivos. Esto significa que se asignan objetivos aguas abajo y aguas arriba del sector de mantenimiento. Siempre los objetivos de la cascada se relacionan con un objetivo común planteado desde el mantenimiento. Un ejemplo de esto es el simple caso de cuando el encargado del mantenimiento no tiene tiempo de tomar las mediciones de los indicadores para un objetivo propio. Se cascadea hacia abajo el objetivo de que los operarios se acostumbren a llenar una simple planilla con el indicador al final del día o cuando ocurre una falla y se cascadea aguas arriba el objetivo de que la gerencia fomente el llenado de planillas para medición de KPI.

3.4.1.1. ÍNDICES DE DISPONIBILIDAD

- Disponibilidad total

Es sin duda el indicador más importante en mantenimiento, y por supuesto, el que más posibilidades de 'manipulación' tiene. Si se calcula correctamente, es muy sencillo: es el cociente de dividir el número de horas que un equipo ha estado disponible para producir con el número de horas totales de un periodo:

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{Horas totales} - \text{Horas de parada mante.}}{\text{Horas totales}} \quad (3.4.1.1)$$

En la planta del caso de estudio los equipos no estén dispuestos por líneas exclusivas. Por eso es interesante definir una serie de equipos significativos, pues es seguro que calcular la disponibilidad de absolutamente todos los equipos será largo, laborioso y no nos aportará ninguna información valiosa. Del total de equipos de la planta, debemos seleccionar aquellos que tengan alguna entidad o importancia dentro del sistema productivo. En nuestro caso serán los equipos de criticidad alta, los de 3 a 5.

Una vez obtenida la disponibilidad de cada uno de los equipos significativos, debe calcularse la media aritmética, para obtener la disponibilidad total de la planta.

$$\text{Disp Total} = \frac{\sum \text{Disp de equipos críticos}}{N^{\circ} \text{ de equipos críticos}} \quad (3.4.1.2)$$

- Disponibilidad por avería

La disponibilidad por avería no tiene en cuenta, pues, las paradas programadas de los equipos. Igual que en el caso anterior, es conveniente calcular la media aritmética de la disponibilidad por avería, para poder ofrecer un dato único.

$$\text{Disp por avería} = \frac{\text{Horas totales} - \text{Horas paradas por avería}}{\text{Horas totales}} \quad (3.4.1.3)$$

Actualmente este índice no tendría sentido ya que sólo se paran los equipos por averías. El sentido de este indicador yace en ir analizando a lo largo del tiempo la eficacia de las medidas programadas por el mantenimiento predictivo. A medida que el mantenimiento predictivo vaya antecediendo las fallas y se planifiquen paradas de mantenimiento se podrá comparar con los tiempos que se perdían sin estas técnicas predictivas.

Otro uso de este indicador vendrá de la mano de cualquier medida que se tome respecto al mantenimiento de planta o de equipos específicos.

- MTBF (Mid Time Between Failure, tiempo medio entre fallos)

Este es un indicador ampliamente usado en el mundo que mide el tiempo promedio que transcurre entre fallas. Se calcula dividiendo el número de horas analizado sobre el número de fallos en ese tiempo.

$$MTBF = \frac{N^{\circ} \text{ de horas del período}}{N^{\circ} \text{ de averías en el período}} \quad (3.4.1.4)$$

Este indicador es útil tanto para el cascadeo de objetivos como para la visibilidad de las mejoras en mantenimiento. Se puede medir con una simple planilla pegada en la pared del taller donde el operario de un equipo crítico escribe semanal o mensualmente cada vez que ocurre un fallo y todos los meses observar el decrecimiento o aumento de fallas plasmado en un gráfico o número.

- MTTR (Mid Time To Repair, tiempo medio de reparación)

Se calcula como el número de horas de paro por averías sobre el número de averías y representa el promedio del tiempo de parada de cada avería.

$$MTTR = \frac{N^{\circ} \text{ de horas de paradas por avería}}{N^{\circ} \text{ de averías}} \quad (3.4.1.5)$$

Dependiendo del objetivo, este indicador puede representar la eficiencia del mantenimiento o la gravedad de las averías.

Como utilidad extra del MTTR y el MTBF se encuentra que con ambos se puede calcular la disponibilidad por avería de la siguiente manera: [43]

$$\text{Disp. por avería} = \frac{MTBF - MTTR}{MTBF} \quad (3.4.1.6)$$

3.4.1.2. ÍNDICES DE PROPORCIÓN DE TIPO DE MANTENIMIENTO

Los datos que aportan todos estos índices es el porcentaje del mantenimiento dedicado a cada tipo. Con esos datos, dependiendo del objetivo se puede obtener información sobre los cambios en la proporción de tipos de mantenimiento de acuerdo a las decisiones que se toman. En el caso de estudio, se pasará de un estado donde la totalidad de la proporción del mantenimiento es dedicada al mantenimiento correctivo y de emergencia a un estado donde habrá horas de mantenimiento programado, correctivo y de emergencia. Una vez pasada la etapa transitoria de implementación inicial se podrán tomar decisiones sobre el mantenimiento y contar con estas herramientas para verificar la eficacia de dichas medidas.

- Índice de Mantenimiento Programado

Representa el porcentaje de las horas totales dedicado a mantenimiento programado.

$$IMP = \frac{\text{Horas dedicadas al mantenimiento programado}}{\text{Horas dedicadas al mantenimiento}} \quad (3.4.1.7)$$

- Índice de Mantenimiento Correctivo

Representa el porcentaje de las horas totales dedicado a mantenimiento correctivo.

$$IMC = \frac{\text{Horas dedicadas al mantenimiento correctivo}}{\text{Horas dedicadas al mantenimiento}} \quad (3.4.1.8)$$

- Índice de Mantenimiento de Emergencia

Representa el porcentaje de las horas totales dedicado a órdenes de trabajo de prioridad máxima. [43]

$$IME = \frac{\text{Horas dedicadas al mantenimiento de emergencia}}{\text{Horas dedicadas al mantenimiento}} \quad (3.4.1.9)$$

3.4.1.3. ÍNDICES DE SEGURIDAD

Los índices de seguridad laboral pueden clasificarse en proactivos y reactivos. Los proactivos se enfocan en las observaciones de seguridad y reportes de incidentes o cuasi accidentes. Los índices reactivos reportan la frecuencia y severidad de los accidentes. Los objetivos de estos índices se relacionan con verificar la efectividad de las medidas preventivas respecto a la seguridad laboral o la necesidad de las mismas.

- Índice de frecuencia de accidentes

Indica la cantidad de accidentes por cantidad de horas. Da noción del volumen de accidentes sin tener en cuenta la gravedad de los mismos.

$$IF = \frac{\text{N}^\circ \text{ de accidentes con baja} \times 1.000.000}{\text{Horas trabajadas}} \quad (3.4.1.10)$$

- Índice de jornadas perdidas

Indica la cantidad de días perdidos por las horas trabajadas. Aporta información sobre la gravedad de los accidentes.

$$IP = \frac{\text{N}^\circ \text{ de jornadas perdidas por accidentes} \times 1000}{\text{Horas trabajadas}} \quad (3.4.1.11)$$

- Observaciones por colaborador

Indica la cantidad de observaciones de faltas a las medidas de seguridad que realizan los operarios. [43]

$$\text{Observaciones} \times \text{colaborador} = \frac{\text{Observaciones} \times \text{semana}}{\text{N}^\circ \text{ de colaboradores}} \quad (3.4.1.12)$$

3.4.1.4. GESTIÓN DEL ALMACÉN

Para la aplicación de los indicadores de gestión del almacén técnico primero se requiere el control de stock y la selección de un responsable que registre los movimientos. En el caso de estudio no es la situación actual, pero a medida que se apliquen las mejoras en procesos pueden llegar a ser útiles.

- Rotación del almacén

Es el cociente de dividir el valor de los repuestos consumidos totales y el valor del material que se mantiene en stock (valor del inventario de repuestos).

$$\text{Rotación} = \frac{\text{Valor de repuestos consumidos}}{\text{Valor total de repuestos}} \quad (3.4.1.13)$$

Hay una variación interesante de este índice, cuando se pretende determinar si el stock de repuestos y consumibles está bien elegido. Si es así, la mayor parte del material que consume mantenimiento lo toma del almacén, y solo una pequeña parte de lo comprado es de uso inmediato. Para determinarlo, al índice ya explicado se le suma el siguiente:

$$\text{Origen de materiales} = \frac{\text{Valor repuestos consumidos almacen}}{\text{Valor total repuestos consumidos}} \quad (3.4.1.14)$$

Otra forma de conocer si el almacén de mantenimiento está bien dimensionado es determinando la proporción de piezas con movimientos de entradas y salidas. Una utilidad de este índice es determinar qué porcentaje de piezas tienen escaso movimiento, para tratar de eliminarlas, desclasificarlas, destruirlas, venderlas, etc.:

$$\% \text{ Piezas con movimiento} = \frac{\text{Piezas con movimiento}}{\text{Piezas totales}} \quad (3.4.1.15)$$

- Tiempo medio de recepción de pedidos

Es la media de demora desde que se efectúa un pedido hasta que se recibe. Este índice se puede calcular por muestreo (tomar al azar un número determinado de pedidos cursados y realizar la media aritmética del tiempo transcurrido desde su petición hasta su recepción en cada uno de ellos) o a partir del total de pedidos realizados. [43]

$$\text{Tiempo de demora} = \frac{\sum \text{demora de cada pedido}}{N^{\circ} \text{ de pedidos total}} \quad (3.4.1.16)$$

3.4.1.5. ÍNDICES DE FORMACIÓN

Como se comentó en la auditoría, la totalidad de la formación no está programada y es entrenamiento informal. En adición se tiene que no hay distinción entre el entrenamiento de

mantenimiento y el de producción. Los indicadores de esta sección se reservan para una etapa de la empresa donde se formalice la capacitación y el entrenamiento de campo de los operarios.

- Proporción de horas dedicadas a formación

Porcentaje de horas anuales dedicadas a formación, sobre el número de horas de trabajo total. Es un indicador para utilizar de forma comparativa, tanto con períodos anteriores como con otras empresas.

$$\% \text{ Horas de formación} = \frac{\text{Horas de formación}}{\text{Horas totales}} \quad (3.4.1.17)$$

- Proporción del desarrollo del programa

Porcentaje de horas de formación realizadas, sobre el total de horas de formación programadas. Este indicador es una medida del avance del programa de formación. Facilita la programación a largo plazo y la justificación frente a la gerencia de la necesidad de asignar horas de formación para alcanzar los objetivos fijados. [43]

$$\% \text{ Desarrollo} = \frac{\text{Horas de formación realizadas}}{\text{Horas de formación programadas}} \quad (3.4.1.18)$$

3.4.1.6. ÍNDICES DE COSTE

Para el caso de estudio donde no existe un departamento de mantenimiento formalizado y se utilizan tanto personal como recursos de la producción o de la gerencia para realizar el mantenimiento los índices de costos permiten visibilizar la situación del mantenimiento y ayudar en la toma de decisiones respecto a si ampliar el presupuesto asignado o tomar técnicos de planta permanente dedicados al mantenimiento.

- Coste de mano de obra

Este indicador es simplemente es el valor del coste de la mano de obra asignado al mantenimiento. En el caso actual donde no hay personal específico puede calcularse como la cantidad de horas dedicadas al mantenimiento correctivo por el costo de la hora hombre de la persona. No se tiene en cuenta la pérdida por el trabajo de una persona que no realiza en su área por dedicarse al mantenimiento ya que es parte de sus tareas.

Al aplicar la etapa de plan de mantenimiento predictivo se tomarían en cuenta todas las horas de medición, análisis y programación de tareas correctivas además del tiempo que lleve realizar los mantenimientos correctivos, programados y de emergencia.

- Coste de materiales

Se pueden hacer tantas subdivisiones como se crea conveniente: por secciones, por tipo (eléctrico, mecánico, consumibles, repuestos genéricos, repuestos específicos, etc.)

- Coste de subcontratos

También pueden hacerse las subdivisiones que se considere oportunas. Algunas subdivisiones comunes suelen ser: a fabricantes y especialistas, a inspecciones de carácter legal o a empresas de mantenimiento.

- Coste de medios auxiliares

Es la suma de todos los medios auxiliares que ha sido necesario alquilar o contratar: grúas, carretillas elevadoras, alquiler de herramientas especiales, etc

Con todos los costes se puede realizar una tabla de costes donde se visibilicen con rapidez los costos diferenciados y totales relacionados al mantenimiento como en la Figura 3.4.1.1. [43]

Período	Mano de obra	Nº Horas	Materiales	Subcontratos	Medios aux.	Total
1						
2						
3						
Totales						

Figura 3.4.1.1 Tabla de costos general. Los períodos pueden asignarse con el criterio que se desee.

3.4.1.7. INDICADORES DE GESTIÓN DE ÓRDENES DE TRABAJO

En el caso de estudio no existe un sistema de órdenes de trabajo (O.T.), será tratado en la sección 3.4.2. Sin adentrar en el tema se enuncian los indicadores que serán de utilidad luego de la implementación de un sistema de órdenes de trabajo.

- Nº de órdenes de trabajo generadas en un período determinado

Es discutible si el número de órdenes de trabajo es un indicador muy fiable sobre la carga de trabajo en un periodo, ya que 100 órdenes de trabajo de una hora pueden agruparse en una sola orden de trabajo con un concepto más amplio. No obstante, dada la sencillez con que se obtiene este dato, suele ser un indicador muy usado. La información que facilita este indicador es más representativa cuanto mayor sea la cantidad media de O.T que genera la planta. Así, es fácil que en una planta que genera menos de 100 O.T. de mantenimiento mensuales la validez de este indicador sea menor que una planta que genera 1000 O.T. [43]

En el caso de estudio no serán muchas las O.T. que se generen por lo que pueden utilizarse períodos grandes o simplemente no utilizar este dato. La simplicidad de la obtención de este indicador es tal que el número mismo de la O.T. indica la cantidad de O.T. que se realizaron desde su implementación.

- Nº de órdenes de trabajo generadas por sector

Igual que en el caso anterior, solo la sencillez de su cálculo justifica emplear este indicador.

- N° de órdenes de trabajo acabadas

Suele ser útil conocer cuál es el número de O.T. acabadas, sobre todo en relación al número de órdenes generadas. Es muy importante, como siempre, seguir la evolución en el tiempo de este indicador.

- N° de órdenes de trabajo pendientes

Este indicador nos da una idea de la eficacia en la resolución de problemas. Es un indicador absolutamente imprescindible, junto con los indicadores de disponibilidad, los de coste o el de emergencias. Es conveniente distinguir entre las O.T que están pendientes por causas ajenas a mantenimiento (pendientes por la recepción de un repuesto, pendientes porque producción no da su autorización para intervenir en el equipo, etc) de las debidas a la acumulación de tareas o a la mala organización de mantenimiento. [43]

- Horas estimadas de trabajo pendiente

Es la suma de las horas estimadas en cada uno de los trabajos pendientes de realización. Es un parámetro más importante que el n° de órdenes pendientes, pues nos permite conocer la carga de trabajo estimada por realizar.

- Índice de cumplimiento de la planificación

Es la proporción de órdenes que se acabaron en la fecha programada o con anterioridad, sobre el total de órdenes totales. Mide el grado de acierto de la planificación.

$$\text{Cumplimiento de planificación} = \frac{N^{\circ} \text{ O.T. acabadas en fecha}}{N^{\circ} \text{ Órdenes totales}} \quad (3.4.1.19)$$

- Tiempo medio de resolución de órdenes de trabajo

Es el cociente de dividir el n° de O.T. resueltas entre el n° de horas que se han dedicado a mantenimiento:

$$\text{Tiempo medio} = \frac{N^{\circ} \text{ de O.T. resueltas}}{N^{\circ} \text{ Horas de mantenimiento}} \quad (3.4.1.20)$$

Se observa que gran parte de los indicadores de la gestión de órdenes de trabajo se obtienen de la misma planilla de cálculo donde se generan las O.T. Por esa simplicidad de obtención se justifica llevar al día todos estos indicadores y utilizar los datos que ofrecen.

3.4.2. ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL

Tanto los planes de mantenimiento eléctrico y mecánico como los planes de mejora representan un cambio en la estructura, objetivos y filosofía de trabajo de la empresa. Y como ya se ha mencionado en distintas oportunidades en el presente proyecto, el cambio debe gestionarse de tal manera que la organización en sí no oponga resistencia a los cambios planteados. Por este motivo se inicia esta sección indicando los pasos a seguir para gestionar una correcta implementación del cambio planteado.

Por otra parte, las tareas y puestos actuales de la compañía se verán modificados por la aplicación de estos cambios. En consecuencia, es necesario que cada puesto tenga en claro cuáles serán sus tareas, qué responsabilidades recaen en cada uno, a quién reportar los distintos acontecimientos y qué competencias debe poseer cada persona que ocupe un puesto.

Por último, en esta sección, ya que se tratan los cambios en el conjunto de la organización y los cambios en los puestos, debe plantearse una estructura que gestione y registre los procedimientos y tareas que se realizan en la empresa. Para tal fin se plantea un sistema de órdenes de trabajo que cumpla ambas cosas.

3.4.2.1. GERENCIA DEL CAMBIO

En el ámbito organizacional se habla de cambio cuando existen modificaciones organizativas de diversa profundidad e impacto y de las que deberá analizarse su forma y motivos. Como sinónimos o complementos del vocablo cambio se encuentran la innovación, la transformación y la transición.

Entre las causas que lo motivan suelen ser la necesidad de adaptación a las condiciones cambiantes del entorno; la obtención de malos resultados que conduzcan a adoptar medidas orientadas a mejora de dichos resultados; la búsqueda de flexibilidad para explorar nuevas ideas o procesos que supongan una ventaja frente a los competidores. En el caso de estudio podría decirse que el segundo caso es el que motiva el cambio. Si bien es una empresa de éxito a nivel local, la falta de mantenimiento y, por lo tanto, la imprevisibilidad de los fallos puede considerarse resultados negativos que lleven a implementar un plan de mantenimiento y mejoras. Del mismo modo, podría decirse que contar con un plan de mantenimiento le otorgaría una ventaja en confiabilidad a la empresa respecto de los competidores.

Por regla general, la forma en la que se lleve a cabo el proceso de transición deberá ser lo menos brusca y traumática posible para el conjunto de la organización. Es habitual observar cierta resistencia en un intento de conservar la situación previa al cambio debido a la tendencia natural a la estabilidad, a la protección del status quo y a la incertidumbre del impacto final. [44]

El proceso de transición, normalmente consta de las siguientes fases:

- Identificación de objetivos
- Formulación
- Implantación

Las dos últimas pueden agruparse bajo el proceso de cambio o transición propiamente dicho.

- Identificación de objetivos

Según algunos autores, se identifican tres grandes grupos de objetivos generales para las organizaciones. Estos son la mejora de las operaciones, alcanzar una ventaja competitiva sostenible y modificar la cultura empresarial. Como ya se mencionó, en el caso de estudio el objetivo podría ser tanto la mejora de operaciones como alcanzar la ventaja competitiva, pero se decanta más por la mejora de las operaciones ya que sólo se han analizado los procesos y operaciones de la empresa por sobre la competencia en el mercado.

Profundizando más en el objetivo, se busca introducir el mantenimiento como parte integral de los procesos.

El éxito de este proceso de cambio depende en gran medida de la efectividad de la integración de todos los recursos, tanto entre ellos en el seno de la organización como en su interacción con el entorno. [44]

- Formulación

Esta segunda gran etapa del proceso de cambio o transición puede subdividirse a su vez en las etapas de insatisfacción y cambio.

La primer sub-etapa es la de insatisfacción. Se trata del inicio del proceso como consecuencia de un sentimiento de insatisfacción respecto a la situación actual que vive la organización y que desea modificar. Es imprescindible transmitir las razones que impulsan el cambio, además de evitar que se entienda como una decisión sin fundamento o simplemente como una vía para modernizar la organización sin que ello reporte beneficios. En esta etapa es bueno comenzar implementando los KPI como forma de comunicación. Colocar una cartelera de indicadores en un lugar visible de la planta y gráficos fácilmente entendibles. De esta manera se mostraría claramente la disconformidad de la compañía con la falta de mantenimiento en equipos. La continuación en este proceso será fomentar el deseo de intervención. Dicho momento se conforma como donde se abandonan los antiguos patrones organizativos para dar paso al descubrimiento de los nuevos. Se debe mantener el impulso tomado en la fase anterior para empezar a trabajar en la obtención de resultados intermedios y transmitir un mensaje de éxito. Para el caso de estudio esto se transmite con la notificación y transición a los puestos con responsabilidades en mantenimiento, las capacitaciones en mantenimiento al personal involucrado, la aplicación de las primeras rutinas de predictivos, la actualización de indicadores semana a semana y la medición de nuevos

Indicadores acordes al avance de la implementación del plan. La figura del líder del cambio estará en el encargado del mantenimiento, esa persona debe dar el ejemplo del compromiso y de la aplicación de las prácticas de mantenimiento tales como la limpieza diaria y semanal de equipos, del reporte de cualquier accidente o falla para ser tenidos en cuenta en los indicadores, del uso del sistema de órdenes de trabajo y de la participación activa en capacitaciones.

La segunda sub-etapa es el cambio. Esta fase comienza con la realización de un diagnóstico de la situación para después desarrollar hábitos, actitudes y/o valores nuevos que permitan romper con los antiguos patrones y den paso a una nueva situación. En esta etapa el cambio es algo real y se aplican al completo todas las rutinas predictivas y de mantenimiento de infraestructura, manejo del almacén, análisis de fallos, etc. Dentro de esta sub-etapa más allá de la aplicación del cambio “per se” encontramos tres fases que constituyen a la etapa del cambio. Estos son el diagnóstico, la definición de objetivos y la búsqueda de soluciones.

El diagnóstico consiste en la recopilación de información para conocer en qué condiciones se encuentra la empresa, a qué se enfrenta y qué soluciones puede aplicar. La recopilación de

información y la comunicación bidireccional entre gerencia y operarios se vuelve crucial en esta parte. El uso de los indicadores debe estar completamente asentado para un correcto relevamiento de datos y la discusión sobre los resultados de dichos indicadores ha de ser una parte de la rutina de trabajo. De dicha discusión de los indicadores surge la siguiente fase que es la definición de objetivos. Ya marcados los objetivos a largo plazo del cambio, con el día a día del proceso de transición se deben marcar objetivos a corto plazo para redireccionar levemente el proceso cuando se encuentre un desvío en el proceso de cambio. La tercera fase del cambio es la búsqueda de soluciones. Esta fase inicia la búsqueda de soluciones concretas sobre los desvíos encontrados. La temprana detección y consecuente solución de desvíos durante el proceso de cambio es de suma importancia para que el cambio se desarrolle de la forma deseada y no se termine llegando a una situación igual o peor que la inicial luego de que se hayan gastados muchos recursos, tiempo y entusiasmo del personal de la empresa que no podrá recuperarse fácilmente.

Un ejemplo de estas tres fases podía ser el caso en que los KPI indiquen que unos meses luego de comenzar con las rutinas predictivas el tipo de mantenimiento que predomina sigue siendo el correctivo. Deberían analizarse las causas de este resultado: si se están cometiendo errores en el análisis predictivo y se actúa de manera anticipada por demás, si las roturas sobrepasan la capacidad del personal de mantenimiento y no queda tiempo para realizar las rutinas predictivas o si la frecuencia de predictivos no es la suficiente. Luego se deberían tomar acciones sobre cómo corregir el rumbo según el caso: intensificar la formación sobre análisis predictivo, tomar más personal de mantenimiento o aumentar la frecuencia del mantenimiento predictivo. [44]

- **Implantación**

La etapa final del proceso de cambio es la implantación, donde se ejecuta y cierra el proceso de transición. En esta etapa se encuentran las fases de experimentación y confirmación. La fase de experimentación se solapa con todos los procesos anteriores ya que trata de la aplicación del cambio en un sector piloto donde se comprueban los resultados. La experimentación de la que hablan los autores es aplicable en empresas grandes donde pueden dividirse sectores de tamaño aceptable para este tipo de cambios. En este caso el cambio se realiza de manera integral debido a ser una PyME. Eso no quita que se utilicen las primeras etapas del proceso de manera de experimentación y puedan usarse como objeto de análisis experimental para confirmar el rumbo, modificarlo o hasta volver a la situación inicial para modificar el proceso desde el inicio. La segunda fase de la implantación es la confirmación. Se procede a reafirmar la nueva situación a la que ha llegado la empresa a través del proceso de cambio. Llegado este momento deben valorarse los esfuerzos realizados por la organización como vía de reafirmación y aceptación de los cambios. [44]

3.4.2.2. DESCRIPCIÓN DE PUESTOS

Como proceso, el reclutamiento y la selección de personal implican, por un lado, una sucesión definida de condiciones y etapas orientadas a la búsqueda, selección e incorporación de personal idóneo para cubrir las necesidades de la empresa de acuerdo a los requerimientos y especificaciones de los diferentes puestos de trabajo de la organización.

La selección es un proceso de comparación entre dos variables: los requisitos del cargo o perfil del puesto (exigencias que debe cumplir el ocupante) y el perfil de los candidatos

reclutados. Esta comparación no se centra en un único punto de igualdad sino en una franja de aceptación que admite cierta flexibilidad más o menos cercana al punto ideal. [45]

En el presente trabajo se desarrolla sobre la primera parte del proceso de selección: El perfil del puesto. Se deja el reclutamiento para ser implementado por un profesional del tema en una etapa posterior del proceso de cambio.

Analizar puestos, para luego describirlos, comprende una serie de procedimientos para reunir y analizar la información sobre sus contenidos, las tareas a realizar, los requerimientos específicos, el contexto en que las tareas son efectuadas y qué tipo de personas deben contratarse para esa posición. [24]

Para describir un puesto se parte del relevamiento de la información que luego será analizada y finalmente se realiza la descripción del puesto.

La información necesaria para realizar el análisis del puesto es: Actividades del puesto y comportamiento asociado; Estándares de rendimiento; Máquinas u otros elementos necesarios; Condiciones laborales o contexto de la posición; Requerimientos de personalidad. A la par de esta información se requiere clasificar los puestos según nivel jerárquico, formación requerida, impacto de la gestión a su cargo y recursos humanos que maneja.

Ya relevada la información y analizada, se redacta la descripción del puesto. La descripción del puesto se realiza a través de un documento homónimo dividido en distintas secciones.

La primera sección de la descripción de puestos es la identificación del mismo. Incluye el nombre de la empresa, el nombre del puesto, nombre y apellido de la persona que ocupa el puesto y el área, dirección o departamento al que pertenece el puesto. Estos ítems son auto-explicativos, permiten identificar el puesto dentro de la empresa.

La segunda sección es la ubicación del puesto dentro del organigrama general de la empresa. El organigrama es una herramienta que permite, mediante la ubicación vertical y horizontal, dar noción de la jerarquía de un puesto y la relación del mismo con el resto de la organización.



Figura 3.4.2.1 Organigrama de la empresa del caso de estudio. Se identifican 4 niveles y 3 columnas a partir del 2do nivel.

Dentro del organigrama del caso de estudio, retratado en la Figura 3.4.2.1, se identifican 4 niveles en sentido vertical y 3 columnas en sentido horizontal a partir del segundo nivel de arriba hacia abajo. El nivel superior corresponde al Gerente General, puesto ocupado por el dueño de la empresa. Desde el segundo nivel en adelante se dividen las 3 columnas de las áreas de Administración, Producción y Mantenimiento. El 3er nivel sólo se encuentra en el área de Producción ya que es el único sector que requiere mandos intermedios. Y en el nivel inferior se encuentran los operarios, el ayudante administrativo, el pañolero, los mecánicos, electricistas y carpinteros. A nivel horizontal, los puestos a analizar en el presente proyecto serán los de la columna derecha, pertenecientes al área de mantenimiento. El puesto del pañolero no corresponde a ningún área ya que dentro de la producción y mantenimiento se

comparten muchos consumibles y repuestos. No reporta a ningún gerente, pero por la naturaleza del almacén de repuestos, debe mantener estrecha comunicación con los gerentes de mantenimiento y producción.

La tercera sección del documento es la síntesis del puesto. Aquí se inicia con un resumen que sintetiza en una frase el propósito del puesto. El resumen debe ser breve y conciso. Sólo se detallan las actividades principales y nunca deben incluirse las denominadas frases abiertas, como por ejemplo “otras responsabilidades”.

A su vez, en la tercera sección se muestran las relaciones del puesto con otras personas dentro de la organización. A quién reporta, a quién supervisa y con quién trabaja a la par o mantiene comunicación.

La última parte de la sección son las responsabilidades y relevancia de la actividad. Se debe detallar una lista de estos aspectos. La extensión debe ser la necesaria ya que no debe omitirse ninguna responsabilidad del puesto. El grado de relevancia se clasifica como alto, medio o bajo según cómo afecte al funcionamiento del sector y de la organización en sí.

Como etapa final de la descripción del puesto debe analizarse los requisitos que debe cumplir la persona para adecuarse al puesto. En este trabajo no se analiza la gestión por competencias por lo que la descripción no incluye las mismas. Lo mismo ocurre con los lineamientos para seleccionar candidatos, no se especifican dado que es una tarea que se realiza en conjunto con el profesional de recursos humanos, psicología laboral o con el dueño de la empresa misma según el caso.

Los contenidos incluidos en esta sección son la formación básica requerida, la formación complementaria, la experiencia necesaria para el puesto y los conocimientos en idioma y software con los que debe contar el ocupante del puesto para desempeñarse debidamente.

A continuación, se desarrolla sobre las descripciones particulares de los puestos creados por el presente proyecto.

- Electricista

El electricista se encargará del mantenimiento eléctrico tanto correctivo como predictivo. A su vez, realiza la inspección y limpieza de los tableros eléctricos. Además de los predictivos, el electricista es quien realiza los informes correspondientes a sus rutinas de inspección y medición. Cuando existan paradas programadas debe realizar las tareas asignadas. Perteneciente al área de mantenimiento reportando al Gerente de Mantenimiento y trabajando a la par de los mecánicos.

Entre las responsabilidades que recaen en el puesto se encuentra la realización de termografía infrarroja. El electricista debe saber utilizar la cámara termográfica y el software asociado a su análisis. A su vez, debe saber utilizar la herramienta de la planilla de cálculo para poder cerrar sus órdenes de trabajo en el sistema informático, reportar hallazgos o actualizar indicadores.

El puesto requiere conocimientos técnicos en electricidad ya que debe estar capacitado para manipular equipos con y sin energía. Debe estar familiarizado con el LOTO y las 5 reglas de oro.

Al igual que todos los trabajadores de una organización, se debe estar alineado con los valores, la ética y la misión de la organización. Así como participar en las jornadas de formación.

Entre los requerimientos del puesto, además de los ya mencionados, se encuentra un conocimiento intermedio del idioma inglés. No todos los equipos, manuales y software

relacionado con equipos eléctricos y de termografía se encuentran traducidos al español por lo que, en más de una ocasión, el electricista se halla en la necesidad de leer en inglés. No se requieren habilidades de producción (escritura o habla), sino que se requieren habilidades pasivas (lectura y escucha).

En la Figura 3.4.2.2 el nombre de la empresa y del ocupante del puesto se dejan en blanco para ser completados según el caso. La experiencia requerida depende del criterio de búsqueda que se plantee por la empresa (Senior o Junior).

Descripción de puesto	
Identificación del puesto	
Empresa:	Puesto: Electricista
Nombre y apellido del titular:	
Área/Dirección: Mantenimiento	
Organigrama	
Síntesis del puesto	
Resumen: Encargado de realizar las rutinas de inspección y de preventivos por termografía de las instalaciones eléctricas, electromecánicas y de servicios de la planta, así como los informes respectivos. En paradas programadas, ejecuta las tareas planificadas por el Gerente de mantenimiento.	
Reporta a: Gerente de Mantenimiento	Trabaja con: Mecánicos
Responsabilidades del puesto	
Responsabilidades del puesto	Grado de relevancia
Velar por la seguridad e higiene laboral propia y de la organización. Propiciar un ambiente agradable de trabajo	Medio
Respetar la cultura organizacional y perseguir los valores y misión de la empresa	Medio
Llevar a cabo las rutinas de mantenimiento eléctrico e inspección	Alto
Realizar las tareas asignadas durante las paradas de mantenimiento	Alto
Colaborar con la actualización de indicadores y del sistema de órdenes de trabajo	Bajo
Participar activamente de las jornadas de formación	Medio
Producir los informes producto de las inspecciones y el mantenimiento predictivo	Alto
Seguir los protocolos de procesos, intervenciones de equipos y retiro de materiales del almacén	Medio
Requisitos del puesto	
Formación básica: Secundario Técnico	
Otra formación complementaria: Termografía Infrarroja	
Experiencia requerida:	
Idioma: Inglés nivel intermedio técnico (habilidades pasivas)	
Software: Hoja de cálculo (Office, Libreoffice); Software de termografía	

Figura 3.4.2.2 Documento de Descripción del Puesto de Electricista.

- Mecánico

El mecánico se encargará del mantenimiento mecánico y edilicio tanto correctivo como predictivo. A su vez, realiza la inspección y limpieza de los equipos. Además de los predictivos, el mecánico es quien realiza los informes correspondientes a sus rutinas de inspección y

medición. Cuando existan paradas programadas debe realizar las tareas asignadas. Pertenece al área de mantenimiento reportando al Gerente de Mantenimiento y trabajando a la par de los electricistas.

Entre las responsabilidades que recaen en el puesto se encuentra la realización de análisis de vibraciones. El mecánico debe saber utilizar el analizador de vibraciones y el software asociado. A su vez, debe saber utilizar la herramienta de la planilla de cálculo para poder cerrar sus órdenes de trabajo en el sistema informático, reportar hallazgos o actualizar indicadores.

El puesto requiere conocimientos técnicos en mecánica ya que debe estar capacitado para manipular herramientas manuales e intervenir en equipos electromecánicos, hidráulicos y neumáticos. Debe estar familiarizado con el LOTO y las 5 reglas de oro.

Al igual que todos los trabajadores de una organización, se debe estar alineado con los valores, la ética y la misión de la organización. Así como participar en las jornadas de formación.

Entre los requerimientos del puesto, además de los ya mencionados, se encuentra un conocimiento intermedio del idioma inglés. No todos los equipos, manuales y software relacionado con equipos electromecánicos y de vibraciones se encuentran traducidos al español por lo que, en más de una ocasión, el mecánico se halla en la necesidad de leer en inglés. No se requieren habilidades de producción (escritura o habla), sino que se requieren habilidades pasivas (lectura y escucha).

En la Figura 3.4.2.3 el nombre de la empresa y del ocupante del puesto se dejan en blanco para ser completados según el caso. La experiencia requerida depende del criterio de búsqueda que se plantee por la empresa (Senior o Junior).

Descripción de puesto	
Identificación del puesto	
Empresa:	Puesto: Mecánico
Nombre y apellido del titular:	
Área/Dirección: Mantenimiento	
Organigrama	
Síntesis del puesto	
Resumen: Encargado de realizar las rutinas de inspección y de preventivos por vibraciones de los equipos mecánicos, edificios y de servicios de la planta, así como los informes respectivos. En paradas programadas, ejecuta las tareas planificadas por el Gerente de mantenimiento.	
Reporta a: Gerente de Mantenimiento	Trabaja con: Electricistas
Responsabilidades del puesto	Grado de relevancia
Velar por la seguridad e higiene laboral propia y de la organización. Propiciar un ambiente agradable de trabajo	Medio
Respetar la cultura organizacional y perseguir los valores y misión de la empresa	Medio
Llevar a cabo las rutinas de mantenimiento mecánico, edificio e inspección	Alto
Realizar las tareas asignadas durante las paradas de mantenimiento	Alto
Colaborar con la actualización de indicadores y del sistema de órdenes de trabajo	Bajo
Participar activamente de las jornadas de formación	Medio
Producir los informes producto de las inspecciones y el mantenimiento predictivo	Alto
Seguir los protocolos de procesos, intervenciones de equipos y retiro de materiales del almacén	Medio
Requisitos del puesto	
Formación básica: Secundario Técnico	
Otra formación complementaria: Análisis de vibraciones	
Experiencia requerida:	
Idioma: Inglés nivel intermedio técnico (habilidades pasivas)	
Software: Hoja de cálculo (Office, Libreoffice); Software de vibraciones	

Figura 3.4.2.3 Documento de Descripción del Puesto de Mecánico.

- Gerente de Mantenimiento

Dirige todas las operaciones del área de mantenimiento siendo responsable de la integridad, confiabilidad y operatividad de los equipos e instalaciones de planta. Planifica y programa todas las tareas a realizar en las paradas de mantenimiento.

Al ser un puesto gerencial debe reportar al Gerente General y trabajar en conjunto con el Gerente de producción, principalmente a la hora de coordinar paradas programadas de mantenimiento. A su vez debe trabajar con el Gerente de Administración a la hora de gestionar el trabajo de contratistas, las jornadas de formación de personal y en los procesos de selección de personal. Por otra parte, debe supervisar el trabajo de todo el personal técnico del área, tanto los electricistas como los mecánicos. Entre las tareas de supervisión se encuentran incluidas las rutinas de mantenimiento predictivo cuya tarea es corregir o aprobar los informes realizados por los técnicos.

Al igual que todos los trabajadores de una organización, se debe estar alineado con los valores, la ética y la misión de la organización. Así como participar en las jornadas de formación y asegurarse que los miembros del área participen. Respecto a la formación específica del sector, el Gerente de Mantenimiento debe aportar el material o los conocimientos sobre termografía infrarroja y análisis de vibraciones para capacitar a los técnicos. Así como las 5 reglas de oro, el LOTO y los protocolos de trabajo seguro.

Una tarea específica del Gerente es la de realizar los análisis de fallas, al ser una tarea compleja puede delegarse alguna tarea a los técnicos, pero el análisis y la conclusión deben ser elaborados por el puesto responsable.

Respecto a la relación con el pañolero encargado del almacén de repuestos, tanto el Gerente de Producción como el Gerente de Mantenimiento deben establecer los criterios de acopio de los materiales utilizados por cada sector (criticidad). Se requiere una estrecha comunicación ya que los pedidos de materiales en esta organización son gestionados por el encargado del almacén.

Otra tarea de la que es responsable el Gerente es de mantener actualizadas la lista de activos, los indicadores y el sistema informático de gestión de órdenes de trabajo.

Respecto a la comunicación, el Gerente debe reportar tanto a sus pares como al Gerente General el estado del sector, de los indicadores y de los activos de la empresa periódicamente. En la otra dirección, debe tener reuniones periódicas con el personal bajo su supervisión para informar las tareas a realizar y también el estado del sector con sus respectivos indicadores.

El puesto requiere conocimientos técnicos en electricidad y mecánica fundamentalmente. Así como experiencia en el sector de al menos 3 años. Como conocimientos complementarios se debe contar con conocimientos en termografía y vibraciones. Son deseables también conocimientos en Ingeniería y en gestión del mantenimiento dada la naturaleza gerencial del cargo.

Al igual que con los puestos técnicos, en más de una ocasión se van a requerir habilidades pasivas de idioma inglés para desenvolverse con manuales de equipos y software de vibraciones y termografía. Las habilidades de producción pueden requerirse en caso de tener que comunicarse con un contratista, proveedor o cliente que no posea habla castellana.

Los conocimientos en software de planilla de cálculo en este caso se hacen más notables ya que el Gerente es el encargado directo de utilizar el sistema informático de gestión de órdenes de trabajo y ser capaz de, en caso de crecimiento de la empresa y la planilla quede obsoleta, poder implementar un software comercial específico para la tarea.

Descripción de puesto		
Identificación del puesto		
Empresa:	Puesto: Gerente de Mantenimiento	
Nombre y apellido del titular:		
Área/Dirección: Mantenimiento		
Organigrama		
<pre> graph TD DG[Dueño / Gerente General] --> GA[Gerente Administrativo] DG --> GP[Gerente de producción] DG --> GM[Gerente de Mantenimiento] GA --> AA[Ayudante Administrativo] GP --> ECT[Encargado de Carpintería Tradicional] GP --> EM[Encargado de Melamina] GP --> EP[Encargado de Puertas Placa] ECT --> O1[Operarios] ECT --> C[Carpinteros] EM --> O2[Operarios] EP --> O3[Operarios] GM --> P[Pañolero] GM --> E[Electricistas] GM --> M[Mecánicos] </pre>		
Síntesis del puesto		
Resumen: Dirige todas las operaciones del área, supervisa a su personal y los informes realizados por los mismos, programa, planifica y coordina con producción las paradas de mantenimiento. Es responsable de la integridad y la confiabilidad de los equipos de la planta productiva.		
Reporta a: Dueño/Gerente General	Supervisa a: Electricistas y Mecánicos	
Trabaja con: G. Producción, Pañolero y G. Administración		
Responsabilidades del puesto		Grado de relevancia
Planificar y programar las paradas de mantenimiento.		Alto
Realizar análisis de fallas.		Medio
Establecer los criterios de stock de repuestos para mantenimiento junto con el pañolero.		Medio
Mantener actualizados los indicadores de mantenimiento y realizar presentaciones sobre los mismos.		Alto
Participar de los procesos de selección del personal para el sector.		Medio
Realizar reportes del estado del sector a la gerencia.		Bajo
Gestionar el sistema de órdenes de trabajo y la concordancia del mismo con la realidad.		Medio
Actualizar la lista de activos cuando corresponda.		Bajo
Gestionar la contratación de contratistas para tareas de mantenimiento junto con el área de administración.		Bajo
Revisar y evaluar los informes de las rutinas de inspección y predictivas.		Medio
Respetar la cultura organizacional y perseguir los valores y misión de la empresa		Medio
Aplicar la filosofía de la mejora continua de procesos		Medio
Velar por la seguridad e higiene laboral del personal del sector y de la organización. Propiciar un ambiente agradable de trabajo		Medio
Llevar a cabo los planes de capacitación del personal junto con el área de administración.		Bajo
Requisitos del puesto		
Formación básica: Secundario Técnico		
Otra formación complementaria: Análisis de vibraciones; Termografía infrarroja; Ingeniería; Gestión.		
Experiencia requerida: 3 años en mantenimiento industrial.		
Idioma: Inglés nivel intermedio técnico (habilidades pasivas)		
Software: Hoja de cálculo (Office, Libreoffice); Software de vibraciones; Software de termografía		

Figura 3.4.2.4 Documento de Descripción del puesto de Gerente de Mantenimiento.

3.4.2.3. SISTEMA DE ÓRDENES DE TRABAJO

Los sistemas de planificación de recursos empresariales (ERP por las siglas en inglés, Enterprice Resource Planning) se encuentran muy desarrollados actualmente y funcionan de manera integral sobre todas las áreas de una empresa. En un caso así, el sistema de órdenes de trabajo del mantenimiento se vería incluido en un mismo software de gestión junto con producción, finanzas, recursos humanos, órdenes de trabajo de producción, compras y gestión del almacén. Como la implementación de ERP integral depende de una decisión gerencial general y no depende netamente del departamento de mantenimiento se dejará de

lado el análisis de este tipo de sistemas. Lo que sí se plantean son algunos conceptos y utilidades de estos sistemas que puedan aplicarse de manera reducida al caso de estudio de manera práctica y estén dentro del alcance del presente proyecto.

Ya se mencionó que no se utilizará un software específico de órdenes de trabajo. Pero al igual que en el caso del almacén de repuestos o los indicadores, por la simpleza del uso y la disponibilidad con la que ya cuenta la empresa, se utiliza una planilla de cálculo para usar como sistema informático para emitir y actualizar el estado de las órdenes de trabajo. El sistema de órdenes de trabajo debería tener conexión con el sistema de gestión de almacén y con el listado completo de activos.

Dentro del sistema informático se clasifican distintas entradas. La primera son los predictivos, donde se registra toda la información respectiva a las rutinas de mantenimiento que se realizan en planta. El segundo son los hallazgos, hoja en la cual se indican todos los desvíos de la condición ideal encontrados en las rutinas predictivas. Finalmente, la tercera entrada posible son las órdenes de trabajo (OT) que indican la programación de las tareas correctivas.

Estas tres hojas de la planilla de cálculo están interrelacionadas ya que durante las rutinas se encuentran hallazgos, los cuales son el origen de una orden de trabajo para corregir dicho desvío. Esta unión entre las tareas reales se reproduce dentro del sistema informático y puede ser seguido tanto para la supervisión como para el desarrollo de indicadores. A continuación, se desarrolla el contenido de las hojas de la planilla de cálculo que oficia de sistema informático de órdenes de trabajo.

- Predictivos

Los datos a registrar en esta entrada son la fecha, el responsable de realizar la medición, el tiempo que llevó realizar la rutina, número de informe y tipo de mantenimiento predictivo realizado.

En la planilla se asigna un número correspondiente a la fecha según el tipo de predictivo. De esta manera queda un registro del tiempo que llevó realizar las rutinas a lo largo del tiempo, de quién realizó cada día las mediciones y con qué número se puede encontrar archivado el informe correspondiente.

Fecha	Predictivo	Número	Responsable	Tiempo [h]
2-mar-23	Vibraciones	V2323	Hormaechea	2h
3-mar-23	Vibraciones	V3323	Hormaechea	1h
3-mar-23	Termografía	T3323	Hormaechea	3h
3-abr-23	Vibraciones	V3423	Hormaechea	4h
4-abr-23	Termografía	T3423	Hormaechea	4h

Figura 3.4.2.5 Ejemplo del uso de la hoja de predictivos en el sistema informático para el caso de estudio.

Los informes se clasifican por equipo y por el número asignado por el sistema. Utilizando el ejemplo de la Figura 3.4.2.5 el informe de la termografía infrarroja de la pegadora de cantos de puertas placa realizado el 3 de marzo del 2023 se encuentra en la carpeta de la lista del activo C1P bajo el nombre T3323. En las hojas siguientes se hará referencia a este informe como T3323-C1P.

Las categorías de las columnas se eligen para poder filtrar la información en la planilla y facilitar la búsqueda de un dato o de un grupo de datos como, por ejemplo, los nombres de los informes realizados por una persona en particular.

- Hallazgos

La hoja de hallazgos es la segunda a completar. Aquí se ingresan los desvíos encontrados durante las rutinas de mantenimiento predictivo. Es importante mantener actualizada la planilla con cada realización de reparación correctiva para evitar incurrir en errores. Los datos a ingresar en esta hoja son la fecha de detección, el sector y equipo donde se encontró el desvío, una descripción del desvío, la prioridad y la fecha en la que se cambia la prioridad a 4 (se explicarán a continuación), el informe correspondiente al hallazgo por primera vez del desvío y el número de orden de trabajo que se crea a partir de aquí para reparar el desvío. Como columna opcional se encuentra el motivo de atraso que sólo aplica a los hallazgos que lleven tiempo sin ser reparados para indicar la razón de que no fue reparado. El último dato que falta explicar es el de la antigüedad del hallazgo, dato que se genera como la diferencia de días desde que se halló el desvío hasta la fecha actual.

Fecha detección	Antigüedad [días]	Sector	Equipo	Informe	Prioridad	Cambio a prioridad 4	Desvío	Motivo de atraso	OT
2-mar-23	33	A1	Sinfin 1	V2323-A1S1	3		Poleas desalineadas		
3-mar-23	-	B2	Prensa Hidráulica	V3323-B2P	4	3-mar-23	Rodamiento roto		16
3-mar-23	32	B2	Tablero principal	T3323-B2TP	3		Falta puerta de tablero	Esperando puerta. Se encomendó a taller vecino	18
3-abr-23	1	B2	Prensa hidráulica	V3323-B2P	3		Rodamiento deteriorado		
3-abr-23	1	A1	Garlopa 2	V3423-A1G2	1		Fisura en estructura genera juego (zapateo)		17
4-abr-23	0	B2	Tablero principal	T3323-B2TP	3		Falso contacto en borne de interruptor termomagnético		

Figura 3.4.2.6 Continuación del ejemplo del caso de estudio de hoja de hallazgos en el sistema informático.

En este caso se requiere una explicación más profunda para comprender el significado de los datos a ingresar.

El sector, equipo y fecha de detección cumplen la función de servir para filtrar la información dentro de la misma hoja de cálculo. Por ejemplo, el histórico de hallazgos en un equipo o sector en particular. En el ejemplo de la Figura 3.4.2.6 se observa que la prensa hidráulica B2P tiene un problema que amerita un análisis de causa raíz porque luego de reemplazar un rodamiento el 3 de marzo, éste se volvió a encontrar con deterioro para el 3 de abril.

La antigüedad es un dato que ayuda en la toma de decisiones. Los hallazgos de prioridad baja pueden ascender en prioridad si llevan varios meses sin ser reparados y su potencial agravamiento es mayor cuanto mayor sea el tiempo que pasa.

El número de informe sirve para facilitar el acceso a mayor información sobre el desvío. Cabe recordar que esta planilla es un resumen que debe agilizar y facilitar la toma de decisiones y la programación de paradas de mantenimiento o correctivos. La información completa del estado relevado en los predictivos se encuentra en los informes respectivos cuyo formato ya se comentó anteriormente que depende del software del equipo de medición.

La prioridad se establece según el siguiente criterio:

1. El equipo requiere intervención inmediata. Equipo en situación crítica, no operativa o con potencial de generar daños de seguir funcionando en esta condición. Se debe interrumpir la producción para reparar el equipo.
2. El equipo requiere intervención dentro de la semana o en la parada del equipo más próxima. El equipo se va a dañar de seguir funcionando en esta condición, pero no amerita la interrupción de la producción.
3. El equipo puede operar hasta una parada programada para reparar el desvío. Existe una condición no ideal pero que no compromete la operación a mediano plazo. Con el tiempo puede llegar a empeorar.
4. Equipo en condición estándar. No se considera un desvío activo.

La columna de cambio a prioridad 4 indica la fecha en la que se encontró el desvío solucionado. No debe ingresarse la fecha de la realización de la OT sino la fecha de la medición predictiva correspondiente. La recomendación es realizar pruebas y mediciones luego de la acción correctiva, caso en el cual se coloca la fecha de las pruebas y mediciones.

La columna del desvío es la descripción del problema encontrado en el informe. Facilita la identificación del problema si se utilizan las mismas palabras que en la conclusión del informe para evitar confusiones.

El motivo de atraso es la justificación, si la hay, de que no se haya realizado la acción correctiva. En el ejemplo de la Figura 3.4.2.6 para la incidencia de la OT17 se justifican los 32 días de atraso por estar esperando la puerta que se pidió al taller vecino. En el caso de las poleas desalineadas de la sierra sin fin A1S1 no se justifica que haya pasado más de un mes desde la detección del desvío. Aquí se recomendaría mantener el seguimiento del equipo y eventualmente cambiar la prioridad a 2 para que realice la tarea antes de empeorar la situación.

La columna de la OT está relacionada con la siguiente hoja que es la de las órdenes de trabajo. Indica el número de la orden que se encarga de solucionar el problema. No necesariamente deben tener todos los hallazgos un número de OT ya que se asigna en el momento que se programa el correctivo.

Aclaración: la prioridad asignada en el sistema no tiene relación con la criticidad del equipo que se asignó en la lista de activos. El encargado de programar el mantenimiento deberá ponderar la prioridad del desvío con la criticidad del equipo sobre el que se encuentra y la capacidad actual de resolver los problemas ya sea por presupuesto, tiempo, disponibilidad de mano de obra, etc.

- OT

En esta hoja de cálculo del sistema informático se ingresa la información referida a las órdenes de trabajo. Aquí se deben resumir todos los trabajos correctivos realizados en el historial de la planta desde la aplicación del plan de mejoras. Es la principal herramienta de programación del mantenimiento.

Nº OT	Fecha emisión	Sector	Equipo	Desvío	Acción	Repuesto necesario	¿Parada?	Realiza	Estado
16	3-mar-23	A1	Sinfin 1	Rodamiento roto	Reemplazar rodamiento	Rodamiento SKF YET 205-014	Sí	Hormaechea	Realizado
17	3-abr-23	A1	Garlopa 1	Fisura en estructura genera juego (zapateo)	Reparar estructura de soporte de garlopa.		Sí	Contratista soldador	Programado
18	3-abr-23	B2	Tablero principal	Falta puerta de tablero	Tomar medidas, fabricar y colocar puerta.		No	Taller vecino	En espera

Figura 3.4.2.7 Continuación del ejemplo del caso de estudio en la hoja de OT en el sistema informático.

Entre los datos a colocar en esta hoja se encuentran el número de OT, la fecha de emisión, sector y equipo que, al igual que en las hojas anteriores, cumplen la función de identificar y permitir agrupar para facilitar el uso de la información.

La columna de desvío debe ser igual a la de los hallazgos para no generar confusiones. Es importante que describa concisa e inequívocamente el problema a solucionar.

En la acción, al igual que en el desvío, se explica la acción correctiva de manera breve. Los detalles se incluyen en la orden que se le entrega al personal que realizará la tarea. En la hoja de cálculo se debe contener los datos resumidos para facilitar el manejo de grandes cantidades de información.

La otra columna propia de esta hoja es la de repuestos necesarios, aquí se incluyen los repuestos específicos. No se incluyen los materiales técnicos ni los consumibles ya que son materiales con los que el almacén trabaja por volúmenes grandes. En el caso de los repuestos

específicos deben indicarse para poder encargarlos o controlar el stock. En el ejemplo de la Figura 3.4.2.7 se observa que para la tarea de reemplazar un rodamiento se indica el rodamiento específico del catálogo del proveedor con el que trabaja la empresa del caso de estudio. Por otra parte, en las tareas como la soldadura de la estructura no se indican los consumibles tales como electrodos. El tercer caso que se ilustra en el ejemplo es cuando la tarea se encarga a un tercero y, como parte del encargo, él provee los materiales.

La siguiente columna es la de contestar la pregunta: ¿El trabajo requiere una parada de línea? Es un dato importante para el programador porque requiere coordinar con la producción según la prioridad o la cantidad de trabajos acumulados que requieren una parada. En el ejemplo se tiene el caso del cambio de rodamiento o soldar la estructura que requieren la máquina sin funcionar. En ambos casos no se requiere una parada de planta, pero sí del equipo. En el caso de colocar la puerta se trabaja sobre el gabinete y no sobre el tablero, por lo que se realiza con el tablero energizado.

El dato de quién realiza la tarea tiene como función, además de para tener en cuenta la programación, la misma que el sector, equipo y otros datos que facilitan la visualización y organización de la información.

El estado es eso mismo, el estado actual de la tarea, si se encuentra programada, finalizada o en espera.

Las órdenes que se entregan al personal que realiza la tarea varían según la dificultad de la tarea, la formación de la persona, si es personal interno o contratado, si se hizo un relevamiento previo. Por este motivo no se estandariza el formato de la orden de trabajo. Igualmente, se recomienda proveer toda la información que se requiera para la correcta realización de la tarea.

3.4.2.4. CONCLUSIONES

El plan de mejoras en la gestión organizacional se enfoca en la parte administrativa, tanto del mantenimiento como de la organización respecto a la adición de un área nueva.

Mediante la gerencia del cambio se diagrama la forma de implementar los diferentes planes. El organigrama y la clara descripción de puestos permiten identificar tanto los perfiles del personal a incorporar en la nueva área como el lugar de la misma dentro de la organización.

Finalmente, para organizar la gestión de tareas del área de mantenimiento, el sistema de órdenes de trabajo simplifica las tareas organizativas y facilita la gestión de los distintos trabajos realizados por el departamento.

3.4.3. FORMACIÓN

En los resultados de la auditoría inicial, el ítem de formación fue de los que reflejaron una gestión más completa. Principalmente debido a la poca rotación de personal que presenta la empresa, el entrenamiento inicial que recibe el personal y lo inclusivo que es dicho entrenamiento respecto de los diversos conocimientos requeridos por los puestos operativos.

Las falencias detectadas en la auditoría son principalmente la informalidad de la formación, la dependencia en algunas personas y la falta de un plan. El plan de carrera es un tema que no entra dentro del alcance del presente proyecto, sólo se analiza un plan de contenidos por puesto.

Más allá del buen nivel de capacitación actual de la empresa, no están pensados para la nueva estructura organizacional que se plantea en el proyecto. Por lo tanto, se deben rever los contenidos para adecuarlos al personal específico de mantenimiento y sus perfiles de puesto mencionados en la sección 3.4.2.2.

Desde el punto de vista de la organización, el rol de planificar y programar las capacitaciones corresponde al área de Administración en conjunto con Mantenimiento. El alcance en este proyecto corresponde a las responsabilidades que recaen sobre Mantenimiento. Siendo éstas las presentadas a continuación según la bibliografía:

Recursos Humanos	Cliente Interno
Preparar el material de las capacitaciones	Proveer la información necesaria
Coordinar los esfuerzos de capacitación	Verificar las necesidades de entrenamiento
Conducir y organizar el entrenamiento fuera del trabajo	Hacer seguimiento del desarrollo de conocimientos dentro del trabajo
Diseñar la forma de recolectar las necesidades de capacitaciones	Determinar quién debe ser capacitado

Figura 3.4.3.1 Distribución de tareas por área. Adaptando al caso de estudio que las tareas de RRHH recaen en Administración y el cliente interno es Mantenimiento. [24]

Para el caso de estudio, los roles de Recursos Humanos se distribuyen de acuerdo a la disponibilidad de cada área o hasta tercerizarse si se requiere.

Sea cual sea el caso, para formalizar y estructurar el plan de formación de la organización se debe seguir un esquema que aplique a cualquier necesidad de capacitación que se detecte.

La formación en el caso de estudio seguirá los siguientes pasos del esquema de formación:

1. Identificar necesidades y objetivos de capacitación
2. Desarrollar criterios de medición
3. Seleccionar métodos
4. Medir resultados y compararlos en base a la aplicación de indicadores de formación

Se desarrollará brevemente cada paso y se aplicará al caso de estudio.

3.4.3.1. NECESIDADES Y OBJETIVOS

El primer paso en el esquema de formación es la detección de la necesidad. Dicha necesidad puede surgir por tres motivos fundamentales según la bibliografía:

- **Bajo rendimiento:** La organización necesita buscar la solución a los problemas de rendimiento del personal. Para encontrarla hay que identificar las áreas con deficiencias en entrenamiento.
- **Ejecución de tareas:** Una de las más frecuentes causas de necesidades de entrenamiento deriva de la falta de las capacidades necesarias para realizar las tareas, porque el empleado nunca las tuvo o se las olvidó. Se deben realizar evaluaciones de las tareas y tener un correcto layout de las máquinas y equipamientos.
- **Motivación individual:** En ocasiones, la baja performance de un departamento deviene de incentivos inadecuados para empleados y jefes. La desmotivación afecta la conducta de una o varias personas.

El gerente de administración debe indicar la forma de detectar las necesidades por cualquiera de estos tres motivos y el gerente de mantenimiento se encarga de llevar a cabo y verificar las necesidades.

Los documentos que debe generar administración varían según el motivo a detectar. Un bajo rendimiento se detecta por los KPI o con una evaluación de desempeño y de competencias donde se compare el perfil del trabajador con el del puesto. Las discrepancias entre los perfiles se cubren con capacitación específica sobre los conocimientos faltantes.

La necesidad por la incapacidad de realizar una tarea se detecta con un análisis de tareas. Este análisis debe poder ser comparable con el perfil del puesto y de la evaluación de competencias de los empleados que realizan las tareas. [24]

En el caso de estudio una necesidad podría ser la capacitación en el uso del controlador de la fresadora CNC o en automatización neumática. Sin conocimiento sobre el controlador de la fresadora CNC no se pueden realizar reparaciones en el equipo que requieran una prueba o un cambio de parámetros.

Las motivaciones individuales pueden detectarse como causa de las evaluaciones de desempeño y bajo rendimiento. Con esto en consideración es recomendable abrir e informar sobre la posibilidad de comunicarse con la empresa sobre este tipo de necesidades.

A modo de resumen, la evaluación de las necesidades requiere de evaluaciones de puestos y de los trabajadores, análisis de los indicadores de rendimiento y comunicación entre las partes. De esta manera pueden detectarse correctamente las necesidades.

Los objetivos de las capacitaciones son consecuencia directa de las necesidades. Si no se puede realizar una tarea por falta de conocimiento, el objetivo será formar al personal para que cuente con los conocimientos requeridos para ejecutar la tarea. Si el problema es rendimiento por falta de motivación, se puede planificar una capacitación cuyo objetivo sea subir la moral de los trabajadores y mejorar el rendimiento.

3.4.3.2. CRITERIOS DE MEDICIÓN

Hay diversos elementos a través de los cuales se puede evaluar la eficacia del proceso de capacitación:

- **Reacción de los participantes:** participación, preguntas y otras manifestaciones

- Aprendizaje medido en base a preguntas o ejercicios. Los supervisores de los participantes podrán evaluar el resultado en la aplicación diaria de los contenidos.
- Resultados: beneficios de la capacitación comparados con los costos del entrenamiento.

La reacción de los participantes se mide según el criterio del instructor. Si es una capacitación interna, ya sea el entrenamiento sobre el funcionamiento de la máquina del operario al mecánico que será el que la repare, la reacción del mecánico se le debe preguntar al operario. En el ejemplo anterior, la evaluación será informal. En el caso de ser una capacitación sobre el controlador de la fresadora CNC, dicha capacitación puede ser brindada por un representante del fabricante y la reacción será medida por dicho representante. Puede consultarse como medición complementaria el sentir de los participantes sobre la capacitación, principalmente en las capacitaciones externas. [24]

El aprendizaje se evalúa según el grado de formalidad de la capacitación. En el entrenamiento informal persona a persona se realiza una prueba práctica guiada donde el participante aplica de manera directa lo aprendido. En capacitaciones formales se suele tomar exámenes de los contenidos y, en algunas ocasiones, pruebas prácticas.

En la situación de trabajo se deben medir el desempeño y la productividad. Gracias a la medición de KPI se pueden comparar los indicadores antes y después de las distintas capacitaciones. El criterio se establece según los objetivos a corto, mediano y largo plazo establecidos desde la organización.

3.4.3.3. MÉTODOS

Ya detectadas las necesidades y definidos los objetivos y los criterios de evaluación, corresponde seleccionar los métodos de formación de personas. Las personas pueden adquirir conocimientos a través de varias vías, desde la realización de acciones formativas hasta la experiencia práctica. Estos métodos se pueden clasificar en 3 categorías:

- Métodos para el desarrollo de personas dentro del trabajo: Es el conjunto de buenas prácticas para el desarrollo de personas mientras continúan desempeñando su rol.
- Métodos para el desarrollo de personas fuera del trabajo: Son los más difundidos bajo el formato de cursos de capacitación. El término “fuera” hace referencia a que en el momento en que se realiza la capacitación no se está en el puesto de trabajo, por más que la misma sea en horario laboral y en el mismo edificio.
- Método basado en el autodesarrollo dentro y fuera del trabajo: Es el método más recientemente incorporado a las buenas prácticas de aprendizaje organizacional. Un autodidacta es una persona que ha encontrado su propio método para el desarrollo. Se basa en guías de autodesarrollo formadas por instructivos y manuales, tanto para operarios como para jefes. El personal puede acceder a estas guías y decidir cuál es el contenido que aplica para desarrollarse. [24]

En el caso de estudio se aplica una combinación de las tres categorías. De los métodos dentro del trabajo se utiliza el del *Jefe Entrenador*, donde los puestos gerenciales comparten su experiencia y entrenan a los puestos subordinados. Para una empresa familiar donde algunos puestos gerenciales e intermedios son ocupados por hijos del Gerente General, éstos han pasado por muchos puestos de la empresa a lo largo de su vida y están embebidos en los valores de la organización. Por este motivo recae en ellos y en los otros mandos la tarea de entrenar tanto al personal nuevo como al de siempre. Como parte de este programa se incluye

a la formación de los que serán jefes entrenadores, que generalmente serán capacitados fuera del trabajo. El resultado de la auditoría reflejó que ya se trabaja con este sistema del gerente conocedor del oficio que explica cómo trabajar la madera o utilizar los equipos, pero no está planificado para casos de especialización en máquinas específicas o en procesos complejos que requieran de una formación particular.

De los métodos fuera del trabajo se destacan para el caso de estudio los *Cursos Formales de Capacitación* y los *Talleres*. La diferencia entre ambos es que los talleres se caracterizan por plantear un aprendizaje tanto teórico como práctico, siendo este último el que se desarrolla más.

Del método basado en el autodesarrollo se aplica en el caso de estudio en la forma de la lista completa de activos. En dicha lista se encuentra toda la información sobre los activos incluyendo los manuales y documentos de todos los equipos y procesos. Al ser de acceso libre dentro de la empresa funciona como una formación autodidacta. El operario o el carpintero que deseen conocer más sobre los procedimientos de mantenimiento pueden leerlo de la carpeta (física o virtual) de los equipos. Lo mismo para los electricistas y mecánicos que deseen conocer sobre los procesos de producción. De esta manera se amplía la base de conocimientos de todos los empleados ya que, por más que no hayan incorporado e interiorizado los conocimientos, saben que pueden consultar en cualquier momento la información que requieran.

3.4.3.4. RESULTADOS

Todos los aspectos de una actividad de formación son relevantes. Una correcta evaluación de resultados implica, primero, la elección de los criterios de medición según el objetivo que se desee alcanzar con la actividad. Estos criterios ya se definieron en secciones anteriores por lo que resta el análisis de resultados.

La medición de resultados respecto a los participantes puede evaluarse en el momento de la finalización de la formación y a los pocos meses luego de la misma. De esta manera se puede comparar tanto la sensación de aprendizaje inicial y la sensación de la aplicación de los nuevos conocimientos en la práctica.

Como ya se mencionó en la sección de criterios de medición 3.4.3.2, el instructor es fundamental a la hora de evaluar el resultado desde la perspectiva de alguien que observó a los participantes durante la formación. Se deben tener en cuenta los sesgos e intereses que pueda tener el instructor a la hora de ponderar su medición respecto de las demás. Una capacitación brindada por una empresa contratada para tal fin puede tener el interés de justificar el gasto invertido y asegurarse la continuidad del servicio sin tener en cuenta los resultados. Por otra parte, una capacitación brindada como complemento de la compra de un equipo ya obtuvo su ganancia con la venta del equipo por lo que puede mostrarse más sincero a la hora de evaluar a los participantes. Por ejemplo, que la empresa fabricante de la fresadora CNC ofrezca un curso sobre uso y reparación del equipo. Estos son ejemplos que representan casos particulares, pero debe tenerse en cuenta en el análisis caso a caso.

Respecto de los indicadores, se cuenta con los indicadores propios de la formación como el del porcentaje de horas de formación y el del porcentaje de desarrollo del plan de formación. El primero permite comparar cuánta formación se realiza respecto a otros períodos y complementando este indicador con los de producción, órdenes de trabajo de mantenimiento y otros puede darse la idea de los resultados de la formación. El segundo indicador cumple la función de mantener el seguimiento del plan de capacitación. Como función secundaria puede

utilizarse este indicador como referencia de variación de resultados a medida que se completa el plan de formación.

3.4.4. PROCEDIMIENTOS Y EQUIPOS

La mejora de procedimientos y equipos está relacionada con el concepto de calidad. La mejor guía para aplicar este concepto a una organización es la norma ISO 9001/2015. No se encuentra dentro del alcance del presente proyecto la implementación de esta norma, pero se la tomará como referencia para familiarizar a la empresa con el concepto y asentar las bases para el caso que se decida aplicar dicha norma. Por otra parte, esta norma se aplica de manera integral en la empresa mientras que el presente proyecto se basa en el área de mantenimiento, en la cual se aplicarán todos los conceptos mencionados en la presente sección.

La norma se basa en los principios de la gestión de la calidad descritos en la norma ISO 9000. Los principios de la gestión de la calidad son:

- **Enfoque al cliente:** el enfoque principal de la gestión de la calidad es cumplir los requisitos del cliente y tratar de exceder las expectativas del mismo. Cada aspecto de la interacción del cliente proporciona una oportunidad de crear más valor para el cliente. Entender las necesidades actuales y futuras de los clientes y de otras partes interesadas contribuye al éxito sostenido de la organización.
- **Liderazgo:** los líderes en todos los niveles establecen la unidad de propósito y la dirección. Crean condiciones en las que las personas se implican en el logro de los objetivos de la calidad. La unidad de propósito, la dirección y la gestión de las personas permiten a una organización alinear sus estrategias, políticas, procesos y recursos para lograr sus objetivos.
- **Compromiso de las personas:** Las personas competentes, empoderadas y comprometidas en toda la organización son esenciales para aumentar la capacidad de la organización para lograr sus objetivos. Es importante respetar e implicar activamente a todas las personas en todos los niveles.
- **Enfoque a procesos:** se alcanzan resultados coherentes y previsibles de manera más eficaz y eficiente cuando las actividades se entienden y gestionan como procesos interrelacionados que funcionan como un sistema coherente. El sistema de gestión de la calidad consta de procesos interrelacionados. Entender cómo este sistema produce los resultados permite a una organización optimizar el sistema y su desempeño.
- **Mejora:** la mejora es esencial para que una organización mantenga los niveles actuales de desempeño, reaccione a los cambios en sus condiciones internas como externas y cree nuevas oportunidades.
- **Toma de decisiones basada en la evidencia:** las decisiones basadas en el análisis y la evaluación de datos e información tienen mayor probabilidad de producir los resultados deseados.
- **Gestión de las relaciones:** las organizaciones gestionan sus relaciones con las partes interesadas pertinentes, por ejemplo, los proveedores. Las partes interesadas pertinentes influyen en el desempeño de una organización. Es más importante lograr el éxito sostenido cuando una organización gestiona las relaciones para optimizar el impacto en su desempeño. [46]

Entre los resultados de la auditoría del caso de estudio, el estado actual en esta área es el mejor de todos. La empresa está familiarizada con el enfoque al cliente y la gestión de las relaciones, siendo estos parte de los pilares de su producción. De la misma manera ocurre

con el liderazgo, el organigrama cuenta con un líder en cada área y se mantiene la unidad de propósito en todas las líneas, sistema replicado para el área de mantenimiento en el presente proyecto. El compromiso de las personas es otro rubro de fuerza dentro del caso de estudio. Todas las líneas se encuentran empoderadas e implicadas en los objetivos de la empresa. La toma de decisiones basada en la evidencia no se aplica en la actualidad del caso de estudio, pero ya fue desarrollada en las secciones 3.3.4 ANÁLISIS DE FALLOS y 3.4.1 INDICADORES.

El enfoque a los procesos fue directamente uno de los puntos preguntados en la auditoría y se aplica correctamente, pero de manera informal. Los procesos se encuentran correctamente desarrollados en el área productiva y administrativa mediante el entrenamiento, supervisión y control de calidad. El desafío para el presente proyecto es implementar la política actual de la empresa a los procesos del área de mantenimiento, pero de manera formalizada.

La mejora continua es otro de los puntos bajos en el caso de estudio actualmente. Los procesos y equipos se actualizan, pero por obsolescencia o fallo. En este proyecto se sientan las bases para implementar una filosofía de mejora continua.

3.4.4.1. FORMALIZACIÓN DE PROCESOS

Los procesos en sí ya fueron desarrollados en la sección 3.3 PLAN DE MANTENIMIENTO. En la presente sección se establecerá el criterio de numeración y archivo de documentos.

Dentro de la carpeta (física o virtual) de la lista de activos se incluyen los procedimientos específicos sobre cada equipo en particular. A la par del mismo se crea una carpeta de procedimientos comunes a todos los equipos o de aplicación burocrática.

Una parte importante de un sistema de gestión de la información es cómo nombrar a los documentos. En este caso se divide el nombre en tres partes: **código**, **descripción** y **número de revisión**. El código describe mediante números y letras el tipo de documento que es, a que activo (o no) pertenece y un número correlativo que cumple la función de que no haya dos códigos iguales. De esta manera cada documento será único e irrepetible y puede identificarse sólo con su código. La descripción es un breve título que describe al documento, debe ser lo más breve y precisa posible. Además, la descripción no debe estar repetida en otro documento. El número de revisión da cuenta de la cantidad de veces que se actualizó al documento. Al aplicar la mejora continua en los procesos es común que se revisen los procedimientos y documentos para adecuarse o modificar la forma de trabajar.

Haciendo foco en el código, éste consiste tres partes. La primera parte es el tipo, una sigla o dos que representan el tipo de documento. En la Figura 3.4.4.1 se representan todos los tipos de documentos a utilizar y su función. A segunda parte del código es el proceso, siendo a su vez el código del activo al que pertenece el documento (por ejemplo A1S/2) o la sigla del área en la que se aplica a nivel general (PRO: producción, MAN: mantenimiento, ADM: administración). El tercer componente del código es el número ascendente que diferencia a los documentos del mismo tipo que pertenecen a un mismo proceso. En algunos casos es más representativo colocar la fecha (dd-mes-aa, día-mes-año) antes del número ascendente.

Tipo de documento	Sigla	Descripción	Función
Curriculum Vitae	CV	Curriculum del colaborador	Tener registro de las habilidades y experiencia de los colaboradores del sector
Flujograma	FG	Paso a paso gráfico	Permite representar de forma gráfica la secuencia requerida para desarrollar un proceso complejo
Informe	IN	Declaración de los resultados de mediciones o comunicación de un evento sucedido	Registrar eventos tales como accidentes, los resultados de las rutinas de mantenimiento predictivo o resúmenes de indicadores
Instructivo	IT	Paso a paso escrito	Brinda instrucciones en secuencia para realizar una tarea.
Listado	LI	Enumeración de elementos	Listar repuestos, personas, equipos o procesos
Manual	M	Documentación de equipos y repuestos	Manuales brindados por los fabricantes o proveedores de equipos y repuestos
Plan	PLAN	Escrito que precisa los detalles de una acción	Asentar la planificación del mantenimiento o de proyectos a mediano y largo plazo
Plano	PL	Representación gráfica	Información sobre piezas, edificios e instalaciones
Procedimiento	PR	Especifica y detalla un proceso	Descripción completa de un proceso. Puede subdividirse en procedimientos más simples
Propuesta Comercial	PROP	Llamamiento a compra o contratos	Almacenar las propuestas, pliegos y contratos sobre clientes o proveedores
Registro	RG	Documento que evidencia una actividad	Dejar constancia de un hecho (entrega de EPP o un repuesto)

Figura 3.4.4.1 Tipos de documentos y su función.

A continuación, se representan algunos ejemplos de esta codificación:

- IN-AC-05may23-01-Termografía-00

Por el código, identificamos que es un informe correspondiente al compresor general realizado el 5 de mayo de 2023. Por la descripción se deduce que es el informe correspondiente a la rutina predictiva de termografía infrarroja. Finalmente, por el doble cero del número de revisión se trata del documento original y que no fue modificado.

Como comentarios adicionales, se trata de un documento en formato .pdf generado por el software de termografía desarrollado por el fabricante de la cámara y que se incluye con la compra de dicha cámara. Por este motivo no se puede especificar el formato exacto de este documento. Otro comentario respecto a este ejemplo es que en la mayoría de los casos de informes de rutinas predictivas es raro que se deba realizar una revisión de este documento. Un caso en donde podría realizarse una revisión es si a la hora de analizar la medición se encuentran errores en la toma de datos (foto fuera de foco o la falta de una, datos incoherentes, etc).

- PR-MAN-03-Medición de vibración en motores eléctricos-03

En este caso, según el código, se trata de un procedimiento general del área de mantenimiento. Específicamente el número 3 de los documentos del área. Recordar que este número es correlativo del orden en que fueron creados los documentos y no es representativo de ninguna característica del mismo. Por la descripción se trata del procedimiento para medir las vibraciones en motores eléctricos en su tercera revisión. Al ser un proceso tan común y crítico (debido a que los motores eléctricos son la mayoría de los equipos a analizar por vibraciones) es de esperar que sufra revisiones de manera continua.

El procedimiento en sí debe incluir parte de la descripción detallada en la sección correspondiente a 3.3.2.3ANÁLISIS DE ACTIVOS PARA VIBRACIONES. A su vez, se incluye

el manejo del equipo de vibraciones que es parte del manual del fabricante del instrumento, cosa que escapa al alcance del presente proyecto.

3.4.4.2. MEJORA CONTINUA

La mejora continua es una metodología de cambio que viene de la mano de los procesos de calidad total y propone la búsqueda permanente de pequeños cambios para trabajar mejor. En este marco, se entiende que se trabaja mejor o con mayor calidad si se generan mejores resultados, se potencia la eficiencia o se alcanzan niveles superiores en materia de clima laboral; es decir, las mejoras pueden darse en la dimensión interna o externa de la organización.

En el marco de estos procesos, se alienta la presentación de ideas y sugerencias de los miembros de la organización, usuarios del servicio, proveedores, usuarios de la información, etc. El involucramiento de todos los miembros de la organización o área en los proyectos de mejora continua reduce la resistencia al cambio y actúa como un elemento motivador.

El Ciclo PDCA, también conocido como círculo de Deming, es la herramienta fundamental de la mejora continua. Su nombre se deriva de las siglas de las palabras inglesas Plan, Do, Check y Act, que traducidas al español serían planificar, hacer, verificar y actuar. [47]

El ciclo PDCA puede describirse brevemente como sigue:

- Planificar: establecer los objetivos del sistema y sus procesos, los recursos necesarios para generar y proporcionar resultados de acuerdo con los requisitos del cliente y las políticas de la organización, identificar y abordar los riesgos y las oportunidades y establecer las actividades y responsabilidades.
- Hacer: implementar las actividades planificadas en los términos previstos.
- Verificar: realizar el seguimiento y (cuando sea aplicable) la medición de los procesos y los productos y servicios resultantes respecto a las políticas, los objetivos, los requisitos y las actividades planificadas, e informar sobre los resultados.
- Actuar: tomar acciones para corregir las posibles desviaciones encontradas, o bien para mejorar los resultados previstos inicialmente.

Este ciclo es utilizado como modelo de desempeño no sólo en el plano individual de cada proceso, sino también desde la visión global del sistema de gestión de calidad. En la norma ISO-9001/2015 se agrupa el ciclo de Deming con el resto del sistema de gestión de la calidad como se indica en la Figura 3.4.4.2.

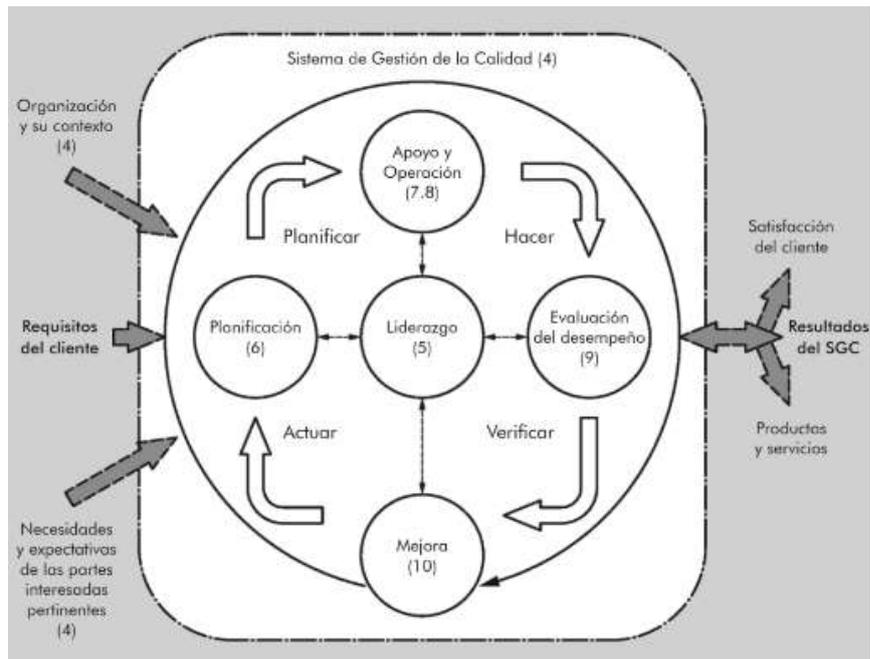


Figura 3.4.4.2 Ciclo PDCA integrado al Sistema de Gestión de la Calidad según norma ISO-9001/2015. [46]

Para el caso de estudio el sistema de gestión de la calidad es mucho más simplificado como ya se mencionó anteriormente. Se incluye la versión del ciclo de Deming de la ISO-9001/2015 como referencia de que la mejora continua es parte clave para sentar las bases de una futura implementación de la norma. El ciclo PDCA a aplicar en el proyecto es el de la Figura 3.4.4.3.

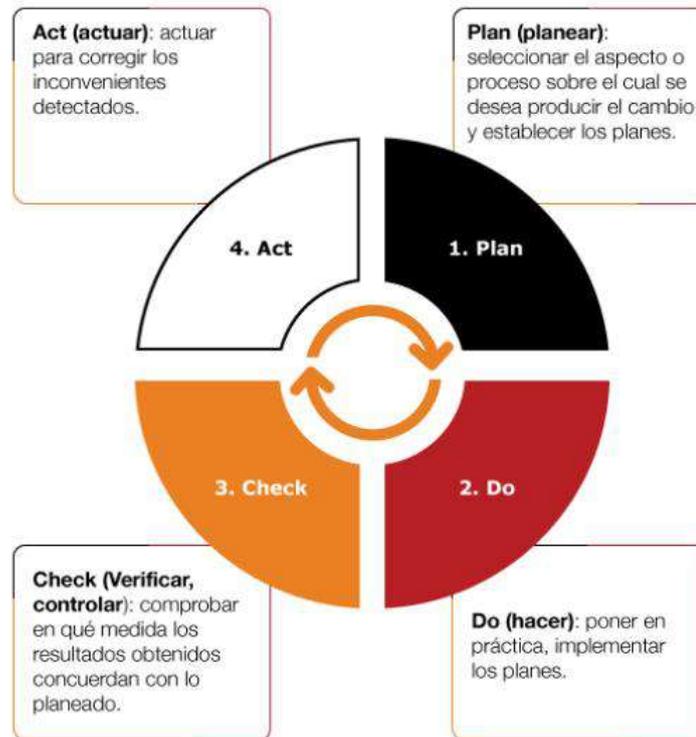


Figura 3.4.4.3 Ciclo PDCA simplificado para la aplicación en el caso de estudio. [47]

En la primera etapa, Planificar, el objetivo debe seleccionarse teniendo en cuenta un análisis de los indicadores actuales y la criticidad de los equipos. Herramientas para seleccionar objetivos existen muchas y diversas, en el caso de estudio se aplica el método SMART que es una metodología para definir objetivos. Se trata de un acrónimo del inglés a través del cual se explican las características básicas de los objetivos SMART. Éstos deben ser específicos (Specific), medibles (Measurable), alcanzables (Achievable), realistas (Realistic) y de duración limitada (Time-bound).

Los objetivos a mediano y largo plazo de la empresa suelen ser generales y abarcando gran parte de la empresa mientras que los objetivos SMART como bien indica la S son específicos.

Gracias a los indicadores se pueden medir (M) muchas variables por lo que los objetivos deben estar alineados a los KPI existentes. De lo contrario deben crearse indicadores específicos para la medición del objetivo dentro del ciclo de Deming actual y para iteraciones futuras.

La A y la R de los objetivos SMART están bastante relacionadas. El objetivo debe representar un desafío, pero manteniéndose dentro del rango alcanzable. En esta metodología alcanzable se refiere a lo posible. Que sea realista hace referencia a que sea "humanamente posible". Se comprende mejor esta idea con un ejemplo: un objetivo puede ser alcanzable si se trabajan 12 horas al día durante dos semanas, esto lo vuelve no realista ya que la salud de los trabajadores y la legislación no lo permiten.

Un objetivo SMART debe tener una fecha de finalización. Se debe llevar un cronograma claro y no ser posible extenderse de manera indefinida.

Poniendo este criterio de selección de objetivos dentro del contexto del caso de estudio puede darse el siguiente ejemplo:

Reducir el tiempo de parada del compresor general (AC) un 15% en el siguiente trimestre.

Este objetivo es específico, reducir tiempo de parada de un equipo. Es medible ya que se cuenta el indicador de disponibilidad de equipos críticos, siendo el AC un equipo crítico. En base al indicador puede calcularse el tiempo de parada actual y el tiempo de parada un 15% más bajo, siendo ese el punto a medir. Tomándose una medición mensual se puede calcular una reducción mensual del 5% para verificar si se está cumpliendo el objetivo o no. Es alcanzable y realista ya que no se pide reducir el tiempo a la mitad, sino que un 15% es un valor razonable. Es limitado en el tiempo ya que el lapso es en tres meses y no puede posponerse de esa fecha. El tiempo lo dictan las mediciones mensuales de los indicadores.

Siguiendo en la etapa del PLAN, luego de definir el objetivo se debe planificar las acciones a tomar para cumplir con dicho objetivo. Siguiendo con el ejemplo desarrollado, las acciones pueden estar orientadas a la planificación más eficiente del mantenimiento programado, a un cambio en el procedimiento (ya sea del mantenimiento y limpieza o a los correctivos) o a una mejora en el análisis de predictivos para evitar paradas no programadas.

La siguiente etapa del ciclo es el DO, hacer. Aquí se aplican las acciones establecidas en la etapa de planificación. Esta etapa ya tiene en cuenta el correr del tiempo hacia la fecha límite.

En la etapa del CHECK o verificación se utiliza al indicador de disponibilidad del equipo en particular. Hay que tener en cuenta que cada medición del indicador puede ser un causal de avanzar a la siguiente etapa del ciclo que es ACT, actuar. La cuarta etapa debe corregir los desvíos que se detecten. En el ejemplo puede darse el caso de que en el primer mes se aplican los cambios planificados y se obtiene un resultado contrario a lo esperado, en lugar de reducirse un 5% los tiempos de parada aumentaron un 2%. En esta etapa debe planificarse a contrarreloj una contramedida, tal vez volver al método anterior con otro de los cambios que se habían planteado o continuar con lo planeado, pero intensificando los esfuerzos.

Al finalizar cada ciclo de Deming se debe sacar una conclusión sobre el proceso realizado (ya sea habiendo cumplido el objetivo o no) y comenzar con el siguiente ciclo. El caso negativo debe tomarse como un aprendizaje y ajustar los objetivos para volverlos más alcanzables y realistas la próxima vez.

3.4.4.3. CONCLUSIONES

La formalización de procesos permite organizar los procedimientos e identificar los documentos a crear para reemplazar los conocimientos transmitidos de boca en boca. De esta manera se reduce la informalidad de procesos y se deja de depender de personas específicas para diversas tareas. Ambos puntos bajos en la auditoría.

La implementación de una filosofía tal como la mejora continua fortalecerá poco a poco la gestión de manera eficiente de manera interna como externa.

Estos dos puntos pueden tomarse a nivel integral en la empresa como sólo en el área de mantenimiento.

4. CONCLUSIONES

En el presente proyecto se estudia la implementación teórica de un plan de mantenimiento y mejoras con la adecuación de tecnologías modernas del mantenimiento industrial a un caso de estudio real, una carpintería industrial de más de 50 años en la ciudad ubicada en la zona de los alrededores del puerto de Mar del Plata.

El mantenimiento no sólo incluye la reparación de equipos, la gestión del mismo abarca múltiples frentes y desde la ingeniería se puede cumplir en gran parte de ellos. A lo largo del presente proyecto se pudieron evidenciar muchas de las características del mantenimiento, tanto técnicas como de gestión. Se desarrollaron conceptos teóricos y se plantearon las modificaciones acordes al caso de estudio. El trabajo de los ingenieros en el mantenimiento es integral y permite dar soluciones acordes a las necesidades de las organizaciones.

Luego de la auditoría y el relevamiento del caso de estudio, se concluyó que la empresa contaba con puntos altos y bajos respecto al mantenimiento y la gestión del mismo. El plan de mantenimiento y mejoras planteado da solución a los problemas hallados y realza los puntos fuertes dándoles un marco de formalidad, proyección y confiabilidad.

Si bien el proyecto se plantea de manera teórica, todas las acciones están basadas en la situación real del caso de estudio y se tomaron en cuenta las tareas que corrijan el rumbo en caso de requerir iteraciones del plan.

El plan de mantenimiento planteado pone sobre la mesa un cambio de paradigma respecto a lo que la empresa consideraba como mantenimiento. Se cambia de un 100% de mantenimiento correctivo a un equilibrio entre predictivos, preventivos y correctivos. Se pasa de equipos trabajando hasta el fallo con su consecuente tiempo muerto a un estado donde se aprovecha el valor de los equipos y se predicen los fallos pudiendo programar los tiempos muertos a favor de la empresa. La inclusión de termografía infrarroja y el análisis de vibraciones resultan claves en el plan de mantenimiento propuesto.

El manejo de la información y los datos sobre los equipos aumenta en gran medida con las mejoras planteadas. La toma de decisiones basada en la evidencia es otro de los grandes cambios que implementa este proyecto. La lista completa de activos, la medición de indicadores y el análisis de fallas permiten manejar situaciones que de otra manera se escaparían del control. De esta manera se facilita la proyección de la empresa en niveles que no serían posibles en el estado inicial.

Uno de los puntos fuertes de la empresa es el manejo de personas y su arraigada cultura organizacional. Con el plan de mejoras en la parte de gestión del mantenimiento y formación, se refuerza esta ventaja de la gestión actual dándole nuevas herramientas y facilidades.

En conclusión, el proyecto teórico planteado mejora en gran medida muchos de los aspectos del mantenimiento y su gestión en el caso de estudio. Si hubiera sido una implementación real, no cabrían dudas del éxito del proyecto desde el punto de vista operativo.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. M. S. Gómez, «TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO. METODOLOGÍA DE APLICACIÓN EN LAS ORGANIZACIONES,» Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Colombia., Bogotá, Colombia., 2017.
- [2] I. Masaaki, «Gemba Kaizen: A Commonsense Approach to a Continuous Improvement Strategy,» McGraw Hill, Nueva York, 2012.
- [3] Ministerio de Desarrollo Productivo De la República Argentina, «Plan de Desarrollo Productivo Argentina 4.0,» Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina, Abril 2021.
- [4] J. S. a. K. P. Amanda Mcleman, «Plant Engineering,» 23 Junio 2021. [En línea]. Available: <https://www.plantengineering.com/articles/the-maintenance-function-like-manufacturing-itself-is-a-rapidly-changing-environment/>. [Último acceso: Septiembre 2022].
- [5] B. McCrea, «Logistics Management,» 8 Mayo 2018. [En línea]. Available: https://www.logisticsmgmt.com/article/annual_maintenance_repair_and_operations_mro_survey_2018_spending_on_the_ri. [Último acceso: Septiembre 2022].
- [6] H. M. y. R. A. J. Motta, «Industria 4.0 en mipymes manufactureras de la Argentina,» Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Santiago, 2019.
- [7] Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial, «Informe sobre el Desarrollo Industrial 2020. La industrialización en la era digital,» Viena, 2019.
- [8] J. O. J.F. Carmona, «Procedimiento para el mantenimiento predictivo en subestaciones de 115/34,5/13,8 kV, utilizando técnicas de termografía y ultrasonido. Caso de estudio. Empresa electricidad de Valencia,» Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería., Valencia, 2008.
- [9] Bianchi-Falcinelli, Diagnóstico de fallas mediante análisis de vibraciones, Balcarce 873-1064, Buenos Aires, Argentina: Nueva Librería, 1986.
- [10] M. R. Spiegel, Teoría y Problemas de Mecánica Teórica con una introducción a las Ecuaciones de Lagrange y a la Teoría Hamiltoniana, Atlacomulto 499-501, Nalcaupan de Juarez, Edo. de México: McGraw-HILL DE MÉXICO S.A., 1976.
- [11] R. R. Hertig, Mecánica Teórica, Florida 340, Buenos Aires, Argentina: Librería El Ateneo Editorial, 1978.
- [12] SEMAPI, Curso Analista de Vibraciones Categoría II ISO 18436-2, Las Heras 419, Campana, Buenos Aires, Argentina: Semapi, 2019.
- [13] D. d. F. A. III, «Laplace,» Universidad de Sevilla, 10 marzo 2010. [En línea]. Available: http://laplace.us.es/wiki/index.php/Movimiento_oscilatorio. [Último acceso: agosto 2022].

- [14] D. d. I. M. y. Construcción, «Mecapedia,» Universitat Jaume I, 11 Julio 2006. [En línea]. Available: <http://www.mecapedia.uji.es/resonancia.htm>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [15] NTI Audio, «NTI Audio,» [En línea]. Available: <https://www.nti-audio.com/es/servicio/conocimientos/transformacion-rapida-de-fourier-fft#:~:text=La%20%22Transformaci%C3%B3n%20r%C3%A1pida%20de%20Fourier,proporciona%20informaci%C3%B3n%20sobre%20su%20composici%C3%B3n..> [Último acceso: Agosto 2022].
- [16] Wikipedia, «Wikipedia, La Enciclopedia Libre,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Serie_de_Fourier. [Último acceso: agosto 2022].
- [17] Brüel & Kjær an HBK company, «BKSV,» [En línea]. Available: <https://www.bksv.com/es/knowledge/blog/vibration/piezoelectric-accelerometers>. [Último acceso: agosto 2022].
- [18] G. White, Introducción al Análisis de Vibraciones, 300 Trade Center, Suite 4610, Woburn, MA 01801 USA: ANZIMA DLI, 2010.
- [19] M. Caldera, *Radiación*, Mar del Plata: Cátedra de Instalaciones Termomecánicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata, 2015.
- [20] C. Torres H, «Análisis de Imágenes Infrarrojas: Inspección de Cableado Eléctrico,» Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica, Tonantzintla, Puebla, 1998.
- [21] T. D. McGee, Principles and Methods of Temperature Measurements, John Wiley & Sons, 1988.
- [22] ASTM, «Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers,» [En línea]. Available: <https://www.astm.org/e1862-97r10.html>. [Último acceso: Noviembre 2022].
- [23] ISO, «Condition monitoring and diagnostics of machines — Thermography — Part 1: General procedures,» [En línea]. Available: <https://www.iso.org/standard/41648.html>. [Último acceso: Noviembre 2022].
- [24] M. Alles, Dirección estratégica de recursos humanos 3a ed., Buenos Aires: Granica, 2015.
- [25] P. Cousseau, «Taller de gestión del mantenimiento industrial,» MiTechSchool, 2021.
- [26] Cátedra Seguridad, Higiene y Saneamiento Ambiental, «Principios de la higiene del trabajo y seguridad en el trabajo,» Universidad Nacional de Mar del Plata, Facultad de Ingeniería, Mar del Plata, 2017.
- [27] H. Joel, «Servicios preventivos de seguridad e higiene en el trabajo,» [En línea]. Available: <http://www.sepresst.com.mx/2019/09/28/jerarquia-de-controles-de-riesgos/>. [Último acceso: Dic 2022].
- [28] P. C. Bariestain, «5 estrategias para vencer la resistencia al cambio,» LinkedIn, Santiago, Chile, 2019.

- [29] M. A. I. C. Edwin Gutiérrez, «Predictiva21,» [En línea]. Available: <https://predictiva21.com/analisis-criticidad-integral-activos/>. [Último acceso: Diciembre 2022].
- [30] Prysmian Group, Catálogo de cables para media y baja tensión, 2022.
- [31] Sight Electric, «Sight Electric,» [En línea]. Available: <https://www.sight.cl/termografia.html>. [Último acceso: Diciembre 2022].
- [32] Arrega Industrial, «Arrega Industrial,» [En línea]. Available: <https://arregaindustrial.com/deteccion-de-sobrecargas-y-desequilibrios-electricos/>. [Último acceso: Diciembre 2022].
- [33] Allen-Bradley, Manual de usuario Variador de CA de frecuencia ajustable PowerFlex serie 520, 2013.
- [34] J. C. S. Claudio Oscar Dimenna, Cálculo y construcción de transformadores, Mar del Plata: Universidad Nacional de Mar del Plata, 2015.
- [35] Fluke, «fluke process instruments,» [En línea]. Available: <https://www.flukeprocessinstruments.com/es/service-and-support/knowledge-center/infrared-technology/emissivity-metals>. [Último acceso: Enero 2023].
- [36] Predictiva21, «Predictiva21,» [En línea]. Available: <https://predictiva21.com/desbalanceo-vibraciones/>. [Último acceso: Enero 2023].
- [37] ISO, «ISO 10816-1:1995/Amd 1:2009. Vibraciones mecánicas - Evaluación de las vibraciones en las máquinas a través de la medición en partes no rotatorias,» 2009.
- [38] Rodesprex, «Norma ISO 10816».
- [39] J. Moubray, Reliability Centered Maintenance, Laicestershire: Aladon Ltd, 1998.
- [40] F. Nowlan, Reliability Centered Maintenance, San Francisco: United Airlines, 1978.
- [41] Luis Cyrino, «Tractian,» [En línea]. Available: <https://tractian.com/es/blog/patron-de-fallo-comprende-su-importancia-en-el-mantenimiento>. [Último acceso: Enero 2023].
- [42] M. Sales, «Diagrama de Pareto,» Ealde Business School, 2013.
- [43] S. G. Garrido, «Indicadores de Mantenimiento,» de *Organización y Gestión Integral del Mantenimiento*, Madrid, Díaz de Santos, 2003.
- [44] I. A. Morcela, «Gerenciamiento del Cambio,» Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata, 2012.
- [45] L. L. Piccone, «El rol del psicólogo en los procesos de reclutamiento y selección de personal para empresas. Un recorrido desde 1985 hasta la fecha, en la ciudad de Mar del Plata,» Cátedra de Psicología Laboral de la Universidad Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata, 2014.

[46] ISO, «ISO 9001:2015 Sistemas de gestión de la calidad - Requisitos,» 2015.

[47] P. Lanzetti, «Auditoría y Control en el Estado,» Facultad de Ciencias Económicas, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, 2017.

APÉNDICE: AUDITORÍA DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO

Planilla donde se muestra la información recabada durante la auditoría realizada a la empresa del caso de estudio:

AUDITORIA GESTION DE MANTENIMIENTO	
EMPRESA: Carpintería Damiani S.R.L.	PLANTA: Calle Galicia
FECHA: 09/10/2022	

1.1 IDENTIFICACIÓN DE ACTIVOS	0	1	2	3	RESULTADO	OBSERVACIONES
1.1.1 ¿Existe un inventario actualizado de las instalaciones?	No	Ago	Bastante completo	Totalmente Completo	2	
1.1.2 ¿Son conocidas las características técnicas de los activos? (piezas y repuestos, características de funcionamiento, mantenimiento)	No	Si pero no hay registro	Si de los activos importantes	Registro completo	1	
1.1.3 ¿Existe un plano de planta con la ubicación de los activos?	No y no se planeó	No pero se planeó	Si pero incompleto	Si	1	
1.1.4 ¿Hay registros del historial de fallas de los activos?	Nada	Algunos equipos	Muchos	Todos	0	
1.1.5 ¿Se encuentran identificados correctamente en campo? (etiquetado)	No	Si, sin etiquetado	Si, pero incompleto	Totalmente Completo	1	
1.1.6 ¿Hay un responsable de los activos?	No	En pocos activos	En casi todos los activos	Para todos los activos	1	
1.1.7 ¿El personal tiene conocimiento y acceso a las características técnicas de los activos?	No	En pocos activos	En casi todos los activos	Para todos los activos	2	
38%						8

1.2 INFRAESTRUCTURA FISICA INTERNA	0	1	2	3	RESULTADO	OBSERVACIONES
1.2.1 ¿Hay un lugar apropiado para guardar las herramientas de trabajo?	No	Para algunas	Para casi todo	Optimo	2	
1.2.2 ¿Está limpia y ordenada la planta?	No muy ordenado	Mal aspecto	Aceptable	Excelente	2	
1.2.3 ¿Están delimitadas las áreas de proceso y de circulación?	No	Algunas	La mayoría	Si	0	
1.2.4 ¿Las herramientas se corresponden con lo que se necesita?	No	Carencia importante	Falta algo	Si	3	
1.2.5 ¿Las máquinas herramientas del Taller se corresponden con lo que se necesita?	No	Carencia importante	Falta algo	Si	3	
1.2.6 ¿Se cuenta con medios de comunicación interna y externa, medios de elevación, y medios de transporte necesarios?	No	Carencia importante	Problemas menores	Si, todos	3	
1.2.7 ¿Existe sistema de seguridad en la planta?	No	Carencia importante	Problemas menores	Si	2	
71%						15

1.3 ANALISIS DE CRITICIDAD		0	1	2	3	RESULTADO	OBSERVACIONES
1.3.1	¿Existe un análisis de las líneas en función de riesgo / impacto de fallas?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo	0	
1.3.2	¿Existe un análisis de los equipos/instalaciones en función de riesgo / impacto de fallas?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo	0	
1.3.3	¿Se actualiza periódicamente esta información?	Nunca	A veces	Casi siempre	Siempre	0	
1.3.4	¿El personal tiene conocimientos de este concepto y lo tiene en cuenta en su accionar?	No	Algo	En forma Frecuente	Siempre	0	
						0%	0

1.4 PLAN DE MANTENIMIENTO		0	1	2	3	RESULTADO	OBSERVACIONES
1.4.1	¿Existe un plan de mantenimiento que afecte a todas las instalaciones y equipos significativos de la planta?	No	Carencia importante	Problemas menores	SI	1	
1.4.2	¿Hay una programación de las tareas incluidas en el plan de mantenimiento (quien y cuando se realizará cada tarea)?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo	1	
1.4.3	¿El Plan de mantenimiento respeta las instrucciones de los fabricantes?	No	Algo	Casi siempre	Siempre	2	
1.4.4	¿El plan de mantenimiento se realiza y se cumple?	Nunca	A veces	Casi siempre	Siempre	2	
1.4.5	¿El plan de mantenimiento tiene en cuenta el concepto de criticidad de líneas y equipos?	No	En general no	Casi siempre	Siempre	0	
1.4.6	¿Existe plan de mantenimiento preventivo/predictivo para equipos importancia Alta?	No	formal / intuitivo	Formal pero incompleto	SI	1	
1.4.7	¿Se cuenta con algún sistema administrativo para gestionar el Plan de Mantenimiento?	No	SI, pero se usa poco	Problemas menores	SI, se usa a diario	0	
1.4.8	¿Están establecidos los límites de las alertas de avería / falla para los equipos con Mantenimiento Predictivo?	No	En general no	Casi siempre	Siempre	1	
1.4.9	¿Todos los trabajos de mantenimiento que se realizan se reflejan en una orden de trabajo?	No	En general no	Casi siempre	Siempre	0	
1.4.10	¿Actualmente hay personal con conocimientos en mantenimiento eléctrico?	Nadie	Algunos	Muchos	Todos	1	
1.4.11	¿Actualmente hay personal con conocimientos en mantenimiento mecánico?	Nadie	Algunos	Muchos	Todos	1	
						30%	10

1.5 ALMACEN DE REPUESTOS		0	1	2	3	RESULTADO	OBSERVACIONES
1.5.1	¿Existe una instalación apropiada para almacenar los repuestos?	No	Ciencia importante	Problemas menores	SI	3	
1.5.2	¿Existe un inventario actualizado de los repuestos almacenados?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo	1	
1.5.3	¿Se pueden encontrar relativamente rápido los repuestos que se necesitan cuando se van a buscar?	Nunca	A veces	Casi siempre	Siempre	3	
1.5.4	¿Se administra el stock conociendo niveles mínimos, máximos y de pedido?	No	Algunos casos	Casi siempre	SI	2	
1.5.5	¿Se comprueba periódicamente que se dispone de ese stock?	No	Algunos casos	Casi siempre	SI	1	
1.5.6	¿Los movimientos del almacén se registran de alguna forma (sistema informático, hoja de cálculo, etc.)?	Nunca	A veces	Casi siempre	Siempre	0	
1.5.7	¿Coincide lo que se cree que se tiene (según los inventarios y el sistema informático) con lo que se tiene realmente?	Nunca	A veces	Bastante seguido	Siempre	2	
1.5.8	¿Están las estanterías y cajones identificados claramente?	No	Algo	Problemas menores	SI	2	
						58%	14

1.6 ANALISIS DE FALLAS		0	1	2	3	RESULTADO	OBSERVACIONES
1.6.1	¿Se realiza un análisis de las fallas que generan paradas?	Nunca	A veces	Bastante seguido	Siempre	1	
1.6.2	¿Se llevan a la práctica las conclusiones de estos análisis?	No	Algo	Bastante seguido	Siempre	2	
1.6.3	¿Está el personal capacitado en herramientas de análisis de fallas?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo	0	
1.6.4	¿Hay proyectos de mejoras en base a datos de fallas repetitivas?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo	0	
1.6.5	¿El tiempo medio de resolución de una avería es bajo?	No	Bastante lento	Bastante rápido	SI	2	
1.6.6	¿El número de averías repetitivas es bajo?	No	Poco	Bastante	SI	2	
1.6.7	¿El número de averías con el máximo nivel de prioridad (o averías urgentes) es bajo?	No	Poco	Bastante	SI	2	
1.6.8	¿El número de averías pendientes de reparación es bajo?	No	Poco	Bastante	SI	3	
1.6.9	¿La razón por la que las averías están pendientes está justificada?	No	En general no	Casi siempre	Siempre	2	
						52%	14

1.7	INDICADORES	0	1	2	3	RESULTADO	OBSERVACIONES
1.7.1	¿Existen indicadores o KRIs para medir el funcionamiento de la planta?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo	0	
1.7.2	¿Existen indicadores para medir la utilidad del Almacén Técnico?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo	0	
1.7.3	¿Existen indicadores o KRIs para medir el impacto de Seguridad y Medio Ambiente?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo	0	
1.7.4	¿Existen indicadores o KRIs para medir la eficiencia del Mantenimiento?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo	0	
1.7.5	¿Existen indicadores para medir el avance de los planes de capacitación?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo	0	
1.7.6	¿Se han definido dichos indicadores en base a la contribución a la mejora de la organización?	No	Algo	Bastante	Totalmente	0	
1.7.7	¿Tienen conocimiento los integrantes del equipo sobre la contribución de los KRIs al logro de los Objetivos?	No	En general no	Casi siempre	Siempre	0	
						0%	0

1.8	ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL	0	1	2	3	RESULTADO	OBSERVACIONES
1.8.1	¿Esta definido el Organigrama?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo	1	
1.8.2	¿Existe descripción de funciones para los puestos?	No	Para algunos	En casi todos los puestos	Para todos los puestos	2	
1.8.3	¿Se ha definido un presupuesto general de mantenimiento?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo	0	
1.8.4	¿Están discriminados los conceptos principales de dicho presupuesto?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo	0	
1.8.5	¿Esta definidos los roles y responsabilidades de la gestión del mantenimiento?	No	Algo	Bastante completo	Totalmente Completo	2	
1.8.6	¿Se puede considerar que la estructura está acorde a las necesidades de la operación?	No	Algo	A veces	SI	3	
1.8.7	¿Existen reuniones periódicas a nivel operación y administración para analizar el avance de la gestión?	No	Algo	A veces	SI	0	
1.8.8	¿El sistema informático resulta adecuado?	No	Algo	Bastante	SI	0	
1.8.9	¿El sistema informático supone una carga burocrática baja?	No	Algo	Bastante	SI	0	
1.8.10	¿Los mandos consultan la información contenida en el sistema informático?	No	En general no	Casi siempre	Siempre	1	
1.8.11	¿El personal de producción consulta la información contenida en el sistema informático?	No	En general no	Casi siempre	Siempre	0	
						27%	9

1.9	FORMACIÓN	0	1	2	3	RESULTADO	OBSERVACIONES
1.9.1	Hay personal "imprescindible" cuya ausencia afecta el normal funcionamiento de la planta?	Varias personas	Al menos una persona	En algunos casos	No	1	
1.9.2	¿Se realiza una formación inicial efectiva cuando se incorpora un nuevo trabajador ?	No	No siempre	En casi todos los puestos	Para todos los puestos	3	Entrenamiento en la tarea a cubrir.
1.9.3	¿Hay un plan de formación para el personal?	No	Si, pero sin formato	Aceptable	Para todos los puestos	1	
1.9.4	¿Este plan de formación hace que los conocimientos en el mantenimiento de la planta mejoren?	No	Graves defectos	Aceptable	SI	2	
1.9.5	¿Este plan hace que mejoren otros conocimientos (operaciones, seguridad, medioambiente, administración, etc)?	No	Poca incidencia	Aceptable	SI	2	
1.9.6	¿El nivel de rotación entre el personal es bajo?	Muy alto	Mayor a la media	Normal	Muy bajo	3	
						67%	12

1.10	PROCEDIMIENTOS Y EQUIPOS	0	1	2	3	RESULTADO	OBSERVACIONES
1.10.1	¿Los procedimientos son claros y perfectamente entendibles?	No	Algo	Bastante completo	SI	3	Explicados en el entrenamiento. No por escrito.
1.10.2	¿El personal recibe formación en estos procedimientos, especialmente cuando se producen cambios?	No	Algo	Bastante completo	SI	2	
1.10.3	¿Hay equipos que requieran actualizaciones?	Todos	Muchos	Pocos	Ninguno	3	
1.10.4	¿Cuando el personal realiza una tarea utiliza el procedimiento aprobado?	No	Algo	Bastante completo	Siempre	3	
1.10.5	¿Los procedimientos se actualizan periódicamente?	No	En general no	Casi siempre	SI	1	En caso de fallo u obsolescencia de procedimiento.
						80%	12

PUNTAJE TOTAL	94
PUNTAJE MAXIMO	225

PUNTAJE TOTAL	94
INDICE DE CONFORMIDAD	42%